

ISSN 2450-8055
eISSN 2543-8867

ZESZYTY NAUKOWE

Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Ekonomika i Organizacja Logistyki

Scientific Journal of Warsaw University of Life Sciences

Economics and Organization of Logistics

11 (2) 2026

ZESZYTY NAUKOWE

Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Ekonomika i Organizacja Logistyki

Scientific Journal of Warsaw University of Life Sciences

Economics and Organization of Logistics

11 (2) 2026

SCIENTIFIC BOARD

Bogdan Klepacki, Warsaw University of Life Sciences – SGGW (Chairman); **Theodore R. Alter**, Pennsylvania State University, USA; **Spyros Binioris**, Technological Educational Institute of Athens, Greece; **Georgij Cherevko**, Lviv State Agrarian University, Ukraine; **James W. Dunn**, Pennsylvania State University, USA; **Wojciech Florkowski**, University of Georgia, USA; **Piotr Gradziuk**, Institute of Rural and Agricultural Development, Polish Academy of Sciences (PAN); **Elena Horska**, Slovak University of Agriculture in Nitra, Slovakia; **Marianna Jacyna**, Warsaw University of Technology; **Qi Jun Jiang**, Shanghai Ocean University, China; **Stanisław Krzyżaniak**, Institute of Logistics and Warehousing in Poznań; **Radim Lenort**, Technical University of Ostrava, Czech Republic; **Xenie Lukoszová**, VŠB – Technical University of Ostrava, Czech Republic; **Iwo Nowak**, Stanisław Staszic University of Applied Sciences in Piła; **Olena Slavkova**, Sumy State University, Ukraine; **Bojan Rosi**, University of Maribor, Slovenia; **Elżbieta J. Szymańska**, Warsaw University of Life Sciences – SGGW; **Maria Tsirintani**, Technological Educational Institute of Athens, Greece.

EDITORIAL BOARD

Elżbieta J. Szymańska (Editor-in-Chief)

Thematic Editors: **Marta Zięba** (language editor; efficiency in logistics); **Joanna Domagała** (warehouse management); **Teresa Gądek-Hawlena** (safety in transport and logistics); **Konrad Michalski** (logistic systems and IT systems in logistics); **Luiza Ochnio** (statistical methods in logistics); **Tomasz Rokicki** (transport and spedition); **Monika Roman** (optimization of logistics processes); **Sławomir Stec** (energy and innovation in logistics); **Elżbieta J. Szymańska** (supply chains and costs in logistics); **Marcin Wysokiński** (hazardous materials and OHS in logistics); **Aleksandra Bilik** (editorial secretary).

web page: eiol.sggw.edu.pl

Cover design – Elżbieta J. Szymańska

Editor – Agnieszka Orysiak

Technical editor – Tomasz Ruchniewicz

ISSN 2450-8055 eISSN 2543-8867

Warsaw University of Life Sciences – SGGW Press

Nowoursynowska St. 161, 02-787 Warsaw

tel. 22 593 55 23 (-27 – sale),

e-mail: wydawnictwo@sggw.edu.pl

www.wydawnictwo.sggw.edu.pl

Contents

Spis treści

Rafał Adamski

Logistyczne i organizacyjne uwarunkowania bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji Logistical and organizational determinants of safety in the intermodal transport of explosives and ammunition	5
---	---

Agnieszka Bukowska-Piestrzyńska, Maciej Bielecki

Technologie Przemysłu 4.0 jako instrumenty wspierające Lean Logistics Industry 4.0 technologies as instruments supporting Lean Logistics	25
---	----

Grzegorz Dzieniszewski, Damian Jasiejko

Analiza efektywności energetycznej i emisji spalin w biogazowni z uwzględnieniem łańcucha logistycznego w produkcji biogazu Energy efficiency and exhaust emissions analysis in biogas plant considering the logistics chain of biogas production	41
--	----

Grzegorz Dzieniszewski, Damian Jasiejko

Ocena wpływu utylizacji bioodpadów metodą spalania w silnikach tłokowych na ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko z perspektywy łańcucha logistycznego produkcji biogazu Assessment of the environmental impact reduction from the utilization of bio-waste via combustion in reciprocating engines from the perspective of the biogas production logistics chain	55
---	----

Kacper Gałek

Marnotrawstwo w procesach logistycznych i metody jego eliminacji Waste in logistics processes and methods of its elimination	71
---	----

Kacper Lipski

Linie okrężne jako element optymalizacji systemu kolei pasażerskiej w ujęciu Lean Management Circular railway lines as an element of passenger rail system optimization from a Lean Management perspective	85
---	----

Michał Thlon

Koszty stabilizacji systemu elektroenergetycznego w warunkach ograniczeń sieciowych – perspektywa logistyki systemowej Costs of power system stabilization under network constraints – a systems logistics perspective	109
---	-----

Rafał Adamski✉

Polfrost Internationale Spedition Sp. z o.o. w Warszawie

Logistyczne i organizacyjne uwarunkowania bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji

Logistical and organizational determinants of safety in the intermodal transport of explosives and ammunition

Synopsis. Bezpieczeństwo transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji stanowi jeden z kluczowych elementów systemu bezpieczeństwa państwa, wpływający zarówno na sprawność funkcjonowania łańcuchów dostaw sektora obronnego, jak i na utrzymanie zdolności operacyjnych sił zbrojnych. Wzrost znaczenia mobilności wojskowej, rozwój międzynarodowych korytarzy transportowych oraz zmieniające się środowisko zagrożeń powodują, że zapewnienie bezpiecznego przewozu materiałów klasy 1 według ADR, RID i IMDG Code nabiera wymiaru strategicznego. Celem badań była identyfikacja, systematyzacja i ocena logistycznych oraz organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji oraz określenie ich znaczenia dla odporności systemu bezpieczeństwa państwa i zdolności operacyjnych. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem analizy krytycznej literatury krajowej i zagranicznej, analizy dokumentów normatywnych, analizy systemowej oraz jakościowej analizy porównawczej rozwiązań organizacyjnych stosowanych w transporcie materiałów niebezpiecznych. Ocenę determinant przeprowadzono według kryteriów wpływu na poziom ryzyka, ciągłości procesów logistycznych, bezpieczeństwa infrastruktury i skuteczności współdziałania uczestników transportu.

Wyniki wskazują, że bezpieczeństwo przewozu materiałów wybuchowych ma charakter systemowy i zależy od wzajemnych relacji pomiędzy organizacją procesu logistycznego, jakością infrastruktury, kompetencjami personelu, zarządzaniem ryzykiem i integracją procedur obowiązujących w poszczególnych gałęziach transportu. Zidentyfikowano również rosnące znaczenie cyfrowych systemów monitorowania, wymiany informacji oraz ochrony przed zagrożeniami hybrydowymi i cybernetycznymi. Uzyskane wyniki umożliwiły sformułowanie rekomendacji dotyczących doskonalenia organizacji transportu intermodalnego materiałów

✉Rafał Adamski – Polfrost Internationale Spedition Sp. z o.o. w Warszawie; e-mail: rafal.adamski@polfrost.com.pl

wybuchowych i amunicji oraz wzmacniania odporności systemów logistycznych odpowiedzialnych za funkcjonowanie infrastruktury krytycznej i zabezpieczenie potrzeb obronnych państwa.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo transportu, transport intermodalny, materiały wybuchowe, amunicja, logistyka wojskowa, zarządzanie ryzykiem

Abstract. The safety of the intermodal transport of explosives and ammunition constitutes one of the key components of a state's security system, affecting both the efficiency of defence supply chains and the operational readiness of the armed forces. The growing importance of military mobility, the expansion of international transport corridors, and the evolving security environment have elevated the safe transport of Class 1 dangerous goods under the ADR, RID, and IMDG Code regulations to a matter of strategic importance. The objective of this study was to identify, classify, and evaluate the logistical and organizational determinants of the safety of intermodal transport of explosives and ammunition, as well as to determine their significance for the resilience of the national security system and operational capabilities. The research was conducted using a critical review of national and international literature, an analysis of legal and regulatory documents, systems analysis, and a qualitative comparative analysis of organizational solutions applied in the transport of dangerous goods. The identified determinants were assessed according to their impact on risk levels, the continuity of logistics processes, infrastructure safety, and the effectiveness of cooperation among transport stakeholders. The findings demonstrate that the safety of transporting explosives is systemic in nature and depends on the interactions between logistics process organization, infrastructure quality, personnel competence, risk management practices, and the integration of safety procedures across different modes of transport. The study also highlights the increasing importance of digital monitoring systems, information exchange platforms, and protection against hybrid and cyber threats. Based on the research findings, a set of practical recommendations was formulated to improve the organization of intermodal transport of explosives and ammunition and to strengthen the resilience of logistics systems responsible for the operation of critical infrastructure and the fulfilment of national defence requirements.

Keywords: transport safety, intermodal transport, explosives, ammunition, military logistics, risk management

Kody JEL: R41, L91, H56

Wprowadzenie

Bezpieczeństwo transportu materiałów wybuchowych i amunicji jest od wielu lat jednym z najistotniejszych zagadnień logistyki bezpieczeństwa oraz nauk o bezpieczeństwie. W ostatnich latach problem ten nabrał jednak nowego znaczenia w związku ze zmianą środowiska bezpieczeństwa w Europie, intensyfikacją działań na rzecz mobilności wojskowej NATO i Unii Europejskiej, wzrostem znaczenia infrastruktury krytycznej oraz koniecznością zapewnienia ciągłości dostaw dla przemysłu obronnego.

Transport materiałów klasy 1 nie jest obecnie rozpatrywany wyłącznie jako proces logistyczny, lecz jako element systemu bezpieczeństwa państwa, którego sprawność wpływa na zdolność reagowania w sytuacjach kryzysowych i konfliktach zbrojnych [Komisja Europejska 2022; NATO 2023].

Transport intermodalny odgrywa w tym systemie szczególną rolę. Łączy zalety transportu drogowego, kolejowego i morskiego, umożliwiając efektywne przemieszczanie ładunków przy ograniczeniu liczby operacji manipulacyjnych. Jednocześnie wieloetapowy charakter procesu powoduje wzrost złożoności organizacyjnej oraz zwiększa liczbę potencjalnych punktów krytycznych, w których mogą wystąpić zagrożenia dla bezpieczeństwa ludzi, infrastruktury i środowiska. Każda zmiana gałęzi transportu oznacza konieczność zachowania ciągłości procedur bezpieczeństwa, właściwego przepływu informacji oraz skutecznej koordynacji działań pomiędzy uczestnikami procesu logistycznego.

W literaturze przedmiotu podkreśla się, że bezpieczeństwo przewozu materiałów niebezpiecznych stanowi rezultat oddziaływania wielu współzależnych czynników technicznych, organizacyjnych, prawnych i ludzkich, których znaczenie ujawnia się na każdym etapie łańcucha dostaw [Chmieliński 2020]. W odniesieniu do materiałów wybuchowych i amunicji zależności te nabierają szczególnego znaczenia ze względu na możliwość wystąpienia zdarzeń o charakterze katastroficznym oraz potencjalne konsekwencje dla bezpieczeństwa publicznego i funkcjonowania infrastruktury krytycznej. Jednocześnie rozwój cyfrowych systemów zarządzania transportem, technologii telematycznych oraz narzędzi monitorowania w czasie rzeczywistym powoduje, że klasyczne podejście do bezpieczeństwa przewozów jest stopniowo zastępowane koncepcją zintegrowanego zarządzania ryzykiem obejmującą cały cykl życia procesu logistycznego [UNECE 2025].

Współczesne podejście do bezpieczeństwa transportu obejmuje również bezpieczeństwo całych łańcuchów dostaw. W tym kontekście transport stanowi jeden z kluczowych elementów wpływających na ciągłość i niezawodność dostaw. Jak podkreśla Szymańska [2017], stabilność łańcuchów dostaw zależy od efektywnej organizacji procesów logistycznych oraz zdolności do reagowania na zakłócenia. Bezpieczeństwo w tym ujęciu obejmuje zarówno aspekty fizyczne (np. ochrona ładunków), jak i organizacyjne (np. zarządzanie informacją).

Dotychczasowe badania koncentrowały się przede wszystkim na wymaganiach wynikających z przepisów ADR, RID oraz IMDG Code, analizie zagrożeń technicznych albo organizacji przewozów z wykorzystaniem poszczególnych gałęzi transportu. Jak wskazuje Mindur [2018], rozwój transportu intermodalnego stanowi odpowiedź na rosnące potrzeby rynku oraz konieczność zwiększenia efektywności i bezpieczeństwa systemów transportowych.

Zdecydowanie rzadziej podejmowano próby kompleksowej identyfikacji oraz oceny determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych z uwzględnieniem ich wzajemnych relacji oraz wpływu na odporność systemu bezpieczeństwa państwa. W literaturze nadal widoczna jest luka badawcza dotycząca systemowego ujęcia logistycznych i organizacyjnych uwarunkowań bezpieczeństwa przewozów realizowanych w złożonych łańcuchach intermodalnych, obejmujących jednocześnie transport drogowy, kolejowy i morski. Uwzględniając wskazaną lukę badawczą, za cel

badan przyjęto identyfikację, systematyzację i ocenę logistycznych oraz organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji oraz określenie ich znaczenia dla odporności systemu bezpieczeństwa państwa i zdolności operacyjnych. Przyjęto założenie, że bezpieczeństwo transportu intermodalnego ma charakter systemowy i wynika z poziomu integracji rozwiązań logistycznych, organizacyjnych oraz zarządzania ryzykiem, a nie z pojedynczych środków ochrony.

Strukturę artykułu podporządkowano realizacji celu badawczego. Po przedstawieniu dotychczasowego stanu wiedzy omówiono metodykę badań, następnie zaprezentowano wyniki identyfikacji i oceny determinant bezpieczeństwa, poddano je dyskusji w odniesieniu do aktualnych ustaleń literatury oraz sformułowano rekomendacje dla praktyki zarządzania bezpieczeństwem transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji.

Przegląd literatury

Problematyka bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji stanowi przedmiot badań prowadzonych równoległe w obszarze nauk o bezpieczeństwie, logistyki, inżynierii transportu oraz zarządzania ryzykiem. W ostatnich latach obserwuje się wyraźną zmianę podejścia badawczego – od analiz koncentrujących się głównie na zgodności z wymaganiami regulacyjnymi do badań traktujących bezpieczeństwo jako właściwość złożonych systemów społeczno-technicznych, których funkcjonowanie zależy od wzajemnych relacji pomiędzy infrastrukturą, organizacją, technologią oraz czynnikiem ludzkim. Tendencja ta jest widoczna zarówno w literaturze naukowej, jak i publikacjach NATO dotyczących odporności infrastruktury krytycznej i mobilności wojskowej, co jest bezpośrednio związane z dynamicznymi zmianami środowiska bezpieczeństwa międzynarodowego [Komisja Europejska 2022; NATO 2023].

Jednym z dominujących kierunków badań pozostaje analiza regulacji prawnych dotyczących przewozu materiałów niebezpiecznych. Podstawę funkcjonowania systemu bezpieczeństwa tworzą umowy ADR i RID oraz Międzynarodowy Kodeks Ładunków Niebezpiecznych – IMDG Code, które ustanawiają jednolite wymagania dotyczące klasyfikacji materiałów, pakowania, oznakowania, dokumentacji przewozowej i organizacji transportu [ADR 2025; IMDG 2024; RID 2025]. Autorzy zajmujący się problematyką transportu podkreślają jednak, że zgodność z wymaganiami formalnoprawnymi nie jest wystarczającym warunkiem zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa. O jego skuteczności decyduje sposób implementacji przepisów w praktyce organizacyjnej oraz poziom współpracy pomiędzy uczestnikami procesu logistycznego [Załęski i in. 2018].

W przypadku materiałów wybuchowych i amunicji transport intermodalny ma szczególnie złożony charakter pod względem organizacji i bezpieczeństwa. Specyfika tych przewozów wynika zarówno z właściwości fizykochemicznych materiałów klasy 1, jak i z wysokiego poziomu ryzyka wystąpienia zdarzeń o charakterze katastroficznym. Proces transportowy obejmuje bowiem nie tylko sam przewóz, lecz również magazynowanie, przeładunek, czasowe składowanie, kontrolę dokumentacji oraz nadzór nad bezpieczeństwem na każdym etapie łańcucha logistycznego [Szymańska 2017].

W klasycznych opracowaniach dotyczących transportu materiałów wybuchowych i amunicji dominowały zagadnienia związane z modelowaniem ryzyka, wyznaczaniem bezpiecznych tras przewozu oraz minimalizacją skutków awarii. Rozwijane modele opierały się przede wszystkim na analizie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych oraz ocenie ich potencjalnych konsekwencji dla ludzi, środowiska i infrastruktury. Współczesne systemy logistyczne wykorzystują rozwiązania telematyczne umożliwiające bieżące śledzenie jednostek transportowych, kontrolę parametrów środowiskowych oraz szybką reakcję w przypadku wystąpienia zagrożenia. Szczegółne znaczenie mają również procedury awaryjne określające sposób postępowania w sytuacjach kryzysowych, takich jak pożar, uszkodzenie kontenera, wyciek substancji niebezpiecznych lub zagrożenie terrorystyczne [Adamski 2025].

Współczesne badania pokazują jednak, że takie podejście jest niewystarczające, ponieważ nie uwzględnia dynamicznego charakteru zagrożeń, współzależności pomiędzy uczestnikami procesu transportowego ani wpływu zakłóceń organizacyjnych na funkcjonowanie całego systemu logistycznego. Znaczący nurt badań dotyczy organizacji transportu intermodalnego jako systemu integrującego różne gałęzie transportu. Efektywność transportu intermodalnego wynika z właściwego powiązania infrastruktury liniowej i punktowej, standaryzacji jednostek ładunkowych oraz koordynacji procesów logistycznych. Podobne stanowisko prezentuje Mindur [2018], podkreślając, że rozwój transportu intermodalnego wymaga nie tylko inwestycji infrastrukturalnych, lecz również integracji organizacyjnej oraz harmonizacji procedur bezpieczeństwa. W odniesieniu do materiałów wybuchowych znaczenie tych czynników dodatkowo wzrasta, ponieważ każda operacja przeładunkowa zwiększa poziom ryzyka operacyjnego.

W literaturze dotyczącej bezpieczeństwa transportu coraz częściej eksponowane jest podejście systemowe. Zgodnie z nim poziom bezpieczeństwa nie jest sumą właściwości poszczególnych elementów procesu transportowego, lecz rezultatem ich wzajemnych relacji oraz zdolności całego systemu do przeciwdziałania zakłóceniom [Wiśniewski 2015].

Podejście to pozostaje zbieżne z koncepcją odporności systemów logistycznych, rozwijaną w badaniach prowadzonych przez Komisję Europejską oraz NATO, w ramach której podkreśla się znaczenie elastyczności organizacyjnej, ciągłości działania i zdolności do szybkiej odbudowy procesów logistycznych po wystąpieniu incydentów [Komisja Europejska 2022; NATO 2023].

Coraz częściej wykorzystywane są modele wielokryterialne, programowanie dwupoziomowe, metody optymalizacji odporności oraz algorytmy wspomagające podejmowanie decyzji logistycznych. Badania te wykazują, że bezpieczeństwo transportu materiałów niebezpiecznych zależy nie tylko od wyboru środka transportu, lecz przede wszystkim od jakości integracji całego łańcucha logistycznego, obejmującego planowanie tras, organizację przeładunków, zarządzanie terminalami oraz bieżący monitoring przewozów. Jednocześnie coraz większego znaczenia nabierają badania nad odpornością (resilience) systemów logistycznych.

W literaturze podkreśla się, że współczesne systemy transportowe powinny być projektowane z myślą nie tylko o minimalizacji ryzyka, ale również o zdolności do utrzymania ciągłości działania w warunkach zakłóceń oraz szybkiego odtwarzania sprawności operacyjnej po wystąpieniu incydentów. Coraz większą uwagę poświęca

się również zarządzaniu ryzykiem jako podstawowemu instrumentowi zapewniania bezpieczeństwa przewozów materiałów niebezpiecznych. Europejska Komisja Gospodarcza ONZ (UNECE) wskazuje, że skuteczny system zarządzania ryzykiem powinien obejmować identyfikację zagrożeń, ocenę ich prawdopodobieństwa i skutków, monitorowanie ryzyka oraz wdrażanie działań ograniczających jego poziom [UNECE 2025]. W praktyce transportowej wykorzystywane są metody jakościowe i ilościowe, takie jak FMEA, bow-tie analysis, analiza scenariuszowa czy analiza krytycznych punktów procesu logistycznego. Rozwiązania te znajdują zastosowanie zwłaszcza w przewozach materiałów klasy 1, gdzie nawet pojedyncze błędy organizacyjne mogą prowadzić do zdarzeń o charakterze katastroficznym.

Istotnym nurtem współczesnych badań jest również integracja zagadnień safety i security. O ile wcześniejsze opracowania koncentrowały się głównie na zagrożeniach wynikających z awarii technicznych lub błędów eksploatacyjnych, o tyle najnowsze badania wskazują na konieczność uwzględnienia zagrożeń intencjonalnych, takich jak sabotaż, terroryzm czy cyberataki. Podkreśla się szczególnie potrzebę prowadzenia zintegrowanej oceny ryzyka, obejmującej jednocześnie bezpieczeństwo operacyjne oraz ochronę przed celowym oddziaływaniem na system transportowy.

Analiza literatury wskazuje również, że mimo znacznego dorobku badawczego dominują opracowania koncentrujące się na wybranych aspektach bezpieczeństwa – najczęściej regulacyjnych, technicznych lub infrastrukturalnych. Znacznie rzadziej podejmowane są badania integrujące logistyczne i organizacyjne determinanty bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych oraz oceniające ich znaczenie z perspektywy odporności systemu bezpieczeństwa państwa.

Coraz częściej analizowany jest także wpływ transformacji cyfrowej na bezpieczeństwo transportu materiałów niebezpiecznych. Rozwój systemów telematycznych, internetu rzeczy (IoT), sztucznej inteligencji, cyfrowych bliźniaków oraz technologii blockchain umożliwia monitorowanie przesyłek w czasie rzeczywistym, prognozowanie zagrożeń oraz wspomaganie decyzji logistycznych. Jednocześnie cyfryzacja zwiększa podatność systemów transportowych na zagrożenia cybernetyczne, co powoduje konieczność integrowania klasycznych metod zarządzania ryzykiem z rozwiązaniami z zakresu cyberbezpieczeństwa.

W badaniach dotyczących transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji szczególne miejsce zajmuje problem organizacji operacji przeładunkowych. Bezpieczeństwo transportu materiałów wybuchowych zależy również od jakości infrastruktury logistycznej oraz poziomu technicznego wykorzystywanych środków transportu. Terminale intermodalne, centra logistyczne oraz porty przeładunkowe powinny spełniać wymagania dotyczące ochrony fizycznej, kontroli dostępu, monitoringu oraz zabezpieczeń przeciwpożarowych [Chmieliński 2019]. Najnowsze opracowania wskazują, że terminale intermodalne są krytycznymi elementami całego procesu transportowego, ponieważ właśnie w nich kumulują się zagrożenia wynikające z jednoczesnego oddziaływania czynników technicznych, organizacyjnych oraz ludzkich. W konsekwencji coraz większą uwagę poświęca się projektowaniu procedur minimalizujących liczbę operacji manipulacyjnych, zwiększających automatyzację przeładunku oraz poprawiających interoperacyjność pomiędzy różnymi gałęziami transportu.

Analiza dorobku naukowego wskazuje jednak na utrzymywanie się kilku istotnych luk badawczych. Po pierwsze, zdecydowana większość publikacji dotyczy transportu drogowego lub kolejowego analizowanego oddzielnie, natomiast stosunkowo niewiele opracowań odnosi się do bezpieczeństwa całych intermodalnych łańcuchów transportowych. Po drugie, badania koncentrują się głównie na modelach ilościowej oceny ryzyka, znacznie rzadziej uwzględniając organizacyjne determinanty bezpieczeństwa, współpracę międzyinstytucjonalną oraz wpływ kompetencji personelu. Po trzecie, w literaturze nadal niewystarczająco rozwinięte są badania dotyczące transportu materiałów wybuchowych i amunicji jako szczególnej kategorii materiałów klasy 1, której znaczenie wzrosło w związku z rozwojem mobilności wojskowej oraz zmianami środowiska bezpieczeństwa w Europie.

Zidentyfikowane luki badawcze uzasadniają potrzebę przeprowadzenia badań przedstawionych w niniejszym artykule. Ich celem jest nie tylko identyfikacja logistycznych i organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji, lecz również ich systematyzacja i ocena z perspektywy odporności systemu bezpieczeństwa państwa. Przyjęte podejście rozszerza dotychczasowy stan wiedzy poprzez integrację zagadnień dotyczących logistyki, zarządzania ryzykiem, odporności systemów transportowych oraz bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej w ramach jednego modelu analitycznego.

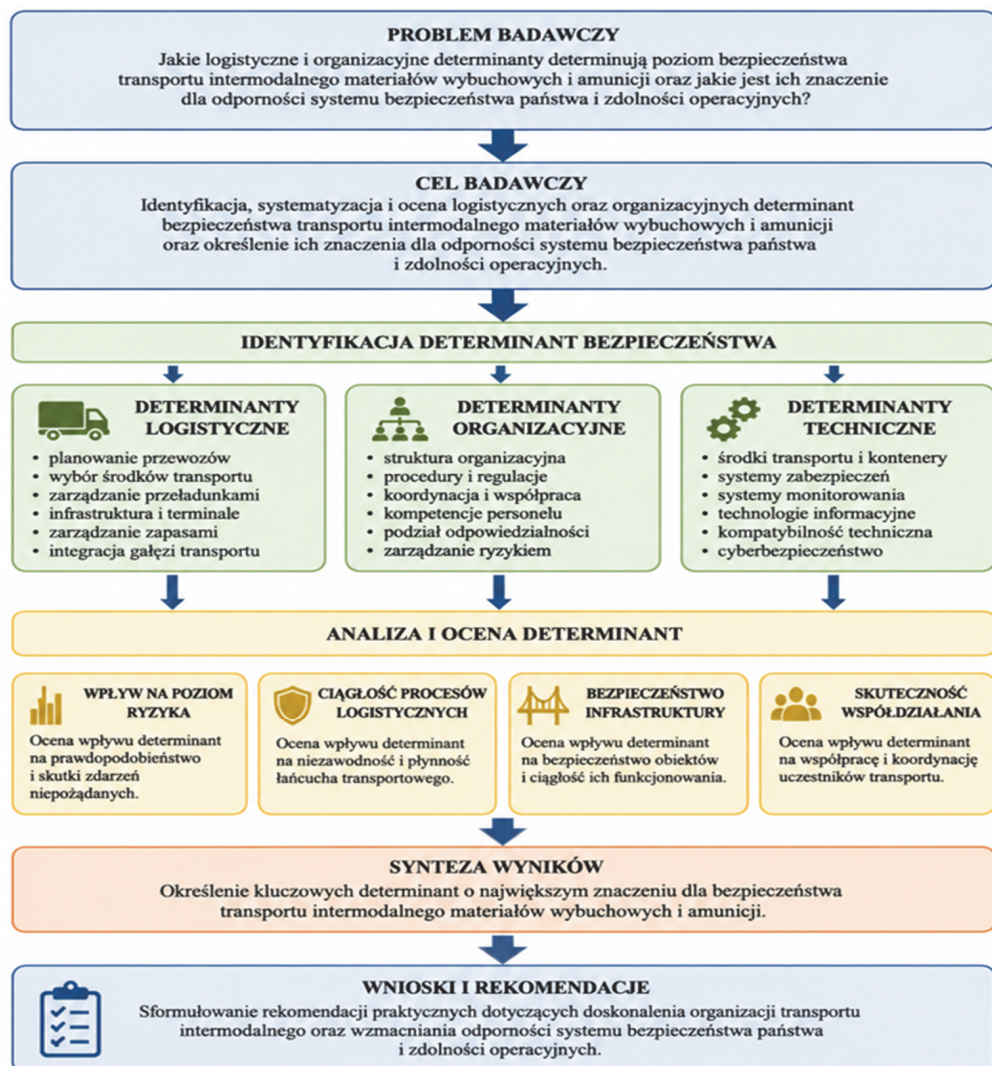
Metodyka badań

Realizacja przyjętego celu badawczego wymagała opracowania uporządkowanej procedury postępowania badawczego, obejmującej kolejne etapy identyfikacji, analizy oraz oceny determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji. Schemat postępowania badawczego przedstawiono na rysunku 1.

Proces badawczy rozpoczął się od sformułowania problemu badawczego dotyczącego identyfikacji czynników wpływających na bezpieczeństwo transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji. Na kolejnym etapie dokonano identyfikacji podstawowych grup determinant bezpieczeństwa, obejmujących determinanty logistyczne, organizacyjne oraz techniczne. Następnie przeprowadzono ich analizę i ocenę z wykorzystaniem przyjętych kryteriów badawczych, obejmujących wpływ determinant na poziom ryzyka transportowego, ciągłość procesów logistycznych oraz odporność systemu bezpieczeństwa transportowego. Wyniki przeprowadzonej analizy stanowiły podstawę do sformułowania wniosków oraz rekomendacji dotyczących doskonalenia organizacji transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji.

Przedmiotem badań były logistyczne i organizacyjne determinanty bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji realizowanego z wykorzystaniem transportu drogowego, kolejowego i morskigo.

Zakres badań obejmował identyfikację czynników wpływających na bezpieczeństwo przewozu materiałów klasy 1 zgodnie z wymaganiami umów ADR i RID oraz Międzynarodowego Kodeksu IMDG, a także ocenę ich znaczenia dla zapewnienia ciągłości procesów logistycznych oraz odporności systemu bezpieczeństwa państwa.



Rysunek 1. Schemat zastosowanego postępowania badawczego

Figure 1. Schematic diagram of the research procedure used

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Analizie poddano zarówno uwarunkowania wynikające z obowiązujących regulacji prawnych, jak i rozwiązania organizacyjne oraz logistyczne stosowane podczas planowania, realizacji i nadzorowania transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji. Uwzględniono również współczesne zagrożenia wpływające na bezpieczeństwo przewozów, w tym zagrożenia techniczne, organizacyjne, terrorystyczne i cybernetyczne.

Punktem wyjścia był następujący problem badawczy: jakie logistyczne i organizacyjne determinanty w największym stopniu wpływają na bezpieczeństwo transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji oraz odporność systemu bezpieczeństwa państwa?

W celu rozwiązania problemu sformułowano trzy pytania badawcze:

1. Które determinanty logistyczne mają największy wpływ na poziom bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji?
2. Jakie determinanty organizacyjne decydują o skuteczności funkcjonowania systemu bezpieczeństwa transportu materiałów klasy 1?
3. W jaki sposób integracja rozwiązań logistycznych i organizacyjnych wpływa na odporność systemu bezpieczeństwa państwa?

Badania miały charakter jakościowy i zostały przeprowadzone z wykorzystaniem komplementarnych metod badawczych właściwych dla nauk o bezpieczeństwie oraz logistyki. Podstawową metodą była krytyczna analiza literatury przedmiotu, obejmująca krajowe i zagraniczne publikacje naukowe dotyczące bezpieczeństwa transportu, logistyki wojskowej, zarządzania ryzykiem oraz odporności systemów logistycznych [Komisja Europejska 2022].

Drugą metodę stanowiła analiza dokumentów normatywnych, obejmująca obowiązujące akty prawne i regulacje międzynarodowe dotyczące przewozu materiałów niebezpiecznych, w szczególności [ADR 2025], [RID 2025], IMDG Code [IMDG 2024], ustawę o przewozie towarów niebezpiecznych [Ustawa z dnia 19 sierpnia 2011 r.] oraz wytyczne UNECE [2025]. Zastosowano również analizę systemową, umożliwiającą identyfikację relacji zachodzących pomiędzy elementami systemu transportowego oraz ocenę ich wpływu na bezpieczeństwo całego procesu logistycznego. Podejście systemowe pozwala analizować transport jako zbiór wzajemnie powiązanych elementów organizacyjnych, technicznych i informacyjnych [Wiśniewski 2015]. Uzupełnieniem badań była analiza porównawcza, wykorzystana do oceny wymagań obowiązujących w transporcie drogowym, kolejowym i morskim oraz identyfikacji wspólnych i odmiennych determinant bezpieczeństwa.

Materiał badawczy obejmował:

- publikacje naukowe z lat 2018–2026,
- międzynarodowe regulacje ADR, RID oraz IMDG Code,
- dokumenty Komisji Europejskiej dotyczące programu Military Mobility,
- wytyczne UNECE dotyczące zarządzania ryzykiem w transporcie towarów niebezpiecznych,
- opracowania dotyczące ochrony infrastruktury krytycznej oraz logistyki wojskowej.

Dobór materiału badawczego miał charakter celowy i wieloetapowy, zgodnie z założeniami jakościowych badań analitycznych prowadzonych w naukach o bezpieczeństwie (tab. 1). Przyjęto założenie, że wiarygodność wyników wymaga wykorzystania zróżnicowanych źródeł informacji, reprezentujących zarówno dorobek naukowy, jak i obowiązujące regulacje prawne oraz dokumenty strategiczne odnoszące się do funkcjonowania współczesnych systemów transportowych.

Proces doboru materiału badawczego obejmował trzy zasadnicze etapy. Na pierwszym etapie dokonano identyfikacji literatury naukowej dotyczącej bezpieczeństwa transportu materiałów niebezpiecznych, logistyki intermodalnej, zarządzania ryzykiem,

odporności systemów logistycznych oraz mobilności wojskowej. Szczególną uwagę poświęcono publikacjom wydanym w latach 2018–2026, co pozwoliło uwzględnić najnowszy stan wiedzy oraz zmiany wynikające z aktualnej sytuacji geopolitycznej i rozwoju europejskiej polityki bezpieczeństwa. Starsze opracowania wykorzystano wyłącznie wówczas, gdy miały charakter fundamentalny dla rozwoju teorii transportu intermodalnego, logistyki lub zarządzania bezpieczeństwem.

Tabela 1. Procedura doboru źródeł danych i informacji

Table 1. Procedure for selecting data and information sources

Kategoria źródeł	Zakres analizy	Kryteria doboru	Cel wykorzystania
Monografie naukowe	logistyka, bezpieczeństwo, zarządzanie ryzykiem	recenzowane, wysoka cytowalność	identyfikacja podstaw teoretycznych
Artykuły naukowe	2018–2026	czasopisma recenzowane (np. <i>Safety Science</i> , <i>Transportation Research Part E</i> , <i>Journal of Transportation Security</i>)	identyfikacja aktualnego stanu badań i luki badawczej
Dokumenty prawne	ADR, RID, IMDG Code, ustawy	aktualnie obowiązujące	analiza wymagań formalnoprawnych
Dokumenty strategiczne	NATO, Komisja Europejska, UNECE	oficjalne dokumenty	ocena kierunków rozwoju systemów bezpieczeństwa
Normy międzynarodowe	ISO 31000, ISO 28000	aktualne wydania	analiza zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwem łańcucha dostaw

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Na drugim etapie analizie poddano akty normatywne oraz dokumenty regulacyjne, które stanowią podstawę organizacji przewozu materiałów wybuchowych i amunicji. Obejmowały one przede wszystkim Umowę europejską dotyczącą międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych [ADR 2025], Regulamin międzynarodowego przewozu kolejami towarów niebezpiecznych [RID 2025], Międzynarodowy Kodeks Ładunków Niebezpiecznych [IMDG Code 2024], ustawę o przewozie towarów niebezpiecznych [Ustawa z dnia 19 sierpnia 2011 r.] oraz wybrane akty wykonawcze regulujące funkcjonowanie transportu intermodalnego i ochronę infrastruktury krytycznej. Włączenie dokumentów normatywnych umożliwiło odniesienie wyników badań do aktualnych wymagań prawnych obowiązujących w transporcie drogowym, kolejowym i morskim.

Trzeci etap obejmował analizę dokumentów strategicznych i raportów organizacji międzynarodowych, których działalność wyznacza kierunki rozwoju bezpieczeństwa transportu oraz odporności infrastruktury logistycznej. Wykorzystano dokumenty Komisji Europejskiej dotyczące rozwoju Transeuropejskiej Sieci Transportowej (TEN-T), programu Military Mobility, ochrony infrastruktury krytycznej oraz budowania odporności systemów transportowych. Uwzględniono również opracowania NATO dotyczące mobilności wojskowej, logistyki oraz odporności infrastruktury transportowej,

wytyczne UNECE odnoszące się do przewozu towarów niebezpiecznych, a także normy międzynarodowe z zakresu zarządzania ryzykiem i bezpieczeństwa łańcuchów dostaw, w szczególności ISO 31000 [ISO 2018] oraz ISO 28000 [ISO 2022]. Dobór publikacji naukowych prowadzono z zastosowaniem następujących kryteriów kwalifikacyjnych:

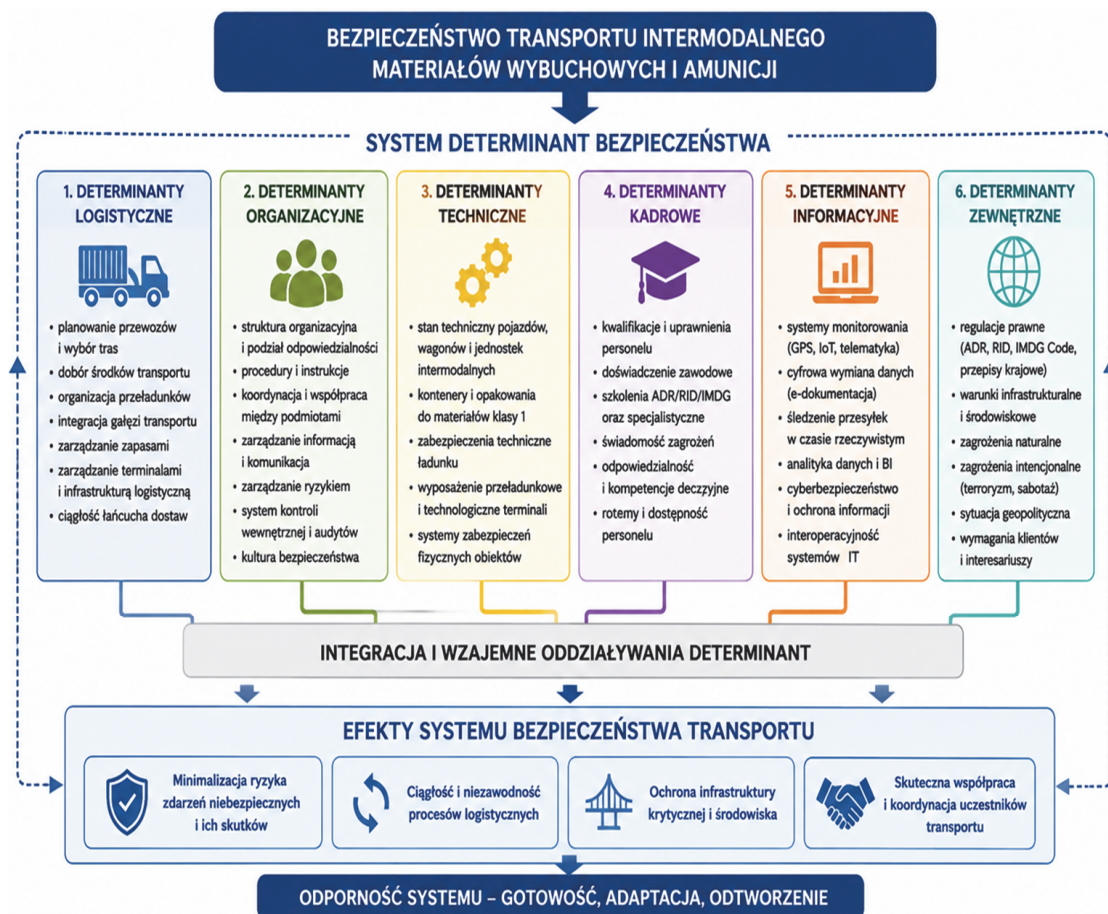
- zgodność tematyczna z problematyką bezpieczeństwa transportu intermodalnego, logistyki materiałów wybuchowych i amunicji oraz zarządzania ryzykiem;
- aktualność publikacji, ze szczególnym uwzględnieniem opracowań opublikowanych w ostatnich 5–7 latach;
- recenzowany charakter źródła, obejmujący monografie naukowe, artykuły indeksowane w uznanych bazach bibliograficznych oraz oficjalne raporty instytucji międzynarodowych;
- możliwość wykorzystania publikacji do identyfikacji, porównania i oceny determinant bezpieczeństwa transportu materiałów klasy I.

Świadomie zrezygnowano z wykorzystania publikacji o charakterze popularyzatorskim, materiałów prasowych, opracowań pozbawionych procedury recenzyjnej oraz źródeł niespełniających kryteriów wiarygodności naukowej. Pozwoliło to ograniczyć ryzyko wykorzystania informacji o niezweryfikowanej jakości oraz zwiększyć rzetelność prowadzonych analiz. Zastosowanie zróżnicowanych kategorii źródeł umożliwiło przeprowadzenie triangulacji materiału badawczego, polegającej na wzajemnym porównaniu ustaleń wynikających z literatury naukowej, obowiązujących regulacji prawnych i dokumentów strategicznych. Takie podejście zwiększyło wiarygodność uzyskanych wyników oraz pozwoliło ograniczyć wpływ ograniczeń charakterystycznych dla pojedynczych źródeł informacji. Umożliwiło to kompleksową identyfikację logistycznych i organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji, uwzględniającą zarówno perspektywę naukową, jak i praktykę funkcjonowania współczesnych systemów transportowych. Przyjęta procedura doboru źródeł zapewniła spójność materiału badawczego z celem pracy oraz umożliwiła przeprowadzenie analizy zgodnej z wymaganiami badań jakościowych stosowanych w naukach o bezpieczeństwie i logistyce. Dzięki temu sformułowane wnioski oparto na zweryfikowanym, aktualnym i wieloaspektowym materiale źródłowym, co zwiększa ich wartość poznawczą i aplikacyjną.

Wyniki badań

W centrum modelu znajduje się bezpieczeństwo procesu transportowego, na które oddziałuje pięć wzajemnie powiązanych grup determinant: logistyczne, organizacyjne, technologiczne, kadrowe i informacyjne (rys. 2). Do determinant logistycznych zaliczono planowanie tras, organizację przeładunków oraz integrację gałęzi transportu. Determinanty organizacyjne obejmują procedury, koordynację działań i podział odpowiedzialności pomiędzy uczestnikami procesu transportowego. Determinanty technologiczne odnoszą się do infrastruktury, kontenerów i terminali przeładunkowych, natomiast determinanty kadrowe obejmują szkolenia ADR/RID/IMDG oraz doświadczenie personelu. Ostatnią grupę stanowią determinanty informacyjne związane z monitoringiem GPS, technologiami IoT i wymianą danych.

Przeprowadzona analiza umożliwiła identyfikację oraz systematyzację determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji. Uzyskane wyniki wskazują, że bezpieczeństwo przewozów materiałów klasy 1 jest rezultatem współdziaływania czynników logistycznych, organizacyjnych, technicznych oraz informacyjnych. Żaden z analizowanych elementów nie zapewnia samodzielnie wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Dopiero ich wzajemna integracja tworzy spójny system ograniczający ryzyko wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych.



Rysunek 2. System logistycznych i organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji

Figure 2. System of logistical and organizational determinants of the security of intermodal transport of explosives and ammunition

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Analiza wykazała, że największy wpływ na bezpieczeństwo transportu mają determinanty logistyczne związane z organizacją całego łańcucha dostaw. Szczególnie istotne znaczenie mają: właściwe planowanie tras przewozu, ograniczenie liczby operacji przeładunkowych, dobór odpowiednich środków transportu oraz zapewnienie ciągłości monitorowania jednostek transportowych. Każda dodatkowa operacja przeładunkowa zwiększa liczbę potencjalnych punktów krytycznych procesu i prawdopodobieństwo wystąpienia błędów organizacyjnych lub uszkodzeń jednostki ładunkowej, co pozostaje zgodne z ustaleniami m.in. UNECE [2025].

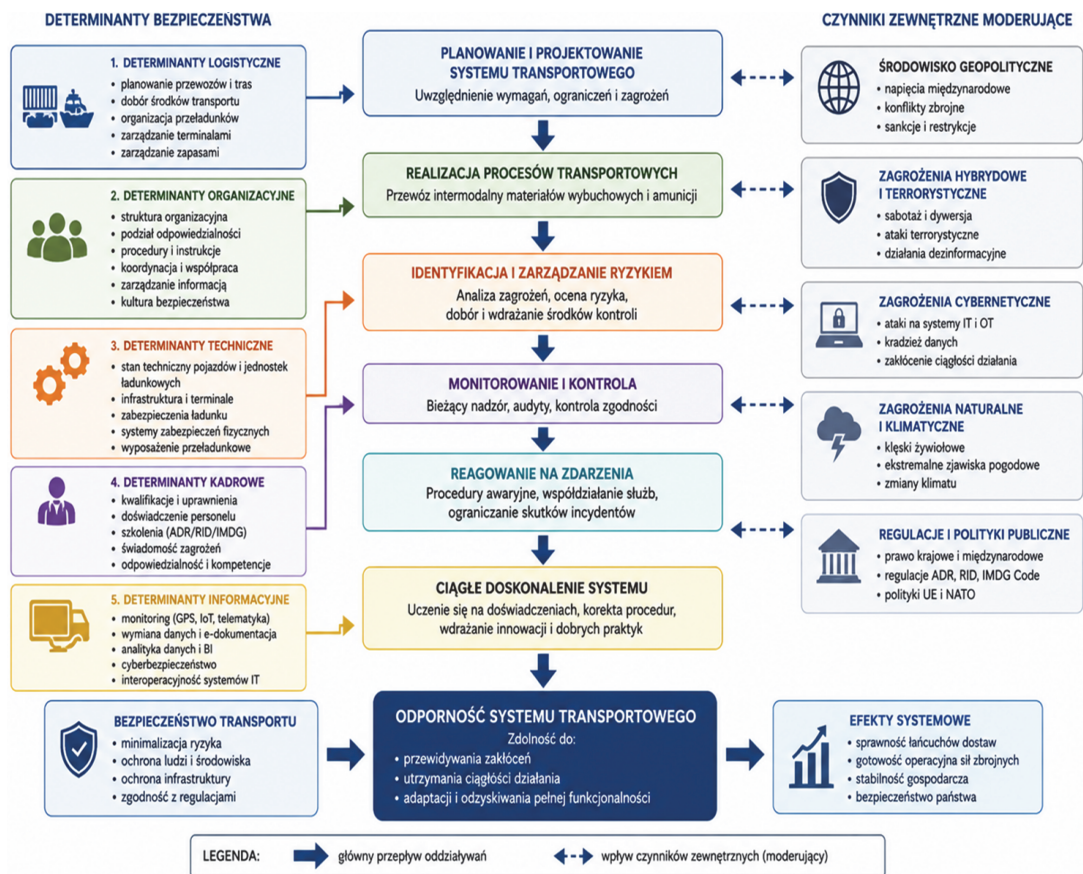
Drugą grupę determinant stanowią uwarunkowania organizacyjne. Badania wykazały, że skuteczność systemu bezpieczeństwa zależy przede wszystkim od jednoznacznego podziału odpowiedzialności pomiędzy uczestnikami procesu transportowego, jakości procedur operacyjnych oraz sprawności wymiany informacji. Szczególnie istotnym elementem pozostaje koordynacja działań pomiędzy przewoźnikami, operatorami terminali, administracją publiczną, służbami bezpieczeństwa i podmiotami wojskowymi. Brak interoperacyjności procedur zwiększa podatność systemu na zakłócenia oraz wydłuża czas reakcji na sytuacje kryzysowe. Istotnym wynikiem badań było również potwierdzenie rosnącego znaczenia czynnika ludzkiego.

Z analizy wynika, że znaczna część zdarzeń niebezpiecznych, do których dochodzi w trakcie transportu materiałów niebezpiecznych, ma źródło nie w awariach technicznych, lecz w błędach organizacyjnych, niewłaściwej interpretacji przepisów, niepełnym przygotowaniu personelu lub nieskutecznej komunikacji pomiędzy uczestnikami procesu transportowego [Załęski i in. 2018]. Oznacza to, że rozwój kompetencji personelu powinien być traktowany jako jeden z podstawowych elementów systemu zarządzania bezpieczeństwem.

Przeprowadzona analiza wykazała, że poszczególne grupy determinant nie oddziałują na bezpieczeństwo transportu w sposób niezależny. Tworzą one układ wzajemnych zależności, w którym skuteczność procesów logistycznych jest uwarunkowana jakością organizacji, efektywnością zarządzania ryzykiem oraz zdolnością systemu do adaptacji w warunkach zakłóceń. Na rysunku 3 przedstawiono model zależności pomiędzy głównymi determinantami bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji.

Model zakłada, że determinanty logistyczne stanowią podstawę organizacji procesu transportowego, wpływając na planowanie przewozów, wybór środków transportu oraz organizację operacji przeładunkowych. Efektywność rozwiązań logistycznych jest następnie wzmacniana przez determinanty organizacyjne, obejmujące procedury, koordynację działań i podział odpowiedzialności pomiędzy uczestnikami procesu transportowego. Połączenie obu grup determinant tworzy podstawę skutecznego zarządzania ryzykiem, którego celem jest ograniczanie prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń niebezpiecznych oraz minimalizacja ich potencjalnych skutków. Skuteczne zarządzanie ryzykiem przekłada się bezpośrednio na wzrost poziomu bezpieczeństwa procesu transportowego, rozumianego jako zdolność systemu do realizacji przewozów materiałów wybuchowych i amunicji zgodnie z obowiązującymi wymaganiami bezpieczeństwa, ochrony oraz niezawodności.

Model uwzględnia również wpływ czynników wspomagających, takich jak kompetencje personelu, rozwój systemów cyfrowych, monitoring transportu oraz rozwiązania z zakresu cyberbezpieczeństwa. Czynniki te oddziałują na wszystkie etapy procesu, zwiększając zdolność systemu do zapobiegania zagrożeniom, wczesnego wykrywania nieprawidłowości i skutecznego reagowania na sytuacje kryzysowe.



Rysunek 3. Oddziaływanie determinant bezpieczeństwa na odporność systemu transportowego

Figure 3. Impact of security determinants on the resilience of the transportation system

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Końcowym efektem współdziałania wszystkich determinant jest wzrost odporności systemu transportowego, rozumianej jako zdolność do utrzymania ciągłości realizacji przewozów, ograniczania skutków zakłóceń oraz szybkiego odtwarzania pełnej sprawności operacyjnej po wystąpieniu incydentów. W ujęciu strategicznym odporność transportu intermodalnego materiałów wybuchowych stanowi jeden z istotnych elementów budowania odporności państwa oraz zapewnienia ciągłości funkcjonowania systemu bezpieczeństwa i obronności. Analiza wykazała ponadto wyraźny wzrost znaczenia technologii cyfrowych.

Systemy telematyczne, monitoring GPS, rozwiązania internetu rzeczy oraz elektro-niczna wymiana danych zwiększają przejrzystość procesu transportowego, umożliwiając wcześniejsze wykrywanie nieprawidłowości i wspierają podejmowanie decyzji w sytuacjach zagrożenia. Jednocześnie postępująca cyfryzacja powoduje wzrost podatności systemów logistycznych na zagrożenia cybernetyczne, co wymaga rozszerzenia klasycz-

nych procedur bezpieczeństwa o mechanizmy cyberochrony. Na podstawie przeprowadzonej analizy uporządkowano determinanty bezpieczeństwa według ich znaczenia dla funkcjonowania systemu transportowego (tab. 2).

Tabela 2. Zidentyfikowane determinanty bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji

Table 2. Identified determinants of security in the intermodal transport of explosives and ammunition

Determinanty	Przykładowe elementy	Znaczenie
Logistyczne	planowanie tras, ograniczenie przeładunków, dobór środków transportu, monitoring przesyłek	bardzo wysokie
Organizacyjne	procedury, podział odpowiedzialności, koordynacja instytucji, zarządzanie informacją	bardzo wysokie
Techniczne	infrastruktura terminali, środki transportu, zabezpieczenie kontenerów, urządzenia przeładunkowe	wysokie
Kadrowe	kwalifikacje personelu, szkolenia ADR/RID/IMDG, doświadczenie operatorów	bardzo wysokie
Informacyjne	cyfrowe systemy zarządzania, telematyka, cyberbezpieczeństwo	wysokie

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Uzyskane wyniki wskazują, że determinanty logistyczne i organizacyjne wzajemnie się uzupełniają, tworząc system bezpieczeństwa o charakterze sieciowym. O poziomie bezpieczeństwa decyduje nie pojedynczy środek ochrony, lecz zdolność całego systemu do skutecznej koordynacji działań, wymiany informacji oraz adaptacji do zmieniających się zagrożeń. Wyniki te stanowią podstawę do dalszej dyskusji dotyczącej kierunków doskonalenia bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji.

Dyskusja

Przeprowadzona analiza wykazała, że bezpieczeństwo transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji jest determinowane przez wzajemnie powiązane czynniki logistyczne, organizacyjne, techniczne i informacyjne. Uzyskane wyniki są zgodne z dominującym nurtem współczesnych badań nad bezpieczeństwem systemów transportowych, zakładającym, że poziom bezpieczeństwa nie jest rezultatem pojedynczych zabezpieczeń technicznych, lecz efektem funkcjonowania złożonego systemu organizacyjnego obejmującego ludzi, infrastrukturę, technologie i procedury zarządzania ryzykiem [Hollnagel 2018; Komisja Europejska 2022].

Pierwszym istotnym rezultatem badań było wskazanie, że największy wpływ na poziom bezpieczeństwa mają determinanty logistyczne związane z planowaniem procesu transportowego, ograniczaniem liczby operacji przeładunkowych oraz właściwym doбором środków transportu.

Wnioski te pozostają zgodne z wynikami badań publikowanych na łamach czasopiśma *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, w których podkreśla się, że efektywność zarządzania ryzykiem w łańcuchach dostaw materiałów niebezpiecznych zależy przede wszystkim od jakości planowania logistycznego oraz zdolności do ograniczania liczby punktów krytycznych procesu transportowego

[Tang 2021; Zhao i in. 2023]. Wskazuje się również, że ograniczenie operacji manipulacyjnych stanowi jeden z podstawowych warunków zwiększania bezpieczeństwa transportu intermodalnego.

Uzyskane wyniki potwierdziły również, że bezpieczeństwo transportu materiałów klasy 1 nie może być rozpatrywane wyłącznie przez pryzmat zgodności z wymaganiami regulacyjnymi. Analiza wykazała, że o skuteczności systemu decyduje stopień integracji procesów logistycznych realizowanych przez różnych uczestników łańcucha dostaw. Wnioski te korespondują z dokumentami Komisji Europejskiej dotyczącymi rozwoju sieci TEN-T oraz programu Military Mobility, w których podkreśla się konieczność budowy interoperacyjnych systemów logistycznych zapewniających jednolite standardy bezpieczeństwa oraz sprawnej wymiany informacji pomiędzy administracją publiczną, operatorami logistycznymi i użytkownikami infrastruktury [Komisja Europejska 2022].

Drugim ważnym rezultatem badań było wykazanie, że determinanty organizacyjne mają znaczenie porównywalne z czynnikami technicznymi. Wyniki wskazują, że jednoznaczny podział odpowiedzialności, standaryzacja procedur oraz skuteczna koordynacja międzyinstytucjonalna wpływają bezpośrednio na odporność systemu transportowego. Zbieżne wnioski przedstawiono w badaniach publikowanych w *Journal of Transportation Security*, gdzie podkreślono, że skuteczność ochrony transportu materiałów wybuchowych i amunicji zależy przede wszystkim od zdolności organizacji do koordynowania działań wielu podmiotów funkcjonujących w środowisku podwyższonego ryzyka. Autorzy zwracają uwagę, że nawet zaawansowane rozwiązania techniczne nie zapewniają oczekiwanego poziomu bezpieczeństwa, jeżeli nie towarzyszą im spójne procedury organizacyjne i efektywny przepływ informacji.

Na szczególną uwagę zasługuje rola czynnika ludzkiego. Przeprowadzona analiza wykazała, że błędy proceduralne, niewystarczające przygotowanie personelu oraz nieefektywna komunikacja należą do najważniejszych źródeł zagrożeń w transporcie materiałów wybuchowych. Wyniki te są zgodne z koncepcją Safety-II rozwijaną przez Hollnagela [2018] i głoszącą, że bezpieczeństwo systemów wysokiego ryzyka zależy przede wszystkim od zdolności organizacji do skutecznej adaptacji do zmieniających się warunków funkcjonowania. W podobnym kierunku zmierzają publikacje czasopisma *Safety Science*, wskazujące, że współczesne zarządzanie bezpieczeństwem powinno koncentrować się nie tylko na analizie przyczyn awarii, lecz również na wzmacnianiu odporności organizacyjnej, kompetencji personelu oraz zdolności systemu do utrzymania sprawności działania mimo występowania zakłóceń.

Uzyskane wyniki potwierdziły również rosnące znaczenie odporności (resilience) systemów logistycznych. W literaturze międzynarodowej odporność definiowana jest jako zdolność systemu do przygotowania się na zakłócenia, utrzymania ciągłości działania oraz szybkiego odtworzenia pełnej funkcjonalności po wystąpieniu incydentu [Linkov i Trump 2019]. W przeprowadzonych badaniach wykazano, że odporność transportu materiałów wybuchowych zależy od integracji procedur bezpieczeństwa, elastyczności organizacyjnej oraz skuteczności współpracy pomiędzy uczestnikami procesu transportowego.

Wnioski te pozostają zgodne z kierunkami rozwoju polityki bezpieczeństwa logistycznego Unii Europejskiej oraz NATO, w których odporność infrastruktury transportowej uznawana jest za jeden z podstawowych filarów bezpieczeństwa zbiorowego [Komisja Europejska 2022; NATO 2023]. Istotnym wynikiem badań było również

wskazanie rosnącej roli technologii cyfrowych w zapewnianiu bezpieczeństwa transportu intermodalnego. Wykorzystanie systemów telematycznych, monitorowania GPS, internetu rzeczy oraz elektronicznej wymiany danych zwiększa możliwości bieżącego nadzorowania przesyłek oraz skraca czas reakcji na sytuacje awaryjne.

Jednocześnie analiza wykazała, że postępująca cyfryzacja powoduje pojawienie się nowych kategorii zagrożeń związanych z cyberbezpieczeństwem. Wyniki te odpowiadają ustaleniom badań publikowanych w *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, wskazującym, że cyfrowa transformacja logistyki wymaga równoczesnego rozwoju systemów cyberochrony oraz procedur zapewniających integralność danych wykorzystywanych w procesach transportowych.

Przeprowadzone badania potwierdziły także potrzebę odejścia od tradycyjnego, sektorowego postrzegania bezpieczeństwa transportu materiałów wybuchowych i amunicji. Współczesne zagrożenia mają charakter wielowymiarowy i obejmują jednocześnie ryzyko techniczne, organizacyjne, terrorystyczne, cybernetyczne oraz geopolityczne. Analogiczne stanowisko przedstawiono w dokumentach NATO dotyczących odporności infrastruktury krytycznej oraz mobilności wojskowej, gdzie podkreśla się konieczność budowy zintegrowanych systemów bezpieczeństwa obejmujących zarówno sektor cywilny, jak i wojskowy [NATO 2023]. Oznacza to, że skuteczne zarządzanie bezpieczeństwem transportu materiałów wybuchowych wymaga rozwijania interoperacyjnych mechanizmów współpracy pomiędzy administracją państwową, operatorami logistycznymi, przedsiębiorstwami transportowymi oraz instytucjami odpowiedzialnymi za bezpieczeństwo narodowe. Wyniki niniejszych badań rozwijają dotychczasowy stan wiedzy poprzez kompleksowe ujęcie logistycznych i organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji.

W przeciwieństwie do wielu wcześniejszych opracowań koncentrujących się na wymaganiach regulacyjnych lub wybranych aspektach technicznych przeprowadzona analiza wskazuje na konieczność traktowania bezpieczeństwa jako właściwości całego systemu logistycznego, wynikającej z integracji infrastruktury, procedur, technologii oraz kompetencji uczestników procesu transportowego. Takie podejście wpisuje się we współczesne koncepcje resilient transport systems oraz integrated risk management, które coraz częściej stanowią podstawę projektowania systemów bezpieczeństwa w europejskich i natowskich łańcuchach logistycznych.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania potwierdziły, że bezpieczeństwo transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji ma charakter systemowy i wynika z wzajemnego oddziaływania determinant logistycznych, organizacyjnych, technicznych oraz informacyjnych. Osiągnięcie wysokiego poziomu bezpieczeństwa nie zależy od pojedynczych środków ochrony, lecz od skuteczności funkcjonowania całego systemu transportowego.

Największy wpływ na poziom bezpieczeństwa mają determinanty logistyczne związane z planowaniem procesu transportowego, ograniczaniem liczby operacji przeładunkowych oraz zapewnieniem ciągłości monitorowania jednostek transportowych.

Równorzędne znaczenie mają determinanty organizacyjne obejmujące podział odpowiedzialności, standaryzację procedur, jakość komunikacji i koordynację działań pomiędzy uczestnikami procesu transportowego.

Badania wykazały również rosnące znaczenie odporności systemów logistycznych oraz zdolności do funkcjonowania w warunkach zakłóceń wywołanych zagrożeniami technicznymi, terrorystycznymi, cybernetycznymi i hybrydowymi. W tym kontekście bezpieczeństwo transportu materiałów wybuchowych należy postrzegać jako integralny element odporności państwa oraz zdolności operacyjnych systemu obronnego. Uzyskane wyniki umożliwiły wypełnienie zidentyfikowanej luki badawczej poprzez opracowanie systemowej klasyfikacji logistycznych i organizacyjnych determinant bezpieczeństwa transportu intermodalnego materiałów wybuchowych i amunicji oraz określenie ich znaczenia dla funkcjonowania współczesnych łańcuchów dostaw. Stanowi to podstawę do dalszych badań empirycznych obejmujących ilościową ocenę wpływu poszczególnych determinant na poziom ryzyka transportowego oraz budowę modeli wspomagających zarządzanie bezpieczeństwem przewozów materiałów wybuchowych i amunicji.

Reasumując, należy stwierdzić, że badania miały charakter jakościowy i opierały się na analizie literatury oraz dokumentów normatywnych. Nie prowadzono badań ankietowych ani analiz statystycznych rzeczywistych zdarzeń transportowych. Uzyskane wyniki mają charakter analityczny i stanowią podstawę do dalszych badań empirycznych dotyczących oceny skuteczności rozwiązań organizacyjnych stosowanych w transporcie intermodalnym materiałów wybuchowych i amunicji.

Bibliografia

- Adamski R., 2025: Predykcja zagrożeń w transporcie intermodalnym towarów niebezpiecznych klasy 1, *Rocznik Bezpieczeństwa Morskiego* 19, 1043–1054.
- ADR, 2025: Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR), ONZ, Genewa, <https://unece.org/adr-2025-files> [dostęp: 18.02.2026].
- Chmieliński M., 2019: Bezpieczeństwo w portach morskich o podstawowym znaczeniu dla gospodarki narodowej podczas przeładunku materiałów wybuchowych, Wydawnictwo BP, Gdynia.
- Chmieliński M., 2020: Determinanty bezpieczeństwa przewozu materiałów wybuchowych i przedmiotów z materiałami wybuchowymi w portowym terminalu kontenerowym, Wydawnictwo Akademii Marynarki Wojennej, Gdynia.
- Hollnagel E., 2018: *Safety-I and Safety-II: The Past and Future of Safety Management*, CRC Press, Londyn.
- IMDG, 2024: *International Maritime Dangerous Goods (IMDG) Code*, IMO, Londyn, <https://doi.org/10.62454/KO200E>
- ISO, 2018: *ISO 31000:2018 Risk Management – Guidelines*.
- ISO, 2022: *ISO 28000:2022 Security and Resilience – Security Management Systems – Requirements*.
- Komisja Europejska, 2022: Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie unijnych wytycznych dotyczących rozwoju transeuropejskiej sieci transportowej, zmieniające rozporządzenie (UE) 2021/1153 i rozporządzenie (UE) nr 913/2010 oraz uchy-

- lające rozporządzenie (UE) nr 1315/2013, https://orka.sejm.gov.pl/SUE9.nsf/Pliki-zal/COM%282022%29_384_2_PL_ACT_part1_v2.pdf [dostęp: 18.02.2026].
- Linkov I., Trump B.D., 2019: *The Science and Practice of Resilience*, Springer, Cham.
- Mindur L., 2018: Metody wspierania rozwoju transportu intermodalnego w wybranych krajach Europy w latach 1990–2016, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport* 120, 287–296.
- NATO, 2023: *NATO Logistics Handbook*, North Atlantic Treaty Organization, Bruksela.
- RID, 2025: *Regulations concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Rail (RID)*, United Nations, Genewa.
- Szymańska E.J., 2017: Łańcuchy dostaw na wybranych rynkach mięsa w Polsce, *Problemy Transportu i Logistyki* 3(39), 119–128.
- Ustawa z dnia 19 sierpnia 2011 r. o przewozie towarów niebezpiecznych, *Dz.U.* 2024, poz. 643.
- Wiśniewski B., 2015: *Bezpieczeństwo infrastruktury krytycznej transportu w warunkach zagrożeń*, Wydawnictwo CNBOP, Józefów.
- Załęski K., Kozuba J., Rajchel J., 2018: *Bezpieczeństwo w transporcie lotniczym: wybrane problemy*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.

Agnieszka Bukowska-Piestrzyńska✉, Maciej Bielecki
Uniwersytet Łódzki

Technologie Przemysłu 4.0 jako instrumenty wspierające Lean Logistics

Industry 4.0 technologies as instruments supporting Lean Logistics

Synopsis. Lean Logistics jako systemowe podejście do zarządzania logistyką ma na celu eliminację działań nieprzynoszących wartości dodanej oraz optymalizację przepływów w łańcuchu dostaw. Integracja zasad Lean Logistics z technologiami Przemysłu 4.0 ma doprowadzić nie tylko do eliminacji marnotrawstwa, ale również do zwiększenia elastyczności i poprawy jakości procesów logistycznych. Technologie cyfrowe wzmacniają efekty Lean, dlatego istotne jest poszerzanie świata fizycznego o możliwości świata cyfrowego. W ramach przeglądu literatury zdefiniowano pojęcie Lean Logistics 4.0 oraz zidentyfikowano 21 technologii Przemysłu 4.0, które pogrupowano i skategoryzowano (według autorskiej metodologii), co pozwoliło stworzyć bazę służącą do interpretacji wyników badań empirycznych. Badaniem objęto 23 respondentów (reprezentujących różnych operatorów logistycznych) i dotyczyło ono możliwości dostosowania technologii Przemysłu 4.0 do Lean Logistics (a w szczególności znajomości technologii Przemysłu 4.0 i ich strategicznego znaczenia dla organizacji oraz skali ich wykorzystania w przedsiębiorstwach). Wyniki badań pokazują, że wykorzystanie technologii Przemysłu 4.0 sprowadza się głównie do ogólnie pojętej cyfryzacji, zastosowania analityki dużych zbiorów danych oraz wykorzystania aplikacji mobilnych i sieci czujników. Około 40% badanych technologii jest wykorzystywane częściowo, a ponad 40% w marginalnym zakresie. Uzyskane rezultaty pokazują, że do wykorzystania potencjału technologii Przemysłu 4.0, z którego operatorzy logistyczni mogą czerpać w celu zwiększenia efektywności operacyjnej i wzmocnienia efektów Lean Logistics.

Słowa kluczowe: Lean, Przemysł 4.0, technologie Przemysłu 4.0, Lean Logistics 4.0

✉ **Agnieszka Bukowska-Piestrzyńska** – Uniwersytet Łódzki, Katedra Badań Operacyjnych i Logistyki; e-mail: agnieszka.bukowska@uni.lodz.pl; <https://orcid.org/0000-0002-0088-2352>
Maciej Bielecki – Uniwersytet Łódzki, Katedra Badań Operacyjnych i Logistyki; e-mail: maciej.bielecki@uni.lodz.pl; <https://orcid.org/0000-0001-6550-3512>

Abstract. Lean Logistics, as a systematic approach to logistics management, aims to eliminate non-value-added activities and optimize supply chain flows. Integrating Lean Logistics principles with Industry 4.0 technologies is intended not only to eliminate waste but also to increase flexibility and improve the quality of logistics processes. Digital technologies enhance the effects of Lean, therefore it is crucial to extend the physical world with the capabilities of the digital world. A literature review defined the concept of Lean Logistics 4.0 and identified 21 Industry 4.0 technologies, which were grouped and categorized (according to a proprietary methodology), providing a basis for interpreting the empirical research results. The study included 23 respondents (representing various logistics operators) and focused on adapting Industry 4.0 technologies to Lean Logistics (and in particular on their knowledge of Industry 4.0 technologies, the scale of their use, and their strategic importance for the organization). The research results show that the use of Industry 4.0 technologies primarily comes down to the broad concept of digitization, the application of big data analytics, mobile applications, and sensor networks. Approximately 40% of the technologies studied are partially utilized, and over 40% are marginally utilized. The results demonstrate the potential of Industry 4.0 technologies, which logistics operators should begin to capitalize on to increase operational efficiency and enhance the benefits of Lean Logistics.

Keywords: Lean, technologies of Industry 4.0, Industry 4.0, Lean Logistics 4.0

Kody JEL: M15, O14, O39

Wprowadzenie

Dynamiczne zmiany zachodzące w branży TSL powodują, że przedsiębiorstwa logistyczne od lat funkcjonują w sytuacji rosnącej presji zwiększania efektywności operacyjnej, skracania czasów realizacji oraz redukcji kosztów [Staudt i in. 2015]. Korzystanie z rozwiązań z zakresu Lean Management (LM) może przyczynić się do sprostania tym oczekiwaniom. Postępująca cyfryzacja procesów gospodarczych sprawia, że Przemysł 4.0 (Industry 4.0 – I4.0) i technologie Przemysłu 4.0 (Industry 4.0 Technologies – I4.0T) stają się kluczowym elementem budowania przewagi konkurencyjnej. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera integracja koncepcji Lean Logistics (LL) z narzędziami cyfrowymi, które mogą wspierać eliminację marnotrawstwa, poprawę przepływu informacji oraz zwiększenie transparentności procesów [Rossini i in. 2023].

Choć w literaturze przedmiotu pojawiają się artykuły dotyczące transformacji cyfrowej operatorów logistycznych, to należy zauważyć, że należą one raczej do rzadkości [Nicoletti i Appolloni 2025]. Ostatnie badania potwierdzają znaczące korzyści wynikające z implementacji technologii Industry 4.0 w zarządzaniu łańcuchem dostaw zgodnie z filozofią Lean i jednocześnie wskazują na niedobór badań empirycznych w przedsiębiorstwach [Reyes i in. 2026]. Ponadto pokazują, że świadomość znaczenia I4.0T w logistyce rośnie, ale poziom ich faktycznego wdrożenia w przedsiębiorstwach TSL

pozostaje różnicowany. Jednocześnie niewiele prac empirycznych poświęconych jest analizie, jak menedżerowie branży postrzegają te technologie, w jakim stopniu je znają oraz jakie bariery napotykają przy ich implementacji. Luka ta uzasadnia potrzebę przeprowadzenia badań, które pozwolą ocenić stopień przygotowania kadry zarządzającej do cyfrowej transformacji procesów logistycznych.

Celem artykułu jest wskazanie istoty koncepcji Lean Logistics i roli I4.0T w jej realizacji, a także ocena poziomu znajomości I4.0T wśród menedżerów TSL. Cele szczegółowe obejmują:

- zidentyfikowanie kluczowych narzędzi i I4.0T istotnych dla Lean Logistics,
- określenie poziomu wiedzy menedżerów TSL na temat tych narzędzi oraz analizę stopnia ich wykorzystania w przedsiębiorstwach logistycznych w kontekście wdrażania Lean Logistics.

Artykuł ma charakter teoretyczno-empiryczny. Obejmuje analizę literatury w zakresie istoty koncepcji Lean Logistics i narzędzi, które umożliwiają jej wdrażanie, m.in. z obszaru I4.0. Przedstawia autorską klasyfikację I4.0T, przez pryzmat której pokazano wyniki badań.

Lean Logistics – zarys zagadnienia

Lean Logistics stanowi rozwinięcie koncepcji LM dla usług logistycznych [Alvim i de Oliveira 2020] ukierunkowane na eliminację marnotrawstwa w przepływach materiałowych i informacyjnych w łańcuchu dostaw. Jej głównym celem jest ograniczanie strat oraz usprawnianie procesów tak, aby przedsiębiorstwo mogło działać szybciej, taniej i bardziej efektywnie oraz z większą elastycznością [Hines i in. 2004]. Fundamentem jest dążenie do maksymalizacji wartości dla klienta poprzez redukcję działań nieprzynoszących wartości dodanej [Myerson 2012; Walentynowicz i Bierzanowski 2017; Khawka i in. 2024]. Koncepcja ta zakłada ciągłe doskonalenie procesów (wyrażające się m.in. w terminowości dostaw, skróceniu czasu realizacji zamówień, ograniczeniu kosztów operacyjnych, lepszej obsłudze klienta) oraz zaangażowanie wszystkich pracowników w poprawę funkcjonowania firmy, co powinno prowadzić do lepszego dostawiania się przedsiębiorstwa do zmiennych warunków rynkowych oraz zwiększenia konkurencyjności [Mistry 2005].

Lean Logistics oznacza takie zarządzanie transportem, magazynowaniem, zapasami czy dostawami, aby cały przepływ materiałów, towarów i informacji w łańcuchu dostaw przebiegał sprawnie i bez zbędnych strat. Jego fundamentem jest eliminacja trzech podstawowych źródeł nieefektywności: nadmiernego obciążenia (Muri), nieregularności (Mura) oraz marnotrawstwa (Muda). Można go określić jako logistykę bez marnotrawstwa [Wronka 2016].

W logistyce szczególnie istotne jest marnotrawstwo związane z¹:

- nadmiernymi zapasami – zamrażanie kapitału i blokowanie miejsc w magazynie,
- nadmiernym transportem – zbędne przemieszczanie produktów,
- czekaniem – oczekiwanie ludzi lub maszyn na realizację procesów,

¹ <https://action-audit.com/pl/blog/rodzaje-marnotrawstwa-wg-lean-manufacturing-i-jak-je-zredukowac-2024-11-05> [dostęp: 11.05.2026].

- nadprodukcją – nadmiar towarów w stosunku do potrzeb rynku,
- błędami – reklamacje, uszkodzenia, braki,
- zbędnym ruchem – realizacja ruchów nieprzynoszących wartości,
- nadprocesowością – wykonywanie dodatkowych, zbędnych operacji (np. nadmierne pakowanie),
- nieefektywną komunikacją i przepływem informacji.

W ostatniej dekadzie koncepcja ta zyskała szczególne znaczenie z uwagi na rosnącą presję skracania czasów realizacji, redukcji kosztów i poprawy jakości usług logistycznych, co wymusza wdrażanie metod systemowego doskonalenia procesów [Walenty-nowicz i Bierżanowski 2017]. Badania bibliometryczne z ostatnich lat wskazują, że zainteresowanie Lean Logistics rośnie w tempie wykładniczym, a publikacje naukowe koncentrują się na integracji Lean z cyfryzacją (a także zrównoważonym rozwojem oraz zarządzaniem łańcuchem dostaw) [Benatiya Andaloussi 2024; Tariq i in. 2024]. W literaturze podkreśla się, że Lean Logistics nie jest jedynie zbiorem narzędzi, lecz kompleksową filozofią zarządzania przepływami, obejmującą zarówno procesy magazynowe, transportowe, jak i dystrybucyjne. Podkreśla się również, że Lean Logistics nie ogranicza się do optymalizacji pojedynczych procesów, lecz obejmuje holistyczne spojrzenie na cały łańcuch dostaw, integrując działania dostawców, operatorów logistycznych i odbiorców końcowych [Piasecka-Głuszak 2015; Alejandro-Chable i in. 2024].

Badania empiryczne potwierdzają, że wdrożenie Lean Logistics prowadzi do [Hines i in. 2004; Adeodu 2023]:

- skrócenia lead time,
- redukcji zapasów,
- poprawy terminowości dostaw,
- zwiększenia produktywności magazynów,
- redukcji kosztów operacyjnych.

Model Lean Logistics opracowany przez Alejandro-Chable i in. [2024] wskazuje na kluczową rolę zaangażowania kierownictwa oraz komunikacji w procesie wdrażania tej koncepcji. Jednak LL obejmuje nie tylko elementy kultury organizacyjnej (zaangażowanie pracowników, standaryzacja pracy, ciągłe doskonalenie), ale również narzędzia operacyjne [Bhamu i Sangwan 2021], takie jak:

- mapowanie strumienia wartości (value stream mapping, VSM) – analiza wartości poprzez identyfikację wąskich gardeł, opóźnień oraz zbędnych operacji w przepływach;
- 5S – poprawa organizacji pracy w magazynach, np. skrócenie czasu kompletacji, zwiększenie bezpieczeństwa;
- Kanban i systemy pull – narzędzia ograniczające nadprodukcję i nadmierne zapasy, synchronizujące przepływy z rzeczywistym popytem;
- Kaizen – narzędzie wspierające ciągłe doskonalenie procesów logistycznych, kluczowy czynnik sukcesu Lean Logistics.

Skuteczność tych narzędzi zależy m.in. od jakości danych operacyjnych i w praktyce Lean Logistics coraz częściej łączy się z narzędziami Six Sigma oraz podejściem agile [Wronka 2016].

Cyfryzacja i Przemysł 4.0 w realizacji Lean Logistics

Adaptacja I4.0T w celu praktycznej realizacji koncepcji Lean Logistics w przedsiębiorstwach jest postrzegana jako naturalny kierunek rozwoju przedsiębiorstw logistycznych. Technologie cyfrowe wspierają eliminację marnotrawstwa poprzez zwiększenie transparentności procesów, redukcję błędów ludzkich, skrócenie czasu reakcji oraz umożliwienie podejmowania decyzji na podstawie danych. Jednocześnie literatura wskazuje na liczne bariery wdrożeniowe, takie jak wysokie koszty inwestycji, brak kompetencji cyfrowych pracowników, opór wobec zmian [Piercy i Rich 2009], brak spójnej strategii doskonalenia procesów czy trudności w integracji systemów IT. Badania Abu Nimeh i in. [2018] potwierdzają, że bariery te są szczególnie widoczne w małych i średnich przedsiębiorstwach logistycznych.

Fundamentem I4.0 są jej technologie, które tworzą systemy cyberfizyczne (CPS) w inteligentnych fabrykach (SF). Do najpopularniejszych rozwiązań I4.0T można zaliczyć: internet rzeczy (IoT), internet usług (IoS) oraz przemysłowy internet rzeczy (IIoT), duże zbiory danych i ich analitykę (BD/BDA), wykorzystywanie chmury obliczeniowej (CC), technologię blockchain (Bc), wytwarzanie addytywne wraz z drukiem 3D (AM/3D-P), rozszerzoną i wirtualną rzeczywistość (AR/VR) oraz sztuczną inteligencję (AI) wraz ze wspierającymi ją algorytmami – maszynowego nauczania (ML) i głębokiego nauczania (DL) [Nascimento i in. 2019].

Przedstawione rozwiązania I4.0T znajdują zastosowanie nie tylko w sferze wytwarzania, mogą być wykorzystane także w logistyce – Lean Logistics 4.0. Umożliwiają tworzenie inteligentnych, samoorganizujących się łańcuchów dostaw, zdolnych do adaptacji w czasie rzeczywistym. W klasycznych procesach logistycznych (transport, magazynowanie, pakowanie, obsługa zamówień oraz zarządzanie zapasami) realizowanych w ramach kolejnych faz – zaopatrzenia, produkcji, dystrybucji i zwrotów [Pfohl 1996] – możliwe jest wykorzystanie I4.0T na każdym z tych etapów. Jest to szczególnie istotne dla przedsiębiorstw świadczących usługi logistyczne (operatorów logistycznych), dla których procesy logistyczne są kluczowymi kompetencjami w działaniach strategicznych. W branży TSL rozwiązania I4.0T mogą być wykorzystywane następująco:

- IoT pozwala monitorować przepływy materiałowe w czasie rzeczywistym, co wspiera system pull; czujniki IoT umożliwiają redukcję zapasów, eliminację opóźnień oraz automatyczne wykrywanie nieprawidłowości;
- AI może wspierać optymalizację harmonogramów i tras transportowych, automatyczne podejmowanie decyzji oraz wykrywanie marnotrawstwa w procesach;
- BDA wspomaga identyfikację źródeł marnotrawstwa, optymalizację tras transportowych, predykcję popytu oraz skracanie lead time;
- roboty mobilne (AMR), wózki autonomiczne (AGV) i automatyczne systemy magazynowe (AS/RS) nie tylko wspierają standaryzację, ale również pomagają eliminować błędy;
- blockchain zwiększa przejrzystość łańcucha dostaw, redukuje błędy dokumentacyjne i wzmacnia zasadę right first time;
- systemy RFID służą do automatycznego śledzenia zapasów i identyfikacji towarów w magazynach, redukując błędy inwentaryzacji; czujniki GPS monitorują

lokalizację pojazdów i przesyłek, umożliwiając optymalizację tras i wykrywanie opóźnień; czujniki temperatury i wilgotności są kluczowe w łańcuchach chłodniczych (żywności czy leków) – alarmują o odchyleniach i zapewniają zgodność z normami; czujniki wstrząsów i wibracji wykrywają uszkodzenia podczas transportu, wspierając proaktywną logistykę;

- zastosowanie w branży TSL znajdują także zaawansowane systemy WMS (warehouse management system) i ERP (enterprise resource planning) oraz cyfrowe bliźniaki (digital twins, DT) procesów.

Najważniejszym trendem ostatnich lat jest integracja zasad Lean Logistics z możliwościami I4.0T (w celu eliminacji marnotrawstwa, zwiększenia elastyczności i poprawy jakości procesów logistycznych), którą Rodrigues i in. [2023] definiują jako Lean Logistics 4.0 (LL4.0)². McDermott i in. [2024] wskazują, że integracja LM i I4.0 ma charakter synergiczny – Lean redukuje złożoność procesów, a I4.0 zwiększa ich przejrzystość. Z kolei Anaba i in. [2024] wskazują na szybsze podejmowanie decyzji, redukcję ryzyka i odporność na zakłócenia. Technologie cyfrowe wzmacniają ponadto efekty Lean, umożliwiając predykcyjne zarządzanie, automatyzację oraz eliminację błędów. McDermott i in. [2024] podkreślają znaczenie analityki danych oraz IoT, które wspierają redukcję marnotrawstwa, poprawę widoczności przepływów i zwiększenie elastyczności logistycznej.

W badaniu przyjęto, że Lean Logistics stanowi nadrzędną koncepcję organizacji procesów logistycznych, natomiast technologie Przemysłu 4.0 pełnią funkcję instrumentów wspierających realizację jej podstawowych założeń (takich jak eliminacja marnotrawstwa, zapewnienie ciągłego przepływu oraz doskonalenie procesów). Jednocześnie autorzy podkreślają, że wdrożenie technologii cyfrowych bez fundamentów Lean może prowadzić do „cyfryzacji marnotrawstwa”, dlatego integracja obu obszarów staje się kluczowa przy wprowadzaniu zmian w przedsiębiorstwach branży TSL.

W literaturze zaproponowano różne klasyfikacje I4.0T, np. Frank i in. [2019] dokonali podziału technologii na: smart supply chain, smart working, smart manufacturing oraz smart products, wspomagane przez bazowe I4.0T, tzn. IoT, CC, BD i analitykę. Z kolei Dachs i in. [2019] wyodrębnili trzy główne obszary I4.0T, do których zaliczyli: cyfrowy system zarządzania, bezprzewodową komunikację człowiek–maszyna oraz CPS. Na potrzeby artykułu autorzy zaproponowali nieco odmienne podejście do I4.0T w kontekście sektora operatorów logistycznych. Kwestie procesowania danych oraz cyfrowej komunikacji wydają się kluczowe, a uzupełniającą można wyodrębnić technologie wytwórcze – zmieniające zarówno sam proces wytwarzania (AM), jak i jego obsługę – stanowisko pracy (robotics, cobotics, CPS). Wszystkie pogrupowane I4.0T powinny być rozpatrywane w ramach systemów i procesów kluczowych dla I4.0, tzn. CPS, cyberbezpieczeństwa, business intelligence (optymalizacja, symulacje) przy wykorzystaniu inteligencji rzeczy – smart things (smart machine, smart materials, smart products). Na tej podstawie wyodrębniono grupy I4.0T wspierające konkretne procesy, systemy oraz obszary I4.0 (tab. 1).

² Autorzy wskazują równocześnie na niewielkie zainteresowanie tą kwestią w literaturze przedmiotu (luka badawcza).

Tabela 1. Klasyfikacja I4.0T oraz identyfikacja kluczowych procesów i systemów

Table 1. Classification of Industry 4.0 Technologies (I4.0T) and identification of key processes and systems

Grupy I4.0T	I4.0T	I4.0 – procesy i systemy
Cyfryzacja (zmiana świata fizycznego w cyfrowy)	digitalization, digital twins, digital assistants	cyberbezpieczeństwo symulacje optymalizacja analityka biznesowa inteligencja rzeczy
Procesowanie i ochrona danych (obliczenia)	big data, cloud computing, artificial intelligence, machine learning, blockchain	
Komunikacja (nowe sposoby komunikowania się ludzi i maszyn)	internet of things/industrial internet of things, 5G, machine to machine, radio frequency identification, near field communication, quick response	
Wytwarzanie*	additive manufacturing, 3D printing, 3D scanning	
Obsługa procesów	robotics, cobots and cobotics systems, machine autonomy, drones	
Narzędzia wspomagające	sensors and actuators, vision systems, nanotechnologies, blockchain, augmented and virtual reality, mobile applications	

* Ten obszar nie został włączony do kwestionariusza ankiety.

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Zaproponowany w tabeli 1 podział jest o tyle istotny, że stanie się podstawą do prezentacji wyników badań w dalszej części artykułu.

Metody

Wykorzystana w artykule metoda badań stanowi kombinację ustrukturyzowanego badania literaturowego oraz wspomaganego komputerowo wywiadu z zastosowaniem narzędzia Google Forms (w przeglądarce internetowej Google Chrome) w celu samodzielnego wypełnienia przez respondentów przygotowanego kwestionariusza ankietowego (metoda CAVI).

Ustrukturyzowane badanie literaturowe pozwoliło na zdefiniowanie pojęcia Lean Logistics 4.0, a także wyodrębnienie oraz skategoryzowanie I4.0T, a w konsekwencji na zagregowanie I4.0T w zaproponowane przez autorów grupy (tab. 1). Narzędziem badawczym był kwestionariusz ankiety, w którym zaprezentowano zidentyfikowane w badaniu literaturowym technologie I4.0T i zadano respondentom pytania dotyczące ogólnej znajomości tych technologii („nie znam” lub „znam ideę”) oraz zakresu ich wdrożenia (od „wykorzystania częściowego” do „zaadaptowania w procesach”). Dodatkowo poproszono respondentów o udzielenie odpowiedzi, na ile wykorzystywane I4.0T są istotne z punktu widzenia zmian w danej organizacji. Badanie zostało przeprowadzone w IV kwartale 2025 roku i wzięło w nim udział 23 respondentów. Stanowi ono pilotaż do pogłębionych badań z zakresu efektywności Lean Logistics 4.0.

Badanie przeprowadzono wśród menedżerów reprezentujących przedsiębiorstwa z sektora TSL (obejmującego firmy transportowe, spedycyjne oraz logistyczne). Zastosowano metodę ankiety internetowej skierowanej do osób odpowiedzialnych za zarządzanie procesami operacyjnymi, technologicznymi lub strategicznymi.

Wyniki badań i dyskusja

Pierwszym badanym obszarem była cyfryzacja, w jego ramach poruszono trzy zasadnicze elementy: cyfryzację (digitalizację) jako zjawisko ogólne oraz dwa konkretne rozwiązania technologiczne, do których zaliczono bliźniaki cyfrowe (DT) oraz asystentów cyfrowych (DA). Szeroko pojęte procesy cyfryzacji zostały wdrożone u badanych operatorów logistycznych i były istotne w ponad 60% odpowiedzi. Natomiast implementacja technologii DT oraz DA była albo w ogóle nieznana – ponad 30% odpowiedzi, albo nie wiadomo było, czy jest wykorzystywana – ok. 40% odpowiedzi. Na adaptację wspomnianych technologii (DT & DA) w procesach wskazało jedynie nieco ponad 10% badanych.

Drugi obszar dotyczył procesowania i ochrony danych. Zbadano wykorzystanie: sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego, analityki dużych zbiorów danych, technologii chmury obliczeniowej i technologii blockchain. Najczęściej wykorzystywana przez operatorów logistycznych oraz zaadaptowana i istotna w procesach realizowanych w organizacjach jest analityka dużych zbiorów danych – łącznie ponad 65% odpowiedzi. Technologii blockchain, uczenia maszynowego oraz chmury obliczeniowej duża część respondentów w ogóle nie zna (od 35 do ponad 47%), choć chmura obliczeniowa jest częściowo wykorzystywana w ponad 25% przypadków, a sztuczna inteligencja w ponad 30%. Pozostałe technologie procesowania danych nie dominowały wyraźnie w żadnym z badanych obszarów.

Kolejną grupą technologii stosowanych w przedsiębiorstwach sektora TSL, o którą zapytano w kwestionariuszu, były technologie komunikacyjne. Najczęściej wykorzystywanymi przez operatorów logistycznych oraz uważanymi za najważniejsze w prowadzonych procesach są technologie typu RFID (ewentualnie są one częściowo wykorzystywane) oraz komunikacja 5G (głównie za sprawą użytkowania telefonów komórkowych). Takie technologie komunikacji jak IoT oraz M2M (maszyna z maszyną) są w zasadzie nieznane bądź nie wiadomo, czy są wykorzystywane przez operatorów logistycznych (u których byli zatrudnieni respondenci).

Następną analizowaną grupą I4.0T były narzędzia: rozszerzona rzeczywistość, systemy wizyjne, aplikacje mobilne, sieci czujników, technologia sensoryczna, wirtualna rzeczywistość – w ponad 43% przedsiębiorstw sieci czujników były znane i zaadaptowane w procesach, istotne były także i zaadaptowane w procesach aplikacje mobilne. Kwestie rozszerzonej i wirtualnej rzeczywistości są respondentom nieznane lub nie wiedzą oni, czy są w ich firmach stosowane. Warto zwrócić uwagę na technologię widzenia maszynowego (komputerowego), która w ok. 30% przypadków jest już zaadaptowana w procesach, a w ponad 17% wykorzystywana częściowo i uważana za istotną.

Kolejnym obszarem związanym z wykorzystaniem I4.0T była kwestia wyposażenia stanowisk pracy, a dokładniej stosowania robotów, CPS oraz autonomicznych pojazd-

dów. Pojazdy autonomiczne wykorzystywane są marginalnie, a implementacja robotów w warunkach przemysłowych następuje w przedsiębiorstwach respondentów raczej połowicznie niż całościowo. Podobnie sytuacja wygląda w przypadku CPS: jeśli są one wykorzystywane, to już zaadaptowane w procesach (ponad 26% odpowiedzi), jednak najczęściej są w ogóle nieznane lub nie wiadomo, czy są stosowane (około 60% odpowiedzi). W ramach szerokiego pojęcia smart odniesiono się do trzech podstawowych obszarów: maszyn, materiałów oraz produktów. Inteligentne maszyny wykorzystuje się częściowo i uznaje za istotne (ponad 20% odpowiedzi) lub adaptuje je w procesach (ponad 17%). Inteligentne materiały oraz produkty są technologiami nieznanymi dla ponad 47% respondentów (inteligentne maszyny dla ponad 30%). Oznacza to, że technologie te nie znalazły jeszcze zastosowania u badanych operatorów logistycznych.

Ostatnim obszarem badawczym były procesy związane z cyberbezpieczeństwem, symulacjami, optymalizacjami oraz analityką biznesową. Zdecydowanie najczęściej respondenci zwracają uwagę na kwestie cyberbezpieczeństwa oraz BDA, istotna jest dla nich także optymalizacja systemów. Najrzadziej stosują i wykorzystują symulacje.

Analizując stopień wykorzystania I4.0T w przedsiębiorstwach branży TLS na podstawie przeprowadzonego badania pilotażowego, warto podkreślić, że znaczna liczba technologii nie jest używanych. Wdrożenia technologii Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach TSL koncentrują się głównie na automatyzacji magazynowej, monitoringu floty oraz integracji systemów informatycznych. Technologie wymagające większych inwestycji, takie jak roboty mobilne czy cyfrowe bliźniaki, są stosowane sporadycznie.

Wykorzystywanie przez operatorów logistycznych ogólnych procesów digitalizacji w pełnym zakresie z pewnością pokazuje trend zmian w tej branży. Technologie cyfrowe w coraz większym stopniu wspomagają i ułatwiają pracę. Pozyskiwanie danych może odbywać się poprzez sieci czujników, a powszechnie wykorzystywane urządzenia mobilne (głównie smartfony) sprawiają, że dostęp do danych w każdym momencie jest właściwie nieograniczony. Technologie cyfrowe przyczyniają się do redukcji błędów, skrócenia czasu realizacji zleceń oraz poprawy jakości danych operacyjnych. Narzędzia z obszaru Przemysłu 4.0 mogą wspierać eliminację marnotrawstwa (np. przy kompletacji zamówień, planowaniu transportu oraz monitoringu zasobów), jednak ich efektywność zależy od stopnia integracji z procesami Lean.

Respondenci wykazywali zróżnicowany poziom wiedzy na temat I4.0T. Najlepiej rozpoznawane były systemy WMS/ERP oraz technologie RFID, natomiast najmniejszą znajomość odnotowano w przypadku cyfrowych bliźniaków i zaawansowanej analityki predykcyjnej. Wyniki badań wskazują, że wiedza menedżerów jest często fragmentaryczna i koncentruje się na narzędziach już stosowanych w praktyce operacyjnej.

Jeśli przyjrzymy się szczegółowo wynikom badań (tab. 2), zauważymy, że ponad 42% dostępnych technologii (tab. 1) nie jest wykorzystywanych. Może to wynikać z kilku powodów. Przykładowo tworzenie cyfrowych bliźniaków (odzwierciedlanie realnych, fizycznych rzeczy w cyfrowej formie) może w pierwszej kolejności wymagać specjalistycznego sprzętu opartego na widzeniu maszynowym [Tao i in. 2019]. Dodatkowo w przypadku przedsiębiorstw świadczących usługi logistyczne DT może nie mieć pełnych możliwości wykorzystania w przeciwieństwie do przedsiębiorstw produkcyjnych, w których cyfrowe formy produktu oraz np. układu maszyn w ramach organizacji produkcji mogą być stosowane dużo bardziej efektywnie.

Tabela 2. Zakres wykorzystania I4.0T przez operatorów logistycznych

Table 2. The extent of Industry 4.0 Technology adoption by logistics operators

Grupy I4.0T	I4.0T	Stopień wykorzystania*
Cyfryzacja (zmiana świata fizycznego w cyfrowy)	cyfryzacja	w pełni
	bliźniaki cyfrowe	nie określono
	asystenci cyfrowi	nie określono
Przetwarzanie, obliczanie i ochrona danych	analiza dużych zbiorów danych	w pełni
	sztuczna inteligencja	częściowo
	chmura obliczeniowa	częściowo
	blockchain	nie określono
	uczenie maszynowe	nie określono
Komunikacja (nowe sposoby komunikowania się ludzi i maszyn)	identyfikacja drogą radiową RFID	częściowo
	komunikacja 5G	częściowo
	komunikacja M2M	nie określono
	internet rzeczy	nie określono
Wspomaganie procesów	roboty	częściowo
	autonomiczne pojazdy	nie określono
	systemy cyberfizyczne	nie określono
Narzędzia wspomagające	aplikacje mobilne	w pełni
	sieci czujników	w pełni
	widzenie komputerowe	częściowo
	wirtualna rzeczywistość	nie określono
	technologie oparte na czujnikach	nie określono
	rozszerzona rzeczywistość	brak wykorzystania

* Określenie stopnia wykorzystania „w pełni” jest stosowane, gdy suma odpowiedzi respondentów „w pełni wdrożone” oraz „w pełni wdrożone i ważne” przekraczała 50%. W podobny sposób wyznaczono próg dotyczący częściowego wykorzystania I4.0T: jeśli suma odpowiedzi respondentów „częściowo wdrożone” lub „częściowo wdrożone – ważne” wynosiła więcej niż 50% lub suma odpowiedzi „w pełni wdrożone” i „w pełni wdrożone i ważne” oraz „częściowo wdrożone” i „częściowo wdrożone – ważne” wynosiła więcej niż 50%, przyjęto, że dana technologia jest wykorzystywana częściowo. Określenie „brak wykorzystania” było stosowane wtedy, gdy dana technologia była „znana” respondentom w ponad 50% przypadków, ale sumaryczny procent odpowiedzi respondentów „w pełni wdrożone” i „w pełni wdrożone i ważne” oraz „częściowo wdrożone” i „częściowo wdrożone – ważne” nie przekraczał 20%. „Nie określono” oznacza brak możliwości określenia stopnia wykorzystania danej technologii.

Źródło: wyniki badań własnych

Source: results of Authors' own research

Z kolei słaby stopień wykorzystania cyfrowych asystentów w badanych przedsiębiorstwach może wynikać z braku znajomości terminologii. Są to aplikacje często stosowane w systemach operacyjnych urządzeń mobilnych, np. Google Assistant czy Apple Siri, lub sklepów internetowych, np. Amazon Alexa, które upraszczają codzienne zadania [Brill i in. 2019]. Zatem cyfrowi asystenci mogli się stać na tyle powszechni, że nie są już utożsamiani z tym pojęciem.

Spora część respondentów stwierdziła również, że w ich przedsiębiorstwach nie jest wykorzystywana technologia blockchain. Koliduje to z wykorzystywaniem w pełni procesów cyberbezpieczeństwa, które z pewnością bazują na tej technologii [Kshetri 2017]. Podobna niezgodność występuje w przypadku czujników: zgodnie z odpowiedziami ankietowanych sieci czujników są już zaadaptowane w znacznym stopniu w badanych przedsiębiorstwach, zaś sama technologia czujników wykorzystywana jest połowicznie lub w ogóle.

Respondenci deklarowali także, że ich przedsiębiorstwa w pełni stosują analitykę dużych zbiorów danych, wykorzystując do tego celu tylko częściowo chmurę obliczeniową [Hashem i in. 2015]. Wydaje się jednak mało prawdopodobne, aby duże zbiory danych przechowywane były wyłącznie na dyskach fizycznych, a nie wirtualnych, co stanowi domenę chmury obliczeniowej [Yang i in. 2017].

W prezentowanych wynikach badań można dostrzec pewien trend dotyczący infrastruktury – określanego mianem smart wykorzystania maszyn (smart machine) [Chen i in. 2019]. Udzielone przez respondentów odpowiedzi wskazują na częściowe wykorzystanie zarówno robotów, jak i urządzeń autonomicznych. Inteligentne materiały lub produkty nie są jednak w badanych organizacjach implementowane.

Analizując procesy, w których stosowane są I4.0T, warto zwrócić uwagę, że dominuje analityka dużych zbiorów danych oraz ich zabezpieczanie (a więc cyberbezpieczeństwo) – zdaniem badanych są one wykorzystywane w pełni. Badani zwrócili także uwagę na kwestie optymalizacyjne, a więc te procesy, które pozwalają szukać ekstermów czasowych, kosztowych, efektywnościowych itd. Co ciekawe, spośród procesów i systemów I4.0 w minimalnym stopniu stosowane są symulacje, co potwierdzałoby tylko brak wykorzystywania technologii cyfrowych bliźniaków, która wspiera tego typu procesy [Boschert i Rosen 2016].

Wyniki badań potwierdzają obserwacje z literatury, zgodnie z którymi przedsiębiorstwa TSL znajdują się na różnych etapach cyfrowej transformacji. Choć menedżerowie deklarują wysoką świadomość znaczenia technologii 4.0, poziom ich praktycznego wdrożenia jest umiarkowany. Zauważalna jest również luka kompetencyjna, która ogranicza możliwości pełnego wykorzystania narzędzi cyfrowych w celu realizacji Lean Logistics.

Interesującym zjawiskiem jest rozbieżność między deklarowaną znajomością technologii a ich rzeczywistym wykorzystaniem. Może to wskazywać na brak strategii cyfryzacji lub ograniczenia finansowe przedsiębiorstw. Wyniki sugerują także, że technologie 4.0 przynoszą największe korzyści tam, gdzie wspierają kluczowe zasady Lean – szczególnie w zakresie eliminacji błędów, skracania czasu operacji i poprawy przepływu informacji. Warto podkreślić, że McDermott i in. [2024] wskazują, iż Lean jest warunkiem koniecznym do skutecznej cyfryzacji – organizacje o niskiej dojrzałości Lean mają trudności z wdrażaniem technologii 4.0, co umożliwia stwierdzenie, że bez stabilnych procesów Lean technologie cyfrowe nie przynoszą oczekiwanych efektów. Wyniki badań przedstawione przez Maldonado Guzmána [2026] wskazują, że technologie Industry 4.0 pełnią funkcję mediacyjną pomiędzy praktykami Lean a efektywnością logistyczną, umożliwiając poprawę szybkości działania, jakości informacji oraz koordynacji procesów logistycznych.

Podsumowanie i wnioski

Koncepcja Lean Logistics stała się w ostatniej dekadzie jednym z kluczowych kierunków rozwoju logistyki i łańcuchów dostaw. Operatorzy logistyczni korzystają z technologii, aby zwiększyć szybkość operacyjną (w odpowiedzi na pojawiające się wymagania rynku), jednocześnie zwiększając przejrzystość swoich działań, co bezpośrednio wpływa na jakość ich współpracy z klientami i partnerami [Baglio i in. 2025]. Klienci oczekują nie tylko niskich cen, ale również terminowych dostaw i wysokiej jakości obsługi [Wronka 2016], co wymusza na przedsiębiorstwach zwiększanie szybkości i elastyczności działań. Cyfryzacja zwiększa transparentność procesów logistycznych, jakość decyzji oraz elastyczność operacyjną [Bernard i in. 2025]. Wykorzystywanie technologii Przemysłu 4.0 w celu realizacji LL stanowi obiecujący kierunek rozwoju, wymaga jednak odpowiednich kompetencji, kultury organizacyjnej i wsparcia strategicznego. Samo wdrożenie technologii nie gwarantuje poprawy efektywności logistycznej [Frank i in. 2024].

W przeprowadzonym badaniu pilotażowym wykorzystano kwestionariusz internetowy składający się z pytań dotyczących: poziomu znajomości narzędzi Przemysłu 4.0, stopnia ich wdrożenia w przedsiębiorstwie, oceny wpływu technologii na efektywność procesów Lean Logistics oraz identyfikacji barier i czynników sprzyjających implementacji. Wyniki pozwoliły na ocenę zarówno deklaratywnej wiedzy menedżerów, jak i rzeczywistego poziomu cyfryzacji przedsiębiorstw TSL:

- respondenci – menedżerowie branży TSL – wykazują wyższy poziom znajomości technologii powszechnie stosowanych (np. WMS, RFID) niż technologii zaawansowanych (np. cyfrowe bliźniaki, analityka predykcyjna);
- stopień wdrożenia technologii Przemysłu 4.0 w przedsiębiorstwach TSL, w których respondenci są zatrudnieni, jest niższy niż poziom deklarowanej znajomości tych technologii przez menedżerów.

Zaprezentowane wyniki badań pilotażowych pozwalają zwrócić uwagę na kilka istotnych aspektów związanych z kierunkami rozwoju technologicznego operatorów logistycznych:

- I4.0T nie są wykorzystywane w szerokim zakresie; dotyczy to zarówno stopnia implementacji danych technologii, jak i ich ogólnego wykorzystania;
- część I4.0T nie jest w ogóle znana respondentom lub może być przez nich mylnie nazywana, co z pewnością utrudnia uogólnienie wyników badań;
- zdaniem respondentów wśród technologii najczęściej wykorzystywanych przez operatorów logistycznych dominują te, które powstały na początku XXI wieku lub wcześniej, tzn. ogólnie pojęta cyfryzacja, wykorzystywanie sieci czujników, aplikacje mobilne, które stają się nieodłącznym towarzyszem każdego posiadacza urządzeń mobilnych, oraz duże zbiory danych. W tym wypadku nie widać wyraźnego trendu korzystania z najnowszych technologii;
- poddane badaniom I4.0T mogą nie znajdować zastosowania u operatorów logistycznych lub brak ich znajomości może utrudniać wykorzystanie tych technologii.

Przeprowadzony pilotaż umożliwia wskazanie pierwszych implikacji menedżerskich. Najważniejsza wydaje się kwestia edukacyjna związana z istnieniem i możliwościami wykorzystania I4.0T. Znajomość danych technologii może przyczynić się do

ich eksploracji w badanych przedsiębiorstwach, co z kolei może przełożyć się na ich implementację. Kolejnym ważnym elementem wspomagającym procesy menadżerskie jest usystematyzowanie i skategoryzowanie tych technologii, co pozwala wskazać potencjalne obszary ich zastosowania u operatorów logistycznych. Wreszcie zaprezentowane wyniki badań pozwalają wskazać luki technologiczne (miejsca, w których dane technologie nie znajdują zastosowania), co pomaga zdefiniować technologiczne kierunki rozwoju badanych przedsiębiorstw.

Autorzy są świadomi, że przeprowadzone badania pilotażowe mają pewne ograniczenia. Najważniejszym z nich może być wielkość próby (choć należy zauważyć, że w przypadku badań pilotażowych nie jest to warunek najistotniejszy). W kolejnych badaniach wskazane jest rozgraniczenie respondentów na pracowników operacyjnych i zarządzających (co pozwoli zbadać zależności pomiędzy postrzeganiem wykorzystania I4.0T a miejscem aktywności zawodowej). Kontynuacja badań powinna skupiać się na określeniu wpływu technologii 4.0 na efektywność Lean Logistics, m.in. poprzez weryfikację następujących hipotez³:

- wykorzystanie technologii Przemysłu 4.0 pozytywnie wpływa na efektywność procesów Lean Logistics w przedsiębiorstwach TSL;
- technologie 4.0 przyczyniają się do redukcji marnotrawstwa w procesach magazynowych;
- technologie 4.0 poprawiają jakość danych operacyjnych, co zwiększa skuteczność narzędzi Lean (np. VSM, standaryzacji pracy);
- w przedsiębiorstwach o wyższym stopniu cyfryzacji obserwuje się większą poprawę KPI Lean (czas realizacji, błędy, koszty).

Konkludując, świadoma implementacja technologii Przemysłu 4.0 dla realizacji Lean Logistics stanowi wyzwanie w rozwoju przedsiębiorstw TSL. Menedżerowie wykazują umiarkowaną znajomość narzędzi cyfrowych, a poziom wdrożenia tych rozwiązań w firmach jest zróżnicowany. Technologie 4.0 mają potencjał znaczącego zwiększenia efektywności procesów Lean, jednak ich pełne wykorzystanie wymaga inwestycji w kompetencje pracowników oraz wdrażania technologii Przemysłu 4.0 w sposób systemowy (a nie punktowy) [Cudney i Elrod 2010], integracji systemów monitoringu i analityki z narzędziami Lean oraz rozwoju w przedsiębiorstwach kultury ciągłego doskonalenia.

Bibliografia

- Abu Nimeh H., Abdallah A.B., Sweiss R.J., 2018: Lean Supply Chain Management Practices and Performance: Empirical Evidence from Manufacturing Companies, *International Journal of Supply Chain Management* 7(1), 1–15.
- Adeodu A., Maladzhi R., Kana-Kana Katumba M.G., Daniyan I., 2023: Development of an improvement framework for warehouse processes using lean six sigma (DMAIC) approach. A case of third party logistics (3PL) services, *Heliyon* 9(4), <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14915>

³ Wskazane propozycje zostały wybrane z katalogu hipotez zaproponowanych przez ChatGPT [dostęp: 16.05.2026].

- Alejandro-Chable J.D., Salais-Fierro T.E., Saucedo-Martínez J.A., Cedillo-Campos M.G., 2024: A new lean logistics management model for the modern supply chain, *Mobile Networks and Applications* 29(1), 70–81, <https://doi.org/10.1007/s11036-022-02018-1>
- Alvim S.L., de Oliveira O.A.G., 2020: Lean Supply Chain Management: a lean approach applied to distribution – a literature review of the concepts, challenges and trends, *Journal of Lean Systems* 5(1), 85–103.
- Anaba D.C., KessMomoh A.J., Ayodeji S.A., 2024: Optimizing supply chain and logistics management: A review of modern practices, *OARJST* 11(2), 020–028, <https://doi.org/10.53022/oarjst.2024.11.2.0083>
- Baglio M., Creazza A., Dallari F., 2025: ‘Logistics 4.0’ technologies in the 3PL industry: a maturity model, *Production Planning & Control* 36(12), 1696–1712, <https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2405717>
- Benatiya Andaloussi M., 2024: A Bibliometric Literature Review of Digital Supply Chain: Trends, Insights, and Future Directions, *SAGE Open* 14(2), 1–20, <https://doi.org/10.1177/21582440241240340>
- Bernard G., Budde L., Hänggi R., Friedli T., 2025: Driving Continuous Improvement with Industry 4.0 Technologies: Lessons from Multiple Use Case Analysis, *Applied Sciences* 15(4), 2191, <https://doi.org/10.3390/app15042191>
- Bhamu J., Sangwan K.S., 2014: Lean manufacturing: literature review and research issues, *International Journal of Operations & Production Management* 34(7), 876–940, <https://doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>
- Boschert S., Rosen R., 2016: Digital twin – the simulation aspect, [w:] P. Hehenberger, D. Bradley (red.), *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and Their Designers*, 59–74, https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- Brill T.M., Munoz L., Miller R.J., 2019: Siri, Alexa, and other digital assistants: a study of customer satisfaction with artificial intelligence applications, *Journal of Marketing Management* 35(15–16), 1401–1436, <https://doi.org/10.1080/0267257X.2019.1687571>
- Chen J., Hu P., Zhou H. i in., 2019: Toward Intelligent Machine Tool, *Engineering* 5(4), 679–690, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.018>
- Cudney E.A., Elrod C.C., 2010: Incorporating Lean Concepts into Supply Chain Management, *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage* 6(1–2), 12–30, <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2010.034854>
- Dachs B., Kinkel S., Jäger A., 2019: Bringing it all back home? Backshoring of manufacturing activities and the adoption of Industry 4.0 technologies, *Journal of World Business* 54(6), 101017, <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2019.101017>
- Frank A.G., Dalenogare L.S., Ayala N.F., 2019: Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies, *International Journal of Production Economics* 210, 15–26, <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Frank A.G., Thurer M., Godinho Filho M., Marodin G.A., 2024: Beyond Industry 4.0 – integrating Lean, digital technologies and people, *International Journal of Operations & Production Management* 44(6), 1109–1123, <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2024-0069>
- Hashem I.A.T., Yaqoob I., Anuar N.B., Mokhtar S., Gani A., Ullah Khan S., 2015: The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues, *Information Systems* 47, 98–115, <https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006>
- Hines P., Holweg M., Rich N., 2004: Learning to evolve: A review of contemporary lean thinking, *International Journal of Operations & Production Management* 24(10), 994–1011, <https://doi.org/10.1108/01443570410558049>

- Khawka Z.M.H., Abd Rahman A., Sidek S.B., Ahmed S.A., AlHadeethi R.H.F., AlDabbagh T., 2024: Effect of lean supply chain on competitive advantage: a systematic literature review, *Cogent Business & Management* 11(1), <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2370445>
- Kshetri N., 2017: Blockchain's roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy, *Telecommunications Policy* 41(10), 1027–1038, <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.003>
- Maldonado Guzmán G., 2026: Technological digital transformation in the automotive and aerospace sectors: a lean 4.0. Industry 4.0 and logistics 4.0 perspective, *International Journal of Industrial Engineering and Operations Management* 8(3), 1–20, <https://doi.org/10.1108/IJIEOM-01-2026-0012>
- McDermott O., Antony J., Sony M., Swarnakar V., 2024: Mapping the terrain for the Lean Supply Chain 4.0, *The International Journal of Logistics Management* 35(5), <https://doi.org/10.1108/IJLM-12-2022-0471>
- Mistry J.J., 2005: Origins of profitability through JIT processes in the supply chain, *Industrial Management & Data Systems* 105(6), 752–768, <https://doi.org/10.1108/02635570510606987>
- Myerson P., 2012: *Lean Supply Chain and Logistics Management*, McGrawHill, New York.
- Nascimento D.L.M., Alencastro V., Quelhas O.L.G. i in., 2019: Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal, *Journal of Manufacturing Technology Management* 30(3), 607–627, <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>
- Nicoletti B., Appolloni A., 2025: Digital transformation in ecosystems: integrated operations model and its application to fifthparty logistics operators, *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing* 18(1), 91–122, <https://doi.org/10.1108/JGOSS-04-2023-0024>
- Pfohl H.-C., 1996: *Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen*, Springer-Verlag.
- Piasecka-Głuszak A., 2015: Lean management w logistyce wewnętrznej przedsiębiorstw na rynku polskim – wyniki badań ankietowych, *Studia Ekonomiczne. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach* 249, 316–337.
- Piercy N., Rich N., 2009: Lean transformation in the pure service environment: the case of the call service centre, *International Journal of Operations & Production Management* 29(1), 54–76, <https://doi.org/10.1108/01443570910925361>
- Reyes J., Mula J., Diaz-Madroñero M., 2026: Reviewing lean manufacturing and Industry 4.0 technologies in the supply chain, *International Journal of Production Research*, 1–30, <https://doi.org/10.1080/00207543.2026.2615814>
- Rodrigues A.L.V., Gomes G., Bouzon M., 2023: Lean Logistics 4.0: concepts and key performance indicators, *Brazilian Journal of Development* 9(7), 22172–22197, <https://doi.org/10.34117/bjdv9n7-071>
- Rossini M., Powell D.J., Kundu K., 2023: Lean supply chain management and Industry 4.0: a systematic literature review, *International Journal of Lean Six Sigma* 14(2), 253–276, <https://doi.org/10.1108/IJLSS-05-2021-0092>
- Staudt F.H., Alpan G., Di Mascolo M., Rodriguez C.M.T., 2015: Warehouse performance measurement: A literature review. *International Journal of Production Research* 53(18), 5524–5544, <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1030466>
- Tao F., Qi Q., 2019: Make more digital twins, *Nature* 573, 490–491, <https://doi.org/10.1038/d41586-019-02849-1>
- Tariq S., Nasir N., Ali A., 2024: Smart Logistics for Sustainable Supply Chain: A Bibliometric Analysis, *Journal of Logistics, Informatics and Service Science* 11(1), 284–306, <https://doi.org/10.33168/JLISS.2024.0119>

- Walentyłowicz P., Bierżanowski R., 2017: Zarządzanie procesami logistycznymi z wykorzystaniem koncepcji Lean na przykładzie C-L sp. z o.o., *Studia Informatica Pomerania* 1(43), 91–92, <https://doi.org/10.18276/si.2017.43-09>
- Wronka A., 2016: Lean Logistics, *Journal of Positive Management* 7(2), 55–57.
- Yang C., Huang Q., Li Z., Liu K., Hu F., 2017: Big Data and cloud computing: innovation opportunities and challenges, *International Journal of Digital Earth* 10(1), 13–53, <https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1239771>

Grzegorz Dzieniszewski¹✉, Damian Jasiejko²

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Politechnika Rzeszowska

² Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

Analiza efektywności energetycznej i emisji spalin w biogazowni z uwzględnieniem łańcucha logistycznego w produkcji biogazu

Energy efficiency and exhaust emissions analysis in biogas plant considering the logistics chain of biogas production

Synopsis. W artykule oceniono wpływ łańcucha logistycznego odpadów i substratów (gromadzenie, transport, magazynowanie, dozowanie) na efektywność energetyczną oraz bilans emisji gazów cieplarnianych w układzie kogeneracyjnym z silnikiem tłokowym zasilanym biogazem. Zastosowano metodę studium przypadku dla biogazowni rolniczej małej mocy (ok. 100 kW), zaprojektowanej do pracy na mieszaninie substratów obejmującej: kiszonkę kukurydzy, wywar gorzelniany, wysłodki buraczane, melasę buraczaną i serwatkę. Na podstawie danych projektowych wyznaczono roczne strumienie masowe, uzysk biogazu i metanu, średni godzinowy strumień CH_4 oraz teoretyczną moc elektryczną jako funkcję wartości opałowej metanu i sprawności elektrycznej układu. Następnie przeprowadzono analizę scenariuszową obejmującą: (I) wariant logistyczny z ograniczonym magazynowaniem i krótkimi trasami dostaw oraz (II) wariant z wydłużonym czasem magazynowania i podwyższonymi stratami metanu ujętymi jako emisje fugitywne. Wyniki wskazują, że przy dostawach na krótkie odległości bezpośredni wkład CO_2 z transportu substratów w bilans emisji jest niewielki, natomiast kluczowy wpływ na ślad klimatyczny mają straty CH_4 na etapach magazynowania i obsługi procesu. Zwrócono uwagę, że znaczenie logistyczne może mieć również zagospodarowanie pofermentu, jednak skala efektu zależy tu od lokalnych dystansów oraz organizacji odbioru i wymaga przyjęcia odrębnych danych obiektowych. Wpływ logistyki na emisje spalin (CO , NO_x , węglowodory) omówiono jakościowo jako ryzyko

✉ **Grzegorz Dzieniszewski** – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; Politechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny; e-mail: g.dzieniszewski@pansp.pl; <https://orcid.org/0000-0002-2712-1131>

Damian Jasiejko – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; e-mail: d.jasiejko@s.pansp.pl

związane ze zmienną jakością biogazu i wzrostem zanieczyszczeń. Wskazano krytyczne punkty łańcucha logistycznego oraz kierunki działań ograniczających straty i emisje, w tym: hermetyzację magazynów, skracanie czasu składowania, monitoring szczelności oraz standaryzację paliwa gazowego.

Słowa kluczowe: biogaz, kogeneracja, łańcuch logistyczny, straty metanu, emisje spalin, efektywność energetyczna

Abstract. This paper evaluates how the logistics chain of feedstocks and organic residues (collection, transport, storage, and dosing) affects energy performance and the greenhouse-gas balance of a CHP system powered by a biogas-fueled reciprocating engine. A case-study approach is applied to a small agricultural biogas plant (~100 kW) designed to operate on a substrate mix including maize silage, distillery stillage, sugar beet pulp, molasses, and whey. Using design data, annual mass flows, biogas and methane yields, average hourly methane flow, and theoretical electric power are calculated as a function of methane lower heating value and electrical efficiency. A scenario analysis compares: (I) a logistics variant with limited storage and short delivery distances and (II) a variant with prolonged storage resulting in increased methane losses represented as fugitive emissions. The results indicate that, under short transport distances, direct transport-related CO₂ is relatively small, whereas methane losses during storage and process handling are the dominant contributors to the climate footprint. Digestate logistics may also be relevant, but its magnitude is site-specific and depends on local hauling distances and management practices, and therefore requires dedicated plant-specific data. The impact of logistics on exhaust-related emissions (CO, NO_x, unburned hydrocarbons) is discussed qualitatively as a risk associated with variability and degradation of biogas quality and increased contaminant levels. Critical logistics points are identified and mitigation measures proposed, including sealed storage, reduced residence time, leak detection and repair, and fuel gas standardization.

Keywords: biogas, combined heat and power, logistics chain, methane losses, exhaust emissions, energy efficiency

Kody JEL: Q42, Q53, Q55, L92, O13

Wprowadzenie

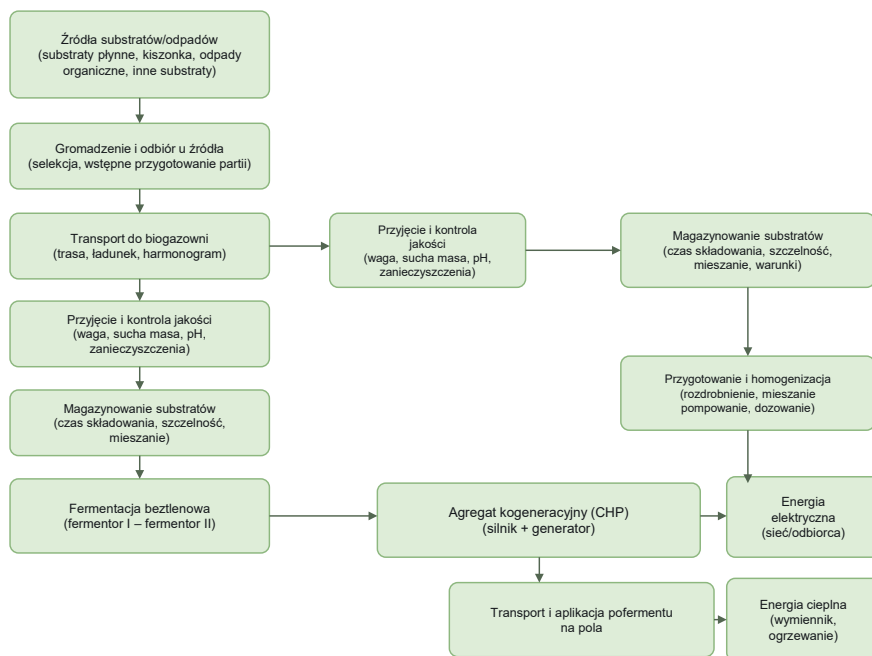
Wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego do wytwarzania biogazu wpisuje się w cele gospodarki o obiegu zamkniętym oraz polityki redukcji emisji gazów cieplarnianych. W praktyce technicznej dominującym sposobem konwersji biogazu na energię jest kogeneracja (CHP) z zastosowaniem silników tłokowych, umożliwiającą jednoczesną produkcję energii elektrycznej i ciepła użytkowego przy wysokiej sprawności całkowitej, pod warunkiem odbioru ciepła [Hakawati 2017].

Z punktu widzenia eksploatacji biogazowni stabilność pracy agregatu i poziom emisji spalin są w dużym stopniu zależne od jakości paliwa gazowego. Surowy biogaz charakteryzuje się zmiennym udziałem metanu (typowo 45–75% obj.) oraz obecnością

domieszek (m.in. CO₂, para wodna, H₂S), które determinują jego wartość opałową i wymagania dotyczące uzdatniania [Laskowski 2025].

W tym kontekście elementem krytycznym jest łańcuch logistyczny substratów (gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie i dozowanie wsadu). Oddziałuje on na:

- zmienność składu wsadu (np. wahania suchej masy, pH),
- ryzyko wystąpienia procesów niepożądanych podczas magazynowania (rozkład tlenowy, straty substancji organicznej),
- straty metanu (emisje fugitywne) w magazynach i instalacji, które mają wysoki wpływ klimatyczny oraz stanowią utracony potencjał energetyczny [Liebetrau 2017; Hurtig 2025].



Rysunek 1. Schemat łańcucha logistycznego substratów

Figure 1. Schematic diagram of the substrate logistics chain

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Celem artykułu jest ocena wpływu logistyki odpadów i substratów na: (I) efektywność energetyczną konwersji biogazu w układzie CHP oraz (II) emisje związane z funkcjonowaniem systemu, ze szczególnym uwzględnieniem strat metanu i zależności emisji spalin od jakości biogazu. W niniejszej pracy przyjęto podejście „well-to-CHP” w granicach instalacji oraz jej bezpośredniego otoczenia logistycznego. Jednostką odniesienia wyników jest (i) rok pracy instalacji oraz (ii) produkcja energii elektrycznej netto, co umożliwia interpretację zarówno w kategoriach t CO₂e/rok, jak i t CO₂e/MWh netto.

Rachunek ilościowy obejmuje: potencjał energetyczny wynikający z rocznego uzysku metanu, emisje CO₂ z transportu substratów wyznaczone metodą aktywnościową oraz emisje CO₂e wynikające ze strat metanu ujętych scenariuszowo. Emisje spalin agregatu CHP (CO, NO_x, THC/VOC) analizowano jakościowo jako efekt pośredni pogorszenia jakości paliwa gazowego wynikający z nieoptymalnej logistyki (magazynowanie, brak homogenizacji, wahania składu biogazu).

W literaturze podkreśla się, że zmienność składu biogazu jest naturalną konsekwencją zróżnicowania wsadów i warunków fermentacji, a zakres wartości opałowej (LHV) dla biogazu jest szeroki (rzędu ok. 16–28 MJ/m³), co przekłada się na wahania mocy i sprawności silników gazowych [European Commission b.d.; Laskowski 2025].

W odniesieniu do kogeneracji sprawność elektryczna jednostek CHP zasilanych gazem jest najczęściej podawana w zakresie ok. 35–42%, natomiast sprawność całkowita (elektryczna + cieplna) może osiągać wartości ok. 85–90% przy efektywnym zagospodarowaniu ciepła [Hakawati 2017; Centrica 2018; Biogas-CHP 2024].

Z perspektywy środowiskowej szczególną uwagę zwraca się na emisje fugitywne metanu w całym łańcuchu dostaw biogazu i biometanu. Nawet pozornie niewielkie procentowo straty mogą istotnie pogorszyć bilans klimatyczny, ponieważ metan ma wysoką wartość potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (GWP). W analizach regulacyjnych i porównawczych spotyka się m.in. podejście, w którym do oceny klimatycznej stosowane jest $GWP = 25 \text{ kg CO}_2\text{e/kg CH}_4$ (wskazywane w kontekście założeń dla RED II) [Hurtig 2025].

Jednocześnie w literaturze dotyczącej silników wskazuje się, że pogorszenie jakości biogazu (np. wahania składu, obecność zanieczyszczeń, wahania liczby metanowej) może utrudniać spełnienie rygorystycznych limitów emisji NO_x (np. rzędu 100 mg/Nm³ w wybranych reżimach regulacyjnych), jeśli nie zostaną zastosowane techniki katalizacyjne i właściwe uzdatnianie paliwa [Laskowski 2025].

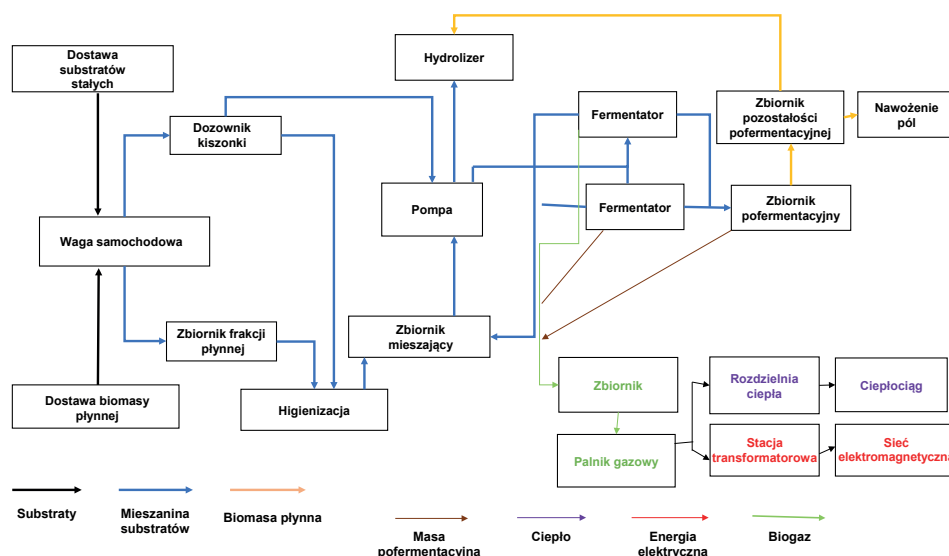
Obiekt i granice analizy

Analizę przeprowadzono dla biogazowni rolniczej małej mocy, ok. 100 kW, zaprojektowanej w układzie obejmującym przygotowanie wsadu (m.in. hydrolizer), fermentację, magazynowanie i uzdatnianie biogazu oraz konwersję w agregacie kogeneracyjnym. Łańcuch logistyczny ujęto jako sekwencję działań obejmującą: gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie/dozowanie, fermentację, uzdatnianie, CHP.

Granice systemu dla rachunku wpływu logistyki obejmują:

- transport substratów do instalacji,
- magazynowanie substratów (czas i warunki),
- operacje przeładunkowe i przygotowanie wsadu,
- magazynowanie/obsługę pofermentu (jako element logistyczny wyjścia z procesu),
- straty metanu w instalacji i magazynach (scenariuszowo),
- wytwarzanie energii w CHP (część energetyczna bilansu).

Jednostką odniesienia bilansu energetycznego jest MWh/rok (brutto i netto), natomiast bilansu klimatycznego t CO₂e/rok (oraz pomocniczo t CO₂e/MWh netto).



Rysunek 2. Schemat technologii wytwarzania biogazu i CHP

Figure 2. Schematic diagram of biogas and CHP production technology

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W ramach niniejszego opracowania rozróżniono:

- elementy ujęte w rachunku ilościowym: (1) potencjał energetyczny i moc teoretyczna CHP na podstawie rocznego uzysku CH_4 i czasu pracy, (2) emisje CO_2 z transportu substratów wyznaczone metodą aktywnościową (praca przewozowa $\rightarrow$ zużycie paliwa $\rightarrow$ emisje), (3) emisje CO_2 e wynikające ze strat CH_4 (scenariuszowo) oraz odpowiadająca im utrata energii elektrycznej netto;
- elementy opisane jakościowo: wpływ zmienności jakości biogazu na ryzyko wzrostu emisji spalin (CO , NO_x , THC/VOC) oraz konsekwencje organizacji logistyki pofermentu w aspekcie liczby kursów i ryzyka emisyjnego.

Wariant technologiczno-logistyczny oparto na mieszaninie substratów: kiszonka kukurydzy, wywar gorzelniany, wysłodki buraczane, melasa buraczana, serwatka. W projekcie przyjęto pracę przez 8000 h w roku, przy przerwach stanowiących ok. 3% czasu rocznego (konserwacje, awarie, przerwy technologiczne).

Przyjęto następujące roczne ilości wsadu i potencjał wytwarzania gazu dla wariantu odpowiadającego mocy ok. 100 kW:

- łączny wsad: 3580 t/rok,
- uzysk biogazu: 610 000–759 000 m^3/rok ,
- uzysk metanu: 200 660–238 536 $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{rok}$,
- wartość opałowa metanu: 9,97 kWh/Nm^3 ,
- sprawność elektryczna układu: 40%.

Tabela 1. Parametry przyjęte do obliczeń oraz przeliczeń emisji CO₂eTable 1. Parameters adopted for calculations and assumptions for CO₂e emission calculations

Parametr	Wartość	Jednostka
Roczny uzysk CH ₄ (min)	200 660	m ³ /rok
Roczny uzysk CH ₄ (max)	238 536	m ³ /rok
Czas pracy	8000	h/rok
Produkcja energii el. brutto	800	MWh/rok
Zużycie własne energii el.	0,08	–
Produkcja energii el. netto	736	MWh/rok
Gęstość CH ₄	0,716	kg/m ³
GWP dla CH ₄	25	kg CO ₂ e/kg CH ₄

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W zakresie logistyki dostaw przyjęto następujące odległości kontraktowe (krótkie łańcuchy dostaw):

- kiszonka: do 5 km,
- serwatka: 3 km,
- wysłodki i melasa: ok. 1 km,
- wywar: ok. 10 km.

Analiza przepływu energii od surowca do końcowego wykorzystania w silniku tłokowym

W celu wyznaczenia potencjału energetycznego instalacji i oszacowania teoretycznej mocy elektrycznej agregatu kogeneracyjnego zastosowano bilans oparty na rocznym uzysku metanu oraz czasie pracy jednostki. W pierwszym kroku obliczono średni godzinowy uzysk metanu:

$$U_{\text{CH}_4, \text{h}} = R_{\text{CH}_4} / t_r$$

gdzie:

 $U_{\text{CH}_4, \text{h}}$ – średni strumień objętościowy metanu [m³ CH₄/h], R_{CH_4} – roczny uzysk metanu [m³ CH₄/rok], t_r – czas pracy agregatu w ciągu roku [h/rok].

Teoretyczna moc elektryczna prądnicy:

$$P_{el} = U_{\text{CH}_4, \text{h}} \cdot LHV_{\text{CH}_4} \cdot \eta_{el}$$

gdzie:

 P_{el} – teoretyczna moc elektryczna [kW], LHV_{CH_4} – wartość opałowa metanu [kWh/Nm³], η_{el} – sprawność elektryczna układu [–].

W celu przeprowadzenia porównania z założeniami projektowymi wyznaczono roczną produkcję energii elektrycznej brutto i netto:

$$E_{el,brutto} = P_{el} \cdot t_r$$

$$E_{el,netto} = E_{el,brutto} \cdot (1 - u_{własne})$$

gdzie:

$E_{el,brutto}$ – energia elektryczna brutto [MWh/rok],

$E_{el,netto}$ – energia elektryczna netto [MWh/rok],

$u_{własne}$ – udział zużycia własnego energii elektrycznej [–].

Model wpływu logistyki na emisje

Emisje transportowe (CO_2) oszacowano, wykorzystując metodę aktywnościową, w ramach której emisje są funkcją pracy przewozowej i zużycia paliwa:

$$N_{kurs} = M_{rok}/m_{ład}$$

$$D_{rok} = N_{kurs} \cdot 2 \cdot d$$

$$V_{ON} = D_{rok} \cdot c_{ON}$$

$$E_{CO_2,trans} = V_{ON} \cdot EF_{CO_2,ON}$$

gdzie:

N_{kurs} – liczba kursów w ciągu roku [–],

M_{rok} – masa transportowanego materiału w ciągu roku [t/rok],

$m_{ład}$ – ładowność użyteczna pojazdu [t/kurs],

D_{rok} – roczny przebieg [km/rok],

d – odległość w jedną stronę [km],

V_{ON} – zużycie oleju napędowego [l/rok],

c_{ON} – jednostkowe zużycie paliwa [l/km],

$EF_{CO_2,ON}$ – współczynnik emisji CO_2 dla ON [kg CO_2 /l],

$E_{CO_2,trans}$ – emisja CO_2 z transportu [kg CO_2 /rok] (lub po przeliczeniu t/rok).

W obliczeniach przyjęto przejazd „tam i z powrotem” ($2 \cdot d$) oraz stałe zużycie paliwa c_{ON} jako przybliżenie warunków eksploatacyjnych. Straty metanu (emisje fugitywne) ujęto scenariuszowo jako udział procentowy utraconego metanu w stosunku do wyprodukowanego R_{CH_4} . Do oceny klimatycznej przyjęto współczynnik GWP = 25 kg CO_2 e/kg CH_4 , stosowany w założeniach porównawczych dotyczących sektora biogazu [Hurtig 2025].

Emisje spalin (CO , NO_x , THC/VOC) opisano jakościowo, wskazując na ryzyko ich wzrostu w warunkach pogorszonej jakości biogazu, odnosząc się do zaleceń literatury dotyczącej silników i wymagań dotrzymania limitów przy zastosowaniu technik katalitycznych lub bez nich [Laskowski 2025].

W obliczeniach emisji transportowych przyjęto jednostkowe zużycie oleju napędowego $c_{ON} = 0,30$ l/km oraz współczynnik emisji $EF_{CO_2,ON} = 2,68$ kg CO₂/l na podstawie publikacji [Ministry for the Environment 2024], co dla wariantu logistycznego I odpowiada emisji z transportu rzędu 0,90 t CO₂/rok.

Potencjał energetyczny i zgodność z mocą projektową

Dla zakresu $R_{CH_4} = 200\ 660\text{--}238\ 536$ m³ CH₄/rok i $t_r = 8000$ h/rok uzyskano:

- $U_{CH_4,h} = 25,0825\text{--}29,8170$ m³ CH₄/h,
- $P_{el} = 100,03\text{--}118,91$ kW (dla $LHV_{CH_4} = 9,97$ kWh/Nm³ oraz $\eta_{el} = 0,40$).

Otrzymane zakresy są spójne z założeniem biogazowni małej mocy (ok. 100 kW) i wskazują na wrażliwość mocy na zmienność uzysku metanu, która jest w praktyce powiązana z logistyką wsadu (terminowość dostaw, homogenizacja, warunki magazynowania).

W analizowanym wariancie przyjęto krótkie dystanse dostaw substratów (1–10 km), co ogranicza wielkość rocznej pracy przewozowej. W celu oszacowania rzędu wielkości emisji CO₂ z transportu zastosowano podejście aktywnościowe opisane wcześniej.

Dla łącznej masy wsadu $M_{rok} = 3580$ t/rok oraz założonej ładowności $m_{lad} = 20$ t/kurs liczba kursów wynosi:

$$N_{kurs} = 3580/20 \approx 179 \text{ kursów/rok}$$

Roczny przebieg zależy od średniego dystansu dostaw d . Dla lokalnego modelu zaopatrzenia (odległości kontraktowe 1–10 km) przyjęcie średniej odległości rzędu kilku kilometrów prowadzi do:

$$D_{rok} = N_{kurs} \cdot 2 \cdot d$$

co daje przebieg rzędu 10³ km/rok (np. przy $d \approx 3$ km: $D_{rok} \approx 179 \cdot 2 \cdot 3 = 1074$ km/rok).

Zużycie paliwa wyznacza się jako:

$$V_{ON} = D_{rok} \cdot c_{ON}$$

a emisję CO₂ jako:

$$E_{CO_2,trans} = V_{ON} \cdot EF_{CO_2,ON}$$

Z powyższego wynika, że przy krótkich dystansach dostaw emisje CO₂ z transportu mają charakter drugorzędny względem emisji CO₂e wynikających ze strat CH₄, natomiast transport pozostaje istotny operacyjnie z perspektywy terminowości dostaw i stabilizacji wsadu. Jednocześnie należy podkreślić, że komponentem logistycznym o potencjalnie większym znaczeniu może być dystrybucja pofermentu (zależna od odległości pól, sezonowości i organizacji odbioru), która w ujęciu rocznym może generować większą liczbę kursów niż dowóz części substratów płynnych.

Analiza literatury wskazuje, że emisje metanu z biogazowni (w tym z magazynowania, operacji i nieszczelności) mogą istotnie wpływać na bilans gazów cieplarnianych [Liebetrau 2017; Buffi 2024].

Dla rozpatrywanego zakresu produkcji metanu przeprowadzono rachunek scenariuszowy strat:

- scenariusz A (logistyka zoptymalizowana): straty $\text{CH}_4 = 1\%$ rocznej produkcji,
- scenariusz B (logistyka nieoptymalna): straty $\text{CH}_4 = 5\%$ rocznej produkcji (np. dłuższe magazynowanie, gorsza hermetyzacja, większe emisje fugitywne).

Tabela 2. Porównanie scenariuszy logistycznych – strata metanu, energia elektryczna netto oraz emisje CO_2e (wariant MIN)

Table 2. Comparison of logistics scenarios – methane loss, net electricity and CO_2e emissions (MIN variant)

Scenariusz	Strata CH_4 [%]	Strata CH_4 [m^3/rok]	Energia el. netto [MWh/rok]	Emisje CO_2e z CH_4 [t/rok]
A – bazowy	1,0	2006,6	728,6	35,9
B – wydłużone magazynowanie	5,0	10033,0	699,2	179,6
C – hermetyzacja	1,5	3009,9	725,0	53,9
D – LDAR + uszczelnienia	0,8	1605,3	730,1	28,7

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Przykładowe skutki (dla dolnego zakresu $R_{\text{CH}_4} = 200\ 660\ \text{m}^3/\text{rok}$, gęstość $\text{CH}_4 \sim 0,716\ \text{kg}/\text{Nm}^3$):

- 1% strat: ok. 35,9 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{rok}$ oraz utrata ok. 8,0 MWh/rok energii elektrycznej (w przeliczeniu na $\eta_{el} = 40$),
- 5% strat: ok. 179,6 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{rok}$ oraz utrata ok. 40,0 MWh/rok energii elektrycznej.

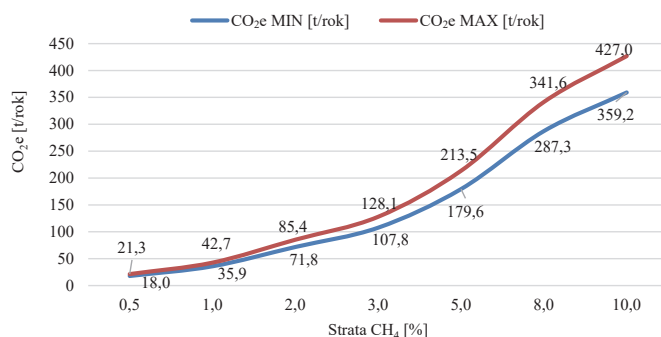
Tabela 3. Zależność emisji CO_2e od poziomu strat metanu w logistyce i magazynowaniu (wariant MIN/MAX uzysku CH_4)

Table 3. Dependence of CO_2e emissions on the level of methane losses in logistics and storage (MIN/MAX variant of CH_4 yield)

Strata CH_4 [%]	CO_2e MIN [t/rok]	CO_2e MAX [t/rok]
0,5	18,0	21,3
1,0	35,9	42,7
2,0	71,8	85,4
3,0	107,8	128,1
5,0	179,6	213,5
8,0	287,3	341,6
10,0	359,2	427,0

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration



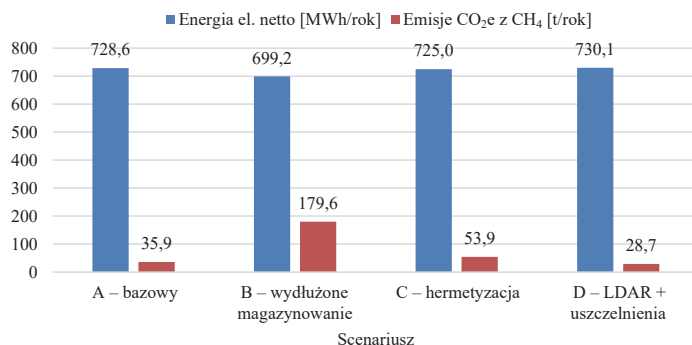
Rysunek 3. Zależność emisji CO₂e od poziomu strat metanu w logistyce i magazynowaniu

Figure 3. Dependence of CO₂e emissions on the level of methane losses in logistics and storage

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Oznacza to, że nawet przy lokalnych dostawach straty metanu mogą mieć dominujący wpływ klimatyczny związany z logistyką i obsługą procesu, znacznie przewyższający emisję z transportu. Jest to zgodne z wnioskami z prac przeglądowych dotyczących znaczenia wycieków metanu w łańcuchu biogazu/biometanu [Hurtig 2025].



Rysunek 4. Porównanie scenariuszy logistycznych A–D: energia elektryczna netto oraz emisje CO₂e

Figure 4. Comparison of logistics scenarios A–D: net electricity and CO₂e emissions

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Jakość biogazu a emisje spalin silnika tłokowego

W zakresie emisji spalin agregatów CHP kluczowe są: NO_x, CO, niespalone węglowodory (w tym metan), a w niektórych przypadkach także formaldehyd. Literatura dotycząca silników wskazuje, że dotrzymanie ostrych limitów NO_x bywa w praktyce trudne, jeśli nie zastosuje się odpowiednich technik (np. katalitycznych) oraz nie dysponuje stabilnym paliwem gazowym [Laskowski 2025].

Logistyka wpływa na proces spalania następująco:

- Zmienność składu wsadu i szybkości hydrolizy (np. brak homogenizacji, wahania suchej masy) powoduje wahania produkcji biogazu i udziału CH_4 , co przekłada się na zmienną moc i parametry spalania.
- Wydłużony czas magazynowania substratów może zwiększać udział frakcji łatwo rozkładalnej zużywanej przed fermentacją właściwą oraz sprzyjać procesom niepożądanym (np. tlenowym), co zmniejsza uzysk metanu i stabilność.
- Niewystarczające uzdatnianie zależne od jakości paliwa i związane z tym wahania wilgotności i zanieczyszczeń zwiększają ryzyko korozji i pogorszenia sprawności oraz mogą wymuszać zmianę nastaw silnika, co sprzyja wzrostowi CO i THC.

W efekcie logistyka, pomimo że nie jest bezpośrednio częścią procesu spalania, kształtuje warunki jego przebiegu, wpływając na stabilność pracy, skład paliwa oraz wymagany stopień uzdatniania. Aby powiązać logistykę z ryzykiem emisyjnym w sposób bardziej operacyjny, można zastosować prostą analizę wrażliwości opartą na zmianie wartości opałowej paliwa gazowego. Jeśli w wyniku nieoptymalnej logistyki spada udział CH_4 w biogazie, maleje jego wartość opałowa LHV, a w celu utrzymania stałej mocy agregatu rośnie wymagany strumień objętościowy gazu i częściej występują stany przejściowe regulacji, obejmujące zmiany dawki paliwa oraz współczynnika nadmiaru powietrza. Z punktu widzenia procesu spalania zwiększa to ryzyko wzrostu CO i THC/VOC w momentach niedopalenia oraz wahań emisji NO_x wynikających ze zmiennej temperatury płomienia. Działania logistyczne należy zatem traktować jako element zarządzania jakością paliwa (stabilność LHV i składu), a nie wyłącznie jako etap pomocniczy procesu technologicznego.

Dyskusja

Uzyskane wyniki wskazują, że w biogazowniach działających w modelu lokalnym (krótkie dystanse dostaw) potencjał redukcji emisji CO_2 związanych wyłącznie z transportem jest ograniczony. Wynika to z relatywnie małej skali pracy przewozowej w ciągu roku oraz faktu, że w całym systemie większą rolę odgrywają procesy zachodzące przy magazynowaniu i obsłudze technologicznej, w szczególności straty metanu. Oznacza to, że działania optymalizacyjne powinny koncentrować się nie na transporcie, lecz na elementach logistyki, które wpływają na utratę potencjału metanowego wsadu, stabilność fermentacji oraz szczelność toru biogazu.

Najistotniejszym punktem krytycznym jest magazynowanie substratów płynnych i stałych. Wydłużony czas składowania może powodować degradację frakcji łatwo fermentującej jeszcze przed jej podaniem do fermentora, co skutkuje obniżeniem uzysku metanu i pogorszeniem wydajności energetycznej. Dodatkowo magazyny stanowią potencjalne źródło emisji fugitywnych, zwłaszcza przy braku hermetyzacji i właściwej organizacji dostaw. Z tego względu wariant projektowy zakładający brak dużych magazynów (co wynika z bliskości źródeł substratów) należy interpretować jako rozwiązanie ograniczające ryzyko strat energii i emisji. W praktyce uzasadnione jest stosowanie krótkookresowych zbiorników wyrównawczych (buforów) wspierających ciągłość dozowania, ale bez wprowadzania długotrwałego składowania.

Drugim obszarem o dużym znaczeniu są operacje przeładunkowe oraz przygotowanie wsadu. Pomimo charakteru pomocniczego etap ten decyduje o jednorodności mieszaniny i stabilności obciążenia organicznego w czasie. Brak homogenizacji zwiększa wahania parametrów procesu, co może prowadzić do zmienności składu biogazu i wahań mocy agregatu CHP. Niestabilne paliwo sprzyja stanom przejściowym spalania, w których rośnie ryzyko wzrostu emisji CO i niespalonych węglowodorów, a także wahań emisji NO_x. Tym samym logistyka wsadu poprzez jakość i powtarzalność biogazu oddziałuje pośrednio na emisję spalin.

Trzecim kluczowym elementem jest szczelność instalacji gazowej i magazynów. Nieszczelności powodują jednocześnie utratę paliwa i istotny wzrost oddziaływania klimatycznego, dlatego działania utrzymaniowe odnoszą wysoki efekt jednostkowy. Rekomendowane jest wdrożenie systematycznych przeglądów szczelności (LDAR) oraz rejestru usterek i czasu reakcji. W warunkach eksploatacyjnych jest to jedno z najbardziej efektywnych działań ograniczających emisję, niewymagające kosztownych modernizacji technologicznych.

Czwartym, często niedoszacowanym obszarem jest logistyka pofermentu. Organizacja odbioru i aplikacji determinuje czas magazynowania oraz ryzyko emisji wtórnych i uciążliwości odorowych. W układach lokalnych, gdzie transport substratów ma małe znaczenie emisyjne, to właśnie poferment może generować większą liczbę kursów oraz wymuszać długie sezonowe magazynowanie. Zintegrowanie harmonogramu odbioru pofermentu z planem pracy instalacji i serwisem ogranicza przestoje i redukuje ryzyko wystąpienia sytuacji awaryjnych, które sprzyjają emisjom ucieczkowym.

W ujęciu operacyjnym zaleca się:

- wdrożenie procedur kontroli jakości dostaw (sucha masa, pH, zawartość substancji organicznej),
- planowanie buforów logistycznych minimalizujących przestoje bez nadmiernego składowania,
- cykliczne przeglądy szczelności (LDAR) toru biogazu,
- uporządkowanie logistyki pofermentu poprzez optymalizację harmonogramu odbioru i ograniczanie czasu magazynowania.

Wskazane działania są spójne z podejściem, w ramach którego redukcja strat metanu i stabilizacja jakości biogazu stanowią główną dźwignię poprawy bilansu zarówno energetycznego, jak i emisyjnego instalacji.

Podsumowanie i wnioski

Analiza przeprowadzona dla biogazowni rolniczej małej mocy (ok. 100 kW) potwierdza, że przy rocznym uzysku metanu na poziomie 200 660–238 536 m³ CH₄ i założonym czasie pracy 8000 h/rok instalacja może zapewnić średni strumień metanu rzędu 25,08–29,82 m³ CH₄/h. W przeliczeniu na konwersję w układzie kogeneracyjnym oznacza to teoretyczną moc elektryczną 100,03–118,91 kW, przy wartości opałowej metanu 9,97 kWh/Nm³ i sprawności elektrycznej 40%. Wyniki te potwierdzają spójność przyjętych parametrów projektowych z zakładaną klasą mocy oraz wskazują, że stabilność uzysku metanu jest kluczowym warunkiem utrzymania przewidywalnej produkcji energii.

W warunkach lokalnego modelu zaopatrzenia, tj. krótkich dystansów dostaw substratów, emisje CO₂ związane z transportem stanowią relatywnie niewielką część całkowitego oddziaływania logistycznego. Oznacza to, że nawet dalsza optymalizacja tras czy organizacji przewozów może mieć ograniczony efekt środowiskowy w porównaniu z działaniami ukierunkowanymi na ograniczanie strat gazu i stabilizację procesu. Transport pozostaje jednak istotny z perspektywy ciągłości dostaw i powtarzalności wsadu, a więc pośrednio wpływa na parametry fermentacji i jakość biogazu.

Największe znaczenie dla bilansu klimatycznego i energetycznego mają straty metanu powstające na etapach magazynowania i obsługi procesu, ponieważ CH₄ stanowi zarówno podstawowy nośnik energii dla agregatu CHP, jak i gaz o wysokim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego. Analiza scenariuszowa pokazuje, że wzrost strat rocznej produkcji CH₄ z 1 do 5% przekłada się na skokowy wzrost obciążenia klimatycznego (rzędu dziesiątek, a nawet setek ton CO₂e) oraz zauważalną utratę możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. W praktyce oznacza to, że nawet niewielkie pogorszenie warunków magazynowania, wzrost nieszczelności lub nieoptymalne procedury operacyjne mogą istotnie obniżyć efektywność całego systemu, w większym stopniu niż czynniki transportowe.

Logistyka oddziałuje również pośrednio na emisje spalin silnika, ponieważ wpływa na stabilność i jakość biogazu. Zmienność udziału CH₄, wahania wilgotności oraz obecność zanieczyszczeń mogą prowadzić do niestabilności spalania, a tym samym zwiększać ryzyko wzrostu emisji CO, NO_x i niespalonych węglowodorów oraz utrudniać spełnienie wymagań emisyjnych bez zastosowania dodatkowych technik oczyszczania spalin [Laskowski 2025]. Tym samym działania logistyczne powinny być traktowane jako element zarządzania jakością paliwa, a nie wyłącznie jako etap pomocniczy procesu technologicznego.

W świetle uzyskanych wyników za kluczowe dla poprawy efektywności i ograniczenia emisji należy uznać rozwiązania organizacyjno-techniczne skoncentrowane na: skracaniu czasu magazynowania substratów, hermetyzacji zbiorników i ograniczaniu emisji fugitywnych, systematycznym monitoringu szczelności toru biogazu oraz stabilizacji parametrów paliwa gazowego poprzez osuszanie i odsiarczanie. Uzupełnieniem tych działań powinna być racjonalna organizacja logistyki pofermentu, ponieważ jego sposób odbioru, magazynowania i aplikacji wpływa zarówno na koszty operacyjne, jak i ryzyko emisji wtórnych. W konsekwencji optymalizacja łańcucha logistycznego – rozumiana jako spójne zarządzanie dostawami wsadu, warunkami magazynowania, przygotowaniem mieszaniny i utrzymaniem szczelności instalacji – stanowi jeden z najskuteczniejszych sposobów zwiększania efektywności energetycznej biogazowni oraz ograniczania jej oddziaływania środowiskowego.

Bibliografia

- BIOGAS-CHP, 2024: CHP brochure [dane katalogowe jednostek i sprawności], materiały katalogowe producenta.
- Buffi M., Hurtig O., Scarlat N., 2024: Methane emissions in the biogas and biomethane supply chains in the EU: An analysis to update the greenhouse gas emissions accounting methodology of Renewable Energy Directive Annex VI. EUR 40129, JRC139485, Publications Office of the European Union, Luxembourg, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139485/JRC139485_01.pdf [dostęp: 03.01.2026].

- Centrica Business Solutions, 2018: The essential guide to small scale combined heat and power, https://www.centricabusinesssolutions.com/sites/g/files/qehiga126/files/GDE%2001%20ENER-G%20Essential%20Guide%20to%20CHP_01_v5%20%281%29.pdf [dostęp: 03.01.2026].
- European Commission, b.d.: Biogas – Knowledge for Policy [definicja, skład i zakres LHV biogazu], https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/biogas_en [dostęp: 03.01.2026].
- Hakawati R., Smyth B.M., McCullough G., De Rosa F., Rooney D., 2017: What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport? *Applied Energy* 206, 1076–1087, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.068>
- Hurtig O., Buffi M., Besseau R., Scarlat N., Carbone C., Agostini A., 2025: Mitigating biomethane losses in European biogas plants: A techno-economic assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 210, 115187.
- Laskowski P., Wojs M., Wiśniowski P., Zimakowska-Laskowska M., Kozłowski E., 2025: Biogas-fuelled internal combustion engines for micro-scale energy generation: A review of technologies and configurations for systems below 50 kW, *Combustion Engines*, online first, <https://doi.org/10.19206/CE-208913>
- Liebetrau J., Reinelt T., Agostini A., Linke B., 2017: Methane emissions from biogas plants: Methods for measurement, results and effect on greenhouse gas balance of electricity produced (IEA Bioenergy Task 37), https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Methane-Emission_web_end_small.pdf [dostęp: 03.01.2026].
- Materiały źródłowe, b.d.: Dokumentacja projektowa biogazowni rolniczej małej mocy 100 kW [tabele wsadu, uzyski biogazu/metanu, założenia pracy 8000 h/rok], materiały niepublikowane.
- Ministry for the Environment, 2024: Measuring emissions: A guide for organisations: 2024 detailed guide. Ministry for the Environment, New Zealand, Wellington, https://environment.govt.nz/assets/publications/Measuring-Emissions-2024/Measuring-emissions_Detailed-guide_2024_ME1829.pdf [dostęp: 03.01.2026].

Grzegorz Dzieniszewski¹✉, Damian Jasiejko²

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Politechnika Rzeszowska

² Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

Ocena wpływu utylizacji bioodpadów metodą spalania w silnikach tłokowych na ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko z perspektywy łańcucha logistycznego produkcji biogazu

Assessment of the environmental impact reduction from the utilization of bio-waste via combustion in reciprocating engines from the perspective of the biogas production logistics chain

Synopsis. Celem artykułu jest ocena wpływu organizacji łańcucha logistycznego bioodpadów i substratów pochodzenia zwierzęcego na oddziaływanie środowiskowe instalacji biogazowej wykorzystującej biogaz w układzie kogeneracyjnym z silnikiem tłokowym. Zastosowano podejście procesowe „od logistyki do CHP”, w ramach którego procesy gromadzenia, transportu, magazynowania i przygotowania wsadu są analizowane jako czynniki kształtujące jakość paliwa biogazowego oraz warunki pracy jednostki kogeneracyjnej. Wskazano mechanizmy, przez które zmienność i degradacja wsadu na etapach logistycznych mogą przekładać się na stabilność produkcji biogazu oraz na parametry spalania, w tym emisje regulowane i istotne technologicznie dla silników biogazowych (NO_x, CO, związki organiczne/THC oraz metan niespalony). Omówiono również wymagania dotyczące normalizacji warunków odniesienia i interpretacji wyników emisji dla średnich źródeł spalania. Wyniki zestawiono w postaci kryteriów zarządczych i działań operacyjnych, które łączą reżim jakości logistyki (szczelność, czas retencji, homogenizacja i stabilizacja surowca) z utrzymaniem stabilnej pracy CHP i wysokiej sprawności wykorzystania energii oraz ograniczaniem oddziaływań środowiskowych.

✉ **Grzegorz Dzieniszewski** – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; Politechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny; e-mail: g.dzieniszewski@pansp.pl; <https://orcid.org/0000-0002-2712-1131>

Damian Jasiejko – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; e-mail: d.jasiejko@s.pansp.pl

Słowa kluczowe: kogeneracja (CHP), silnik tłokowy, metan niespalony, normalizacja emisji, MCP

Abstract. This paper assesses how the logistics chain of animal-derived bio-waste and feedstocks affects the environmental performance of biogas production and its utilization in a combined heat and power (CHP) unit based on a reciprocating engine. A process-oriented “logistics-to-CHP” framework is applied, where collection, transport, storage, and pre-treatment are treated as factors shaping biogas fuel quality and CHP operating conditions. The study highlights mechanisms by which logistics-driven variability and degradation of feedstock may influence biogas yield stability and combustion behavior, including compliance-relevant and technology-critical emissions from biogas engines (NO_x , CO, organic compounds/THC and methane slip). Emission interpretation is discussed with respect to reference-condition normalization and regulatory context for medium combustion plants. Results are summarized as operational criteria and management measures linking logistics quality control (tightness, residence time, homogenization, and stabilization) with stable CHP operation, high energy-use efficiency, and reduced environmental impacts.

Keywords: CHP, reciprocating engine, methane slip, emission normalization, MCP

Kody JEL: Q42, Q53, Q56, L91, R41

Wstęp

Utylizacja bioodpadów pochodzenia zwierzęcego stanowi jedno z kluczowych wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze rolno-spożywczym. Odpady takie jak gnojowica, obornik, odpady poubojowe czy frakcje poprodukcyjne charakteryzują się znaczną zmiennością składu, podatnością na rozkład biologiczny oraz potencjałem do generowania emisji odorów i gazów cieplarnianych w przypadku niewłaściwego postępowania. Jednocześnie materia organiczna może zostać przekształcona w nośnik energii w procesie fermentacji beztlenowej, której produktem jest biogaz o zawartości metanu rzędu 55–65% [Żygadło i Madejski 2016].

W praktyce przemysłowej dominującym sposobem zagospodarowania biogazu jest jego wykorzystanie energetyczne w silnikach tłokowych w układzie CHP, tj. skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Wysoka sprawność całkowita kogeneracji, osiągana dzięki odzyskowi ciepła ze spalin i układu chłodzenia, tworzy istotną przewagę środowiskową w porównaniu z rozproszonym wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła w oddzielnych źródłach [Podziemska 2005; Olajossy 2008]. Dla biogazowni rolniczych szczególnie ważne jest wykorzystanie ciepła na potrzeby własne procesu oraz w lokalnym otoczeniu. W praktyce oznacza to, że realny efekt ekologiczny zależy nie tylko od sprawności urządzeń wytwórczych, ale także od zdolności systemu do stabilnej pracy w ciągu całego roku oraz ograniczenia strat energii chemicznej w łańcuchu dostaw substratów.

Z perspektywy inżynierii systemów środowiskowych łańcuch logistyczny bioodpadów należy traktować jako obszar generowania zarówno strat energetycznych, jak i emisji procesowych. Dotyczy to zwłaszcza strat metanu wynikających z niekontrolowanej fermentacji w fazie magazynowania, emisji z gospodarki pofermentem oraz degradacji wartości energetycznej substratu spowodowanej niewłaściwym przygotowaniem i składowaniem (np. niewłaściwe kiszenie surowców roślinnych lub zbyt długi czas przechowywania frakcji płynnych) [Liebetrau 2017]. Należy podkreślić, że przykrycie silosu folią ogranicza wypłukiwanie związków organicznych i spadek wartości energetycznej substratu, a związane z tym nakłady zwracają się w krótkim czasie dzięki ograniczeniu strat [Król i in. 2016]

Celem artykułu jest ocena wpływu organizacji i jakości realizacji procesów logistycznych bioodpadów na efektywność ekologiczno-energetyczną układu produkcji biogazu i jego wykorzystania w silniku tłokowym, ze wskazaniem etapów krytycznych i działań optymalizacyjnych. Dodatkowym celem jest ocena wpływu zmienności jakości biogazu na warunki spalania i ryzyko przekroczeń emisji regulowanych (NO_x , CO, THC/ CH_4 slip) w jednostce CHP, interpretowanych dla znormalizowanych warunków odniesienia.

Przegląd literatury

Analiza literatury wskazuje, że środowiskowa ocena biogazowni wymaga uwzględnienia co najmniej trzech grup oddziaływań: (1) korzyści z unieszkodliwienia odpadów i ograniczenia emisji w scenariuszu referencyjnym (np. magazynowanie gnojowicy), (2) emisji procesowych w trakcie wytwarzania biogazu i zagospodarowania pofermentu oraz (3) emisji związanych z wykorzystaniem energetycznym biogazu i zastąpieniem paliw kopalnych. Analiza cyklu życia w odniesieniu do biogazu wykorzystywana jest od wielu lat do oceny bilansu energetycznego i emisyjnego [Berglund i Borjesson 2006], a prace przeglądowe porządkują aktualny stan wiedzy dotyczący kategorii oddziaływań i najczęstszych źródeł niepewności [Paolini 2018].

W ostatnich latach szczególną uwagę zwraca się na emisje metanu w całym łańcuchu biogazowym, bo mimo że występuje on w mniejszych ilościach niż CO_2 , ma znacznie większy potencjał tworzenia efektu cieplarnianego. Aktualne zestawienia współczynników GWP100 dla CH_4 (wg IPCC AR6) są wykorzystywane do przeliczeń jego emisji na ekwiwalent CO_2 i wskazują, że wybór horyzontu czasowego oraz ujęcie sprzężeń klimatyczno-węglowych mają znaczenie dla wyników raportowania [IPCC 2021]. W badaniach empirycznych wykazano, że magazynowanie pofermentu może stanowić istotne źródło emisji CH_4 ; w jednym z szeroko cytowanych pomiarów emisje metanu ze składowania pofermentu osiągnęły poziom odpowiadający ok. 12% produkcji metanu w fermentorze, co jednoznacznie wskazuje na znaczenie gospodarki pofermentem w systemie ograniczania emisji [Baldé 2016]. Autorzy nowszych prac wskazują czynniki emisji zależne od technologii i komponentów instalacji, co wspiera identyfikację „węzłów” o największym potencjale redukcyjnym [Wechselberger 2023].

W literaturze podkreśla się również, że straty metanu mogą powstawać nie tylko w instalacji fermentacyjnej, ale także w strumieniach pomocniczych (odgazowanie, odpowietrzanie, nieszczelności, awaryjne upusty ciśnienia) oraz w obszarze uzdatniania biogazu [Liebetrau 2017]. W ujęciu regulacyjnym ważne są wymagania dotyczące emisji z silników gazowych jako średnich źródeł spalania oraz konieczność utrzymania stężeń zanieczyszczeń w przeliczeniu na znormalizowane warunki odniesienia. Dyrektywa dotycząca średnich źródeł spalania wprowadza wartości graniczne emisji m.in. dla NO_x , a dokumenty interpretacyjne precyzują warunki odniesienia tlenu i parametry normalizacji [Dyrektywa 2015].

Od strony logistycznej literatura i raporty branżowe wskazują, że zawartość suchej masy, stabilność mikrobiologiczna, czas przechowywania i warunki magazynowania wpływają na dostępność frakcji biodegradowalnej i w konsekwencji na uzysk metanu [Angelidaki i Ahring 2000; Curkowski 2011].

Należy również zwrócić uwagę na rolę infrastruktury magazynowej (silosy, zbiorniki na substraty i poferment) oraz na konieczność rozdzielania substratów o różnej uciążliwości zapachowej i ryzyku emisji. Z perspektywy projektowania instalacji podkreśla się konieczność uwzględnienia dostępności surowca, systemu logistyki transportu oraz lokalnych możliwości wykorzystania ciepła i energii elektrycznej [Grzybek 2024].

Założenia i zakres

Jako jednostkę odniesienia przyjęto 1 kWh energii elektrycznej wytworzonej w układzie CHP. Analizę prowadzono w ujęciu scenariuszowym „od logistyki do CHP”, obejmującym procesy logistyczne substratów, czyli gromadzenie, transport i magazynowanie oraz ich wpływ na emisje transportowe i emisje metanu związane z magazynowaniem i gospodarką pofermentem. Wartości wejściowe przyjęto na podstawie danych i założeń zestawionych w tabeli 1 oraz pokazanych na rysunku 1.

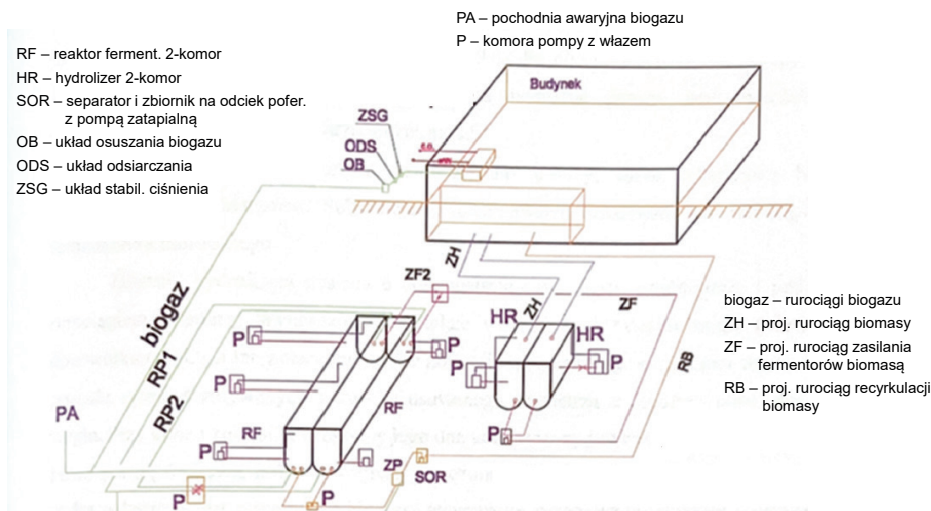
Tabela 1. Zestawienie danych wejściowych i stałych modelu

Table 1. Summary of input data and model constants

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc elektryczna układu CHP (kogeneracja)	100,00	kW
Liczba godzin pracy w roku	8 000,00	h/rok
Roczna produkcja energii elektrycznej	800 000,00	kWh/rok
Sprawność elektryczna	0,38	–
Wartość opałowa (LHV) CH_4	9,97	kWh/Nm ³
Gęstość CH_4 (w warunkach normalnych)	0,72	kg/Nm ³
Współczynnik GWP100 dla CH_4	27,20	kg CO_2 e/kg CH_4
Łączna ilość substratów (mieszanina)	3 580,00	t/rok

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration



Rysunek 1. Schemat technologiczny połączenia rurociągów – biogazownia metanowa

Figure 1. Technological diagram of pipeline connection – methane biogas plant

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Wzory obliczeniowe:

$$(1) E_{el} = P_{el} \cdot t$$

$$(2) tkm = m \cdot d$$

$$(3) CO_{2trans} = tkm \cdot EF_{trans}$$

$$(4) V_{CH_4,avg} = (V_{CH_4,min} + V_{CH_4,max})/2$$

$$(5) CO_{2e}/kWh = CO_{2etot}/E_{el} \text{ oraz wskaźnik logistyczny } CO_{2e}/t = CO_{2etot}/m_{wsadu}$$

Badanie przeprowadzono w logice analizy systemowej, w której instalacja biogazowa (fermentacja – magazyn biogazu – uzdatnianie – CHP) jest sprzężona z łańcuchem logistycznym dostaw substratów oraz z gospodarką pofermentem.

Jego zakres obejmuje:

- charakterystykę odpadów zwierzęcych (gnojowica, obornik oraz odpady pokrewne) i ich potencjału energetycznego,
- opis łańcucha logistycznego (gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie),
- charakterystykę spalania biogazu w silnikach tłokowych wraz z identyfikacją emisji regulowanych i kluczowych emisji procesowych (metan niespalony),

- kryteria oceny środowiskowej (redukcja odpadów, emisje GHG w CO₂e, emisje NO_x i inne zanieczyszczenia),
- analizę scenariuszową pozwalającą wskazać etapy krytyczne i potencjał redukcji.

Charakterystyka substratów i potencjał energetyczny

W artykule skoncentrowano się na substratach typowych dla biogazowni rolniczych, w których dominują odpady zwierzęce, a współsubstraty roślinne lub odpady organiczne pełnią funkcję stabilizującą bilans C/N i zwiększającą produkcję biogazu. Dane literaturowe wskazują, że typowe uzyski biogazu [m³ na tonę świeżej masy] dla gnojowicy bydlęcej i świńskiej są istotnie niższe niż dla kiszonek, co uzasadnia łączenie strumieni i zarządzanie portfelem substratów. Przykładowe zestawienia dotyczące praktyki rolniczej podają wartości rzędu 10–20 m³/t dla gnojowicy bydlęcej oraz 8–20 m³/t dla gnojowicy świńskiej, przy znacznie wyższych uzyskach dla traw i kiszonek. Jednocześnie skład biogazu i udział metanu zależą od rodzaju substratu i warunków procesu (tab. 2), lecz w ujęciu inżynierskim jako wartość wyjściową do bilansów energetycznych przyjmuje się często typowy zakres 55–65% CH₄ [Liebetrau 2017].

Tabela 2. Potencjał substratów i uzysk metanu

Table 2. Substrate potential and methane yield

Substrat	Ilość [t/rok]	Biogaz min [m ³ /rok]	Biogaz max [m ³ /rok]	CH ₄ min [m ³ /rok]	CH ₄ max [m ³ /rok]	CH ₄ średnio [m ³ /rok]	CH ₄ na tonę [m ³ /t]	CH ₄ na godzinę [m ³ /h]
Kiszonka kukurydzy	300	51 000	60 000	27 540	32 400	29 970	99,90	3,75
Wywar gorzelniany	180	18 000	23 400	9 720	12 636	11 178	62,10	1,40
Wysłodki buraczane	600	102 000	120 000	71 400	84 000	77 700	129,50	9,71
Melasa	500	110 000	125 000	77 000	87 500	82 250	164,50	10,28
Serwatka	2 000	30 000	44 000	15 000	22 000	18 500	9,25	2,31
Mieszanina	3 580	610 000	759 000	200 660	238 536	219 598	61,34	27,45

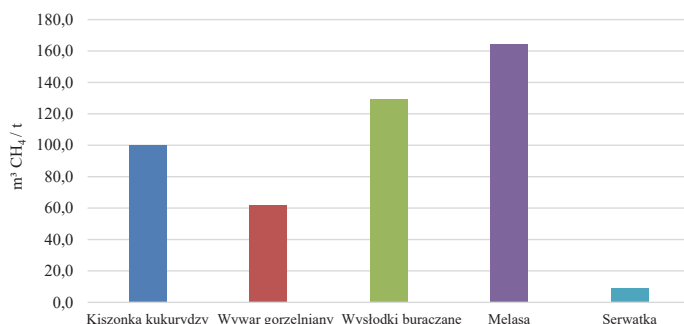
Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Zestawienie potencjału substratów wskazuje, że strumień wsadu charakteryzuje się istotną zmiennością zarówno pod względem ilościowym, jak i energetycznym. W analizowanym zbiorze danych uzysk biogazu i metanu przedstawiono w zakresie min–max, co pozwala uwzględnić naturalne wahania jakości surowca i zmienność warunków dostaw. Wartości przeliczone na jednostkę masy [m³ CH₄/t] stanowią użyteczny wskaźnik logistyczny, ponieważ umożliwiają porównanie „gęstości energetycznej” poszczególnych substratów niezależnie od ich udziału ilościowego. Z punktu widzenia łańcucha logistycznego kluczowe znaczenie ma to, że substraty o wyższym uzysku CH₄/t są bardziej wrażliwe na straty jakości wynikające z magazynowania i opóźnień w dostawie.

wach. Dlatego w praktyce operacyjnej uzasadnione jest priorytetowe traktowanie dostaw substratów o najwyższej „wydajności metanowej” oraz ich możliwie szybkie wprowadzanie do procesu w celu ograniczenia ryzyka spadku produkcji metanu i wahań pracy układu CHP.

Wykres uzysku CH_4 na tonę substratu (rys. 2) obrazuje różnice w potencjale energetycznym wsadów w ujęciu masowym. Taki sposób prezentacji jest szczególnie użyteczny w analizie logistycznej, ponieważ przekłada się bezpośrednio na wymagania transportowe [t/rok], organizację harmonogramu dostaw oraz dobór buforowania. W praktyce umożliwia to identyfikację, które substraty przy tej samej masie przewozu niosą większą „wartość energetyczną” i z tego względu powinny być stabilizowane logistycznie.



Rysunek 2. Uzysk CH_4 na tonę substratu

Figure 2. CH_4 yield per ton of substrate

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Łańcuch logistyczny substratów w biogazowni rolniczej obejmuje kilka ogniw opisanych poniżej.

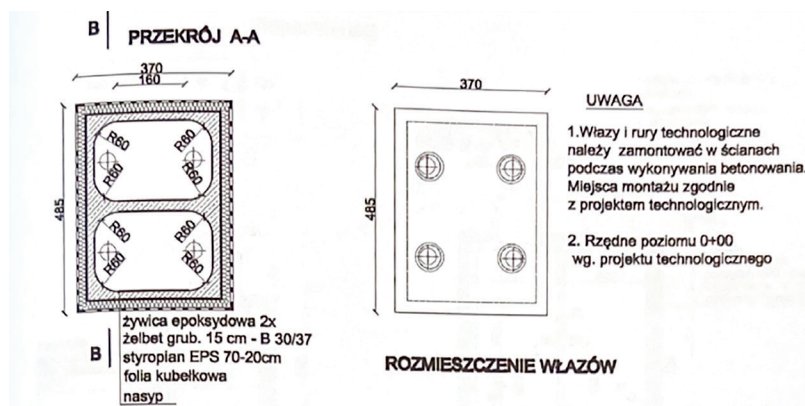
Gromadzenie i wstępna segregacja to etap obejmujący zbiór substratów w gospodarstwach lub zakładach, ocenę jakości i potencjalne rozdzielenie frakcji (np. substraty o wysokiej uciążliwości zapachowej wymagające hermetyzacji). Wyróżnia się jednocześnie obiekty magazynowania substratów o niskiej emisji odorów (np. surowce roślinne w silosach) oraz frakcji bardziej uciążliwych [Liebetrau 2017].

Transport realizowany jest zwykle pojazdem samochodowym w cyklu powtarzalnym, gdzie kluczowe są: odległość, częstotliwość, sezonowość, dopasowanie do przepustowości układu podawania oraz minimalizacja „pustych przebiegów”. Z punktu widzenia oceny systemowej transport stanowi element wpływający na ciągłość i regularność dostaw substratów oraz na powtarzalność składu mieszaniny wsadowej. W konsekwencji jego rola nie ogranicza się do emisji związanych ze zużyciem paliwa, lecz obejmuje również wpływ na stabilność procesu fermentacji i parametry jakości biogazu (zmienność składu i wartości opałowej), co może oddziaływać na warunki pracy jednostki CHP [Siudek 2022].

Magazynowanie jest etapem krytycznym, ponieważ zachodzą tu procesy biologiczne prowadzące do strat frakcji biodegradowalnej oraz emisji. Dla substratów roślinnych

istotne jest prawidłowe kiszenie i ograniczenie dostępu tlenu; w materiałach źródłowych podkreślono, że przykrycie silosu powłoką ogranicza wypłukiwanie związków organicznych i spadek wartości energetycznej [Lima 2017]. Dla frakcji płynnych istotne jest ograniczenie odgazowania i emisji odorów, a dla pofermentu – hermetyzacja lub przynajmniej rozwiązania ograniczające emisję metanu.

Przygotowanie do fermentacji obejmuje rozdrabnianie, homogenizację, ewentualną higienizację, korektę zawartości suchej masy i podawanie do fermentora. Na rysunku 3 pokazano typowy układ hydrolizera i zbiornika mieszającego jako elementów stabilizacji i przygotowywania substratu przed podaniem do komór fermentacyjnych [Bochmann 2014].



Rysunek 3. Hydrolizer dwukomorowy – rzut ogólny i rozmieszczenie włazów

Figure 3. Two-chamber hydrolyzer – plan and arrangement of manholes

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Po odsiarczeniu i odwodnieniu biogaz jest wykorzystywany w agregacie kogeneracyjnym. W literaturze wskazuje się, że biogaz po uzdatnieniu jest konwertowany na energię elektryczną i ciepłą w układzie CHP, a kogeneracja zapewnia bardzo wysoką sprawność całkowitą dzięki odzyskowi ciepła [Podziemska 2005; Olajossy 2008]. W praktyce eksploatacyjnej sprawność elektryczna silników gazowych zależy od mocy jednostki, warunków spalania i jakości paliwa, a sprawność całkowita instalacji CHP od możliwości zagospodarowania ciepła w otoczeniu biogazowni.

Ocena emisji z silnika powinna obejmować co najmniej: NO_x , CO, całkowite węglowodory (THC) lub metan (CH_4 slip), a w razie potrzeby także formaldehyd i związki siarki, w zależności od reżimu prawnego i rodzaju paliwa. Warunki odniesienia dla oceny emisji silników jako źródeł spalania powinny być znormalizowane (temperatura, ciśnienie, zawartość tlenu odniesienia), co wynika z zapisów aktów prawnych dotyczących średnich źródeł spalania [Dyrektywa 2015]. Przyjęto jednostkę kogeneracyjną o mocy 100 kW jako referencyjny przykład do analizy wskaźników emisji i odniesienia 1 kWh energii elektrycznej. Rysunek 4 ma charakter poglądowy i służy zilustrowaniu typu jednostki CHP przyjętej jako referencyjna w analizie scenariuszowej.



Rysunek 4. Widok kogeneratora 100 kW – bez obudowy i w obudowie

Figure 4. View of the 100 kW cogenerator – without and with housing

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W obliczeniach CO₂e dla metanu wykorzystano współczynniki GWP100 wg zestawień bazujących na IPCC AR6 [IPCC 2021]. Zastosowano cztery grupy kryteriów:

- redukcja strumienia odpadów i ryzyka środowiskowego (ograniczenie emisji odorów, stabilizacja biomasy, ograniczenie patogenów w przypadku higienizacji);
- emisje gazów cieplarnianych w ekwiwalencie CO₂ (CO₂e), z uwzględnieniem dominującej roli metanu;
- emisje zanieczyszczeń do powietrza z silnika (NO_x, CO, CH₄/THC);
- efektywność energetyczna (uzysk biogazu, stabilność produkcji, sprawność wykorzystania energii w CHP).

Wpływ etapów logistyki na jakość surowca i uzysk biogazu

Zmienność jakości substratów w łańcuchu logistycznym ujawnia się przede wszystkim poprzez: (a) wahania zawartości suchej masy, (b) zmiany udziału frakcji łatwo biodegradowalnej (cukry, skrobia) oraz (c) inicjowanie procesów rozkładu w warunkach niekontrolowanych. W przypadku substratów roślinnych kluczowymi mechanizmami degradacji są napowietrzanie przyzmy i wtórna fermentacja tlenowa w strefach szczelności okrycia, co prowadzi do strat energii chemicznej. Ograniczenie wypłukiwania związków organicznych przez wody opadowe i utrzymanie szczelności okrycia to działania, które chronią wartość energetyczną substratu [Lima 2017].

Dla gnojowicy i frakcji płynnych krytyczne są: czas magazynowania, mieszanie i ograniczenie odgazowania. Dłuższe przechowywanie w warunkach sprzyjających procesom beztlenowym w zbiornikach wstępnych może skutkować emisją metanu poza instalacją, czyli utratą paliwa, które powinno zostać przechwycone i wykorzystane energetycznie. Mechanizm ten jest szczególnie istotny w najcieplejszych miesiącach, co potwierdzają badania wskazujące na sezonową koncentrację emisji metanu ze składowania pofermentu i strumieni pokrewnych [Baldé 2016].

W ujęciu operacyjnym oznacza to, że łańcuch logistyczny wpływa na efektywność dwukanałowo: poprzez kanał energetyczny (ile metanu wytworzono i ile utracono przed spalaniem) oraz kanał emisyjny (ile metanu i zanieczyszczeń trafiło do atmosfery na etapach pozapaliwowych).

Analiza scenariuszowa łańcucha logistycznego

W celu ilościowego zobrazowania znaczenia logistyki zastosowano analizę porównawczą trzech scenariuszy organizacji łańcucha dostaw dla instalacji o mocy 100 kW pracującej 8000 h/rok (produkującej 800 MWh energii elektrycznej). Założenia dobrano tak, aby odzwierciedlały typowe różnice między logistyką zoptymalizowaną, referencyjną i nieoptymalną: różne odległości transportu, różne straty jakości substratu (spadek uzysku biogazu wskutek degradacji) oraz różne poziomy emisji metanu z magazynowania pofermentu.

Zestawienie kosztów pozyskania i transportu substratów pokazuje, że łączny koszt jednostkowy [PLN/t] może istotnie różnić się w poszczególnych strumieniach wsadu, nawet przy podobnych ilościach rocznych. W konsekwencji decyzje logistyczne (odległość dostawy, organizacja odbioru, warunki kontraktacji i magazynowania) wpływają nie tylko na bilans emisji, ale również na ekonomiczną stabilność pracy biogazowni. Wskaźnik kosztu całkowitego na tonę wsadu (tab. 3) można traktować jako miarę „efektywności logistycznej” w ujęciu kosztowym, zwłaszcza gdy zestawia się go z uzyskiem CH₄/t (tab. 2).

Tabela 3. Koszty pozyskania i transportu substratów

Table 3. Costs of acquiring and transporting substrates

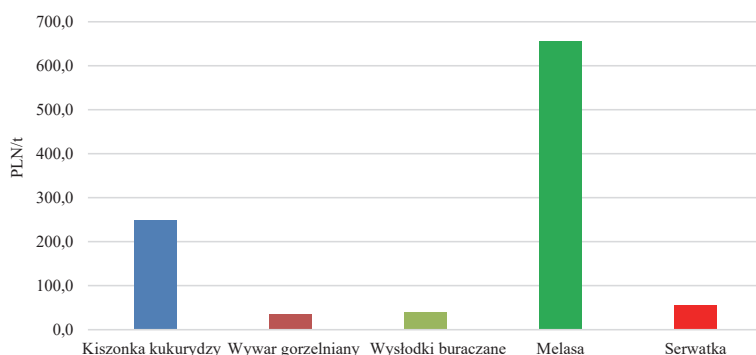
Koszty transportu [PLN]	Suma (surowiec + transport) [PLN]	Koszt na tonę [PLN/t]
37 500	75 000	250
6 300	6 300	35
15 000	24 600	41
15 000	328 000	656
50 000	110 000	55
123 800	543 900	152

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Z perspektywy zarządzania łańcuchem dostaw szczególnie istotne jest porównanie kosztów transportu i pozyskania substratu. Jeżeli udział transportu w koszcie całkowitym rośnie, oznacza to zwiększającą się wrażliwość systemu na wydłużenie tras, przestoje oraz rozproszenie punktów odbioru. W takich warunkach działania optymalizacyjne (planowanie tras, łączenie kursów, lokalizacja punktów przeładunkowych, skrócenie czasu magazynowania i poprawa organizacji dostaw) mogą jednocześnie poprawiać wynik ekonomiczny oraz ograniczać emisje pośrednie związane z transportem.

Wykres kosztu całkowitego na tonę substratu (rys. 5) pozwala szybko zidentyfikować strumienie wsadu, które generują największe obciążenie kosztowe w łańcuchu logistycznym. Z punktu widzenia projektowania i optymalizacji dostaw jest to narzędzie wspierające decyzje o strukturze miks substratów oraz o docelowych odległościach i częstotliwości transportu. W dalszej analizie koszt jednostkowy powinien być interpretowany równolegle z parametrami energetycznymi [$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}$], aby ocena nie wpłynęła na preferowanie taniego wsadu o niskim potencjale metanowym.



Rysunek 5. Całkowity koszt substratu

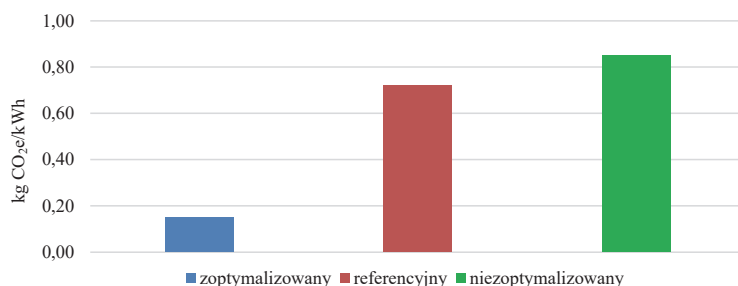
Figure 5. Total substrate cost

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Wskaźniki $\text{CO}_2\text{e}/\text{kWh}$ wykorzystano jako narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację logistyki; dalsza interpretacja obejmuje konsekwencje dla jakości paliwa i pracy CHP.

Porównanie scenariuszy logistycznych w ujęciu wskaźnika $\text{CO}_2\text{e}/\text{kWh}$ wskazuje, że wynik środowiskowy systemu jest w dużym stopniu zależny od warunków organizacji dostaw i magazynowania (rys. 6). Rozbicie emisji na składową transportową oraz



Rysunek 6. Emisje całkowite CO_2e dla scenariuszy logistycznych

Figure 6. Total CO_2e emissions for logistics scenarios

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

składową związaną ze stratami metanu pozwala jednoznacznie wskazać wrażliwe obszary oddziaływania: w scenariuszu zoptymalizowanym emisje transportowe mają relatywnie niewielki udział, natomiast w scenariuszach mniej korzystnych dominują emisje wynikające ze strat metanu (związane z magazynowaniem, nieszczelnościami i gospodarką pofermentem). Taki rezultat jest spójny z mechanizmem działania systemu: niewielki procent strat CH_4 może istotnie zwiększać CO_2e ze względu na wysoki współczynnik GWP metanu.

Zestawienie składowych w tabeli 4 pozwala wskazać obszary najbardziej wrażliwe na sposób organizacji łańcucha logistycznego oraz warunki prowadzenia procesu. Różnice pomiędzy scenariuszami wynikają z odmiennych założeń dotyczących etapów magazynowania i przygotowania wsadu oraz związanych z nimi strat i emisji procesowych. W interpretacji wyników, obok bilansu $\text{CO}_2\text{e/kWh}$, istotne jest powiązanie organizacji logistyki z jakością paliwa biogazowego i stabilnością spalania w CHP, w tym z ryzykiem wzrostu emisji CO , THC/CH_4 slip oraz trudnościami dotyczącymi dotrzymywania wymagań emisyjnych NO_x w warunkach zmiennego paliwa. Zjawisko to jest spójne z literaturą wskazującą, że nawet relatywnie niewielkie procentowo straty CH_4 mogą przesądzać o wyniku klimatycznym systemu [Wechselberger 2023].

Tabela 4. Wskaźnik CO_2e na tonę wsadu dla analizowanych scenariuszy logistycznych

Table 4. CO_2e indicator per ton of feedstock for the analyzed logistics scenarios

Scenariusz	CO_2e całkowite [kg/kWh]	CO_2 z transportu [kg/kWh]	CO_2e związane z metanem [kg/kWh]
zoptymalizowany	0,15	0,01	0,14
referencyjny	0,72	0,03	0,69
niezoptymalizowany	0,85	0,06	0,79

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

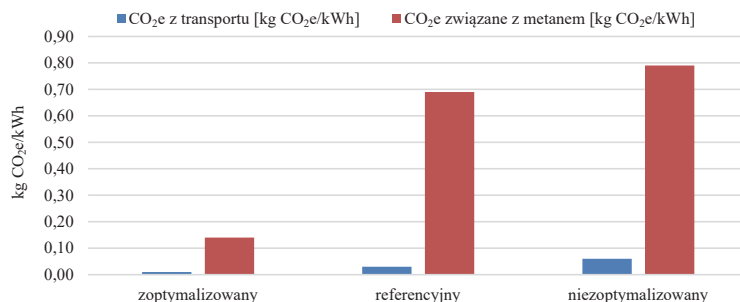
Dodatkowy wskaźnik CO_2e na tonę wsadu [$\text{kg CO}_2\text{e/t}$] pozwala przełożyć ocenę środowiskową na język logistyki i operacji (ile emisji przypada na jednostkę masy obsługiwanego strumienia). Dzięki temu możliwe jest porównanie scenariuszy niezależnie od zmian w produkcji energii oraz wskazanie, które elementy łańcucha (transport vs magazynowanie) powinny być priorytetowo usprawniane. W praktyce oznacza to, że działania takie jak skrócenie czasu magazynowania, hermetyzacja zbiorników, ograniczenie strat w punktach przeładunkowych oraz stabilizacja harmonogramu dostaw mogą dawać większy efekt środowiskowy niż sama redukcja odległości transportu.

W analizie modelowej uzyskano następujące orientacyjne wielkości (rys. 7):

- scenariusz zoptymalizowany: ok. 0,15 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (w tym transport ok. 0,01 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$),
- scenariusz referencyjny: ok. 0,72 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (transport ok. 0,03 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$),
- scenariusz nieoptymalny: ok. 0,85 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (transport ok. 0,06 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$).

Oznacza to, że zmiana organizacji logistyki i poziomu szczelności magazynowania w modelu może kilkukrotnie różnicować ślad klimatyczny instalacji. Należy podkreślić, że liczby te mają charakter ilustracyjny i powinny zostać zweryfikowane na podstawie danych rzeczywistych (lokalny miks substratów, rzeczywisty stopień hermetyzacji,

realne straty metanu i profil obciążenia CHP). Jednak kierunek zależności jest stabilny, a redukcja strat metanu daje największy efekt redukcyjny.



Rysunek 7. Emisje całkowite CO₂e dla scenariuszy logistycznych, z podziałem na emisje metanu i emisje transportowe

Figure 7. Total CO₂e emissions for logistics scenarios, separated into methane emissions and transport emissions

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Na podstawie analizy procesowej i scenariuszowej wyodrębniono trzy etapy o największym znaczeniu:

- 1) magazynowanie substratów stałych i płynnych – etap decydujący o zachowaniu potencjału metanowego i ryzyku niekontrolowanych emisji. Materiały źródłowe akcentują znaczenie właściwego składowania i zabezpieczenia przyz/silosów substratów [Holmes i Muck 2007];
- 2) gospodarka pofermentem – etap krytyczny klimatycznie, co potwierdzają wyniki pomiarów emisji metanu ze składowania pofermentu [Baldé 2016]. Z punktu widzenia logistyki jest to problem nie tylko magazynowania, ale także harmonogramu wywozu, zdolności aplikacji rolniczej i sezonowości;
- 3) stabilność pracy CHP i jakość biogazu – logistyka wpływa na jakość paliwa (wahania CH₄, obecność H₂S, wilgoć), co determinuje sprawność i profil emisji [Holm-Nielsen 2009].

Dyskusja

Łańcuch logistyczny należy rozumieć jako element sterowania jakością wsadu i paliwa, a nie wyłącznie jako źródło emisji związanych z transportem. Takie podejście pozwala lepiej integrować cele środowiskowe i eksploatacyjne: ograniczać oddziaływanie bioodpadów na środowisko, poprawiać efektywność energetyczną i jednocześnie minimalizować ryzyko wzrostu emisji z silnika w warunkach zmiennej jakości biogazu.

Uzyskane wyniki wskazują, że ocena oddziaływania środowiskowego instalacji biogazowej z układem CHP powinna być prowadzona wielokryterialnie. Kluczowe znaczenie mają cztery grupy kryteriów: redukcja strumienia bioodpadów i ryzyka środowiskowego, emisje gazów cieplarnianych wyrażone wskaźnikiem CO₂e, emisje

zanieczyszczeń do powietrza związane z wykorzystaniem biogazu w silniku tłokowym oraz efektywność energetyczna układu. Takie ujęcie pozwala lepiej zrozumieć rolę łańcucha logistycznego: logistyka oddziałuje nie tylko na ilość wytworzonego biogazu, lecz także na jego jakość i stabilność, a te cechy bezpośrednio przekładają się na warunki spalania i emisje z jednostki kogeneracyjnej.

W procesie fermentacji etap gromadzenia, magazynowania i przygotowania wsadu należy traktować jako system zapewnienia jakości. Wahanie składu mieszaniny wsadowej, zbyt długi czas retencji w magazynach, niekontrolowany dostęp tlenu w pryzmach lub degradacja frakcji biodegradowalnej nie tylko powodują spadek potencjału metanowego, lecz również zwiększają zmienność produkcji biogazu w czasie. Przekłada się to na parametry paliwa gazowego: wahania wartości opałowej i składu utrudniają utrzymanie stabilnego obciążenia silnika oraz pogarszają warunki spalania.

W układach CHP zasilanych biogazem ważna jest równowaga pomiędzy stabilnością paliwa a utrzymaniem wysokiej sprawności. Gorsza jakość biogazu lub większa zmienność jego parametrów może sprzyjać wzrostowi emisji CO oraz związków organicznych, w tym metanu niespalonego (tzw. methane slip), a także utrudniać kontrolę emisji NO_x. Z tego względu przy interpretacji wyników konieczne jest równoległe uwzględnianie emisji regulowanych i technologicznie krytycznych dla silników biogazowych, a także zasad porównywania wyników w znormalizowanych warunkach odniesienia. Ocena środowiskowa nie powinna więc ograniczać się do bilansu CO₂e/kWh, lecz obejmować również ryzyko pogorszenia reżimu spalania i potencjalnych trudności w dotrzymaniu wymagań emisyjnych w warunkach zmiennego paliwa.

Przedstawione wskaźniki CO₂e należy traktować przede wszystkim jako narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację łańcucha logistycznego. Rozbicie składowych emisji pozwala wskazać, które elementy systemu są najbardziej podatne na straty i wymagają kontroli organizacyjnej oraz technicznej. Z punktu widzenia zarządzania instalacją ważne jest jednak, aby działania ograniczające emisje procesowe i poprawiające bilans CO₂e były dobierane w sposób wspierający stabilność jakości paliwa dla CHP. Oznacza to, że środki redukujące straty i emisje w magazynowaniu, przygotowywaniu wsadu lub gospodarce pofermentem powinny jednocześnie ograniczać zmienność produkcji biogazu, a nie prowadzić do sytuacji, w której układ pracuje niestabilnie lub z pogorszoną sprawnością.

Optymalizacja powinna być prowadzona równolegle w trzech obszarach: w obszarze logistyki i magazynowania, gdzie kluczowe jest ograniczanie degradacji substratów i utrzymywanie powtarzalności mieszaniny wsadowej; w obszarze przygotowania wsadu, gdzie standaryzacja procesów takich jak rozdrabnianie, mieszanie oraz ewentualna higienizacja pozwalają ograniczać zmienność procesu fermentacji; oraz w obszarze jakości paliwa i eksploatacji CHP, gdzie uzdatnianie biogazu oraz stabilizacja obciążenia silnika wspierają spełnianie wymagań emisyjnych.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza potwierdza, że organizacja łańcucha logistycznego bioodpadów i substratów ma bezpośredni wpływ na oddziaływanie środowiskowe układu biogazownia – uzdatnianie biogazu – CHP. Logistyka pełni funkcję systemu zapewnienia

jakości i decyduje o powtarzalności mieszaniny wsadowej, ogranicza degradację substratów oraz stabilizuje warunki prowadzenia fermentacji. Przekłada się to na stabilność wytwarzania biogazu i parametrów paliwa gazowego.

Wskaźniki CO₂e/kWh stanowią użyteczne narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację procesu i wskazują obszary, w których działania organizacyjno-techniczne mogą przynieść największą poprawę. Jednocześnie interpretacja wyników powinna uwzględniać nie tylko bilans GHG, ale również konsekwencje eksploatacyjne dla jednostki CHP. Zmienna jakość biogazu może pogarszać reżim spalania i sprzyjać wzrostowi emisji CO, związków organicznych (THC) oraz metanu niespalonego, a także utrudniać utrzymanie stabilnych parametrów emisji NO_x. Z tego względu w ocenie środowiskowej i planowaniu działań korygujących należy uwzględnić porównanie emisji w warunkach odniesienia oraz ryzyko niedotrzymania limitów emisyjnych dla źródeł spalania zasilanych paliwem o zmiennych parametrach.

Najważniejsze kierunki działań optymalizacyjnych to:

- poprawa organizacji magazynowania i przygotowania wsadu poprzez hermetyzację, ograniczanie niekontrolowanego rozkładu i homogenizację mieszaniny,
- standaryzacja operacji przygotowania substratu w celu stabilizacji procesu fermentacji,
- działania dotyczące paliwa i CHP, obejmujące uzdatnianie biogazu (redukcja H₂S i wilgoci) oraz organizację pracy agregatu w warunkach sprzyjających wysokiej sprawności i kontrolowanej emisyjności.

Tak zaprojektowana integracja logistyki z eksploatacją CHP pozwala jednocześnie ograniczać oddziaływanie bioodpadów na środowisko, poprawiać efektywność energetyczną i zmniejszać ryzyko środowiskowe wynikające z emisji do atmosfery.

Bibliografia

- Angelidaki I., Ahring B.K., 2000: Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure, *Water Science and Technology* 41(3), 189–194.
- Baldé H., VanderZaag A., Burt S., Wagner-Riddle C., Gordon R., Desjardins R.L., MacDonald D., 2016: Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology* 216, 914–922.
- Berglund M., Börjesson P., 2006: Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, *Biomass and Bioenergy* 30(3), 254–266.
- Biogazownia, 2024: Biogazownia rolnicza. Podręcznik dla samorządowca, wydanie drugie. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa.
- Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., Zowski M., 2011: Mała biogazownia rolnicza, Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju, Warszawa.
- Dyrektywa 2015: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/2193 z dnia 25 listopada 2015 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza ze średnich obiektów energetycznego spalania (MCP), *Dz.U. L* 313, 28.11.2015, 1–19.
- Holmes B.J., Muck R.E., 2007: Packing bunkers and piles to maximize forage preservation, *University of Wisconsin-Extension, Madison*.
- Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P., 2009: The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology* 100(22), 5478–5484.

- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Król A., Oleszek M., Tyś J., Kulik M., 2016: Przegląd stanu wiedzy z zakresu rozwiązywania problemów wtórnej fermentacji kiszonek przeznaczonych do produkcji biogazu, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1(91), 53–61.
- Liebetrau J. i in., 2017: Methane emissions from biogas plants, IEA Bioenergy Task 37, Technical Report.
- Lima L.M., Dos Santos J.P., Casagrande D.R., Ávila C.L.S., Lara M.S., Bernardes T.F., 2017: Lining bunker walls with oxygen barrier film reduces nutrient losses in corn silages, *Journal of Dairy Science* 100(6), 4565–4573, <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12129>
- Methane, 2017: Methane emissions from biogas plants, IEA Bioenergy Task 37, Technical Report.
- Montgomery L.F.R., Bochmann G., 2014: Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production, IEA Bioenergy Task 37, Technical Brochure.
- Olajossy A., 2008: Możliwości kogeneracji trzech rodzajów energii w oparciu o zubożony w metan gaz ziemny, *Polityka Energetyczna* 11(1), 63–71.
- Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L., Naja N., Cecinato A., 2018: Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge, *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 53(10), 899–906.
- Podziemska A., 2005: Techniczno-ekonomiczne aspekty gazowej gospodarki skojarzonej cz. 1, *Nowoczesne Gazownictwo* 4, 29–37.
- Siudek A., Klepacka A.M., 2022: The Logistics Aspect in Research on the Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Agricultural Biogas, *Sustainability* 14(16), 10124, <https://doi.org/10.3390/su141610124>
- Wechselberger V., i in., 2023: Methane losses from different biogas plant technologies, *Waste Management* 157, 110–120.
- Żygadło M., Madejski R., 2016: Konwersja biomasy w energię w biogazowni rolniczej [The conversion of biomass into energy in farm biogas plant], *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 18(2), 5566.

Kacper Galek✉

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej

Marnotrawstwo w procesach logistycznych i metody jego eliminacji

Waste in logistics processes and methods of its elimination

Synopsis. Marnotrawstwo w procesach logistycznych stanowi jedno z głównych wyzwań wpływających na efektywność funkcjonowania przedsiębiorstw. Występuje ono na różnych etapach łańcucha dostaw i obejmuje m.in. nadmierne zapasy, zbędne przemieszczanie towarów, przestoje, błędy kompletacyjne, nieefektywne wykorzystanie zasobów oraz straty informacyjne. Celem artykułu jest identyfikacja najczęściej występujących form marnotrawstwa w logistyce oraz przedstawienie metod ich ograniczania, co sprowadza się do odpowiedzi na główne pytanie badawcze: jakie rodzaje strat występują w tym obszarze najczęściej i jakie narzędzia organizacyjno-informatyczne mają decydujący wpływ na ich eliminację? W pracy omówiono znaczenie koncepcji Lean Management oraz narzędzi takich jak 5S, Kaizen, mapowanie strumienia wartości (VSM) i standaryzacja procesów. Zwrócono również uwagę na rolę automatyzacji, cyfryzacji i systemów informatycznych wspierających zarządzanie logistyczne w redukcji strat operacyjnych. Analiza wskazuje, że skuteczne ograniczanie marnotrawstwa prowadzi nie tylko do obniżenia kosztów działalności, lecz także do poprawy jakości obsługi, zwiększenia płynności procesów oraz wzrostu konkurencyjności przedsiębiorstwa. Problem ten ma szczególne znaczenie we współczesnej logistyce, gdzie stale rośnie presja efektywności, szybkości realizacji oraz optymalizacji zasobów.

Słowa kluczowe: marnotrawstwo w logistyce, Lean Management, optymalizacja procesów logistycznych, mapowanie strumienia wartości, efektywność operacyjna

Abstract. Waste in logistics processes is one of the major challenges affecting the efficiency of enterprises. It appears at different stages of the supply chain and includes excessive inventories, unnecessary movement of goods, waiting time, picking errors, inefficient use of resources and information losses. The aim of the article is to identify the most common forms of waste in logistics and to present

✉ **Kacper Galek** – student kierunku transport na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej;
e-mail: kacperg1805@gmail.com

methods of their reduction, which comes down to answering the main research question: what types of waste occur most frequently in this area, and what organizational and IT tools have a decisive impact on their elimination? The study discusses the importance of Lean Management and tools such as 5S, Kaizen, value stream mapping (VSM), and process standardization. Attention is also paid to automation, digitalization and information systems supporting logistics management in reducing operational losses. The analysis shows that effective waste reduction not only lowers operating costs but also improves service quality, increases process flow, and strengthens the competitive position of an enterprise. This issue is particularly important in contemporary logistics, where pressure on efficiency, speed of delivery, and resource optimization is constantly increasing.

Keywords: logistics waste, Lean Management, logistics process optimization, value stream mapping, operational efficiency

Kody JEL: M11, M15, L23

Wprowadzenie

Logistyka stanowi jeden z kluczowych filarów pozwalających firmom konkurować na rynku, integrując przepływy materiałów, informacji i kapitału od dostawcy aż do ostatecznego odbiorcy [Skowronek i Sarjusz-Wolski 2012; Coyle i in. 2017]. Problem polega na ciągłej zmienności popytu przy jednoczesnej presji minimalizacji kosztów i skracania czasu realizacji dostaw. Powoduje to, że łańcuchy logistyczne są bardzo obciążone. W takiej sytuacji nawet małe zakłócenie na dowolnym etapie procesu może generować dodatkowe koszty.

Dlatego współczesna literatura przedmiotu redefiniuje rolę logistyki, która przestała pełnić tylko funkcję pomocniczą, ale stała się elementem strategii konkurowania poprzez czas, niezawodność i dostępność produktu. Autorzy wybranych publikacji wiążą sprawność łańcucha dostaw z koordynacją przepływów międzyorganizacyjnych, a raport Banku Światowego LPI 2023 wskazuje, że zdolność przemieszczania towarów przez granice zależy od szybkości, niezawodności, jakości usług logistycznych, infrastruktury i cyfryzacji [World Bank 2023]. Marnotrawstwa w tym obszarze nie można zatem sprowadzać do lokalnych kosztów magazynu czy floty [Bowersox i in. 2013; Christopher 2016; Ruhston i in. 2017] – jest to systemowe zagrożenie dla jakości obsługi klienta i odporności całego łańcucha dostaw. Bozarth i Handfield [2019] opisali efekt byczego bicia (bullwhip effect), w ramach którego zmienność zamówień rośnie w górę łańcucha dostaw, prowadząc do nadmiernych zapasów, błędnego planowania zdolności, nieefektywnego transportu i pogorszenia obsługi klienta. Ten mechanizm pokazuje, że marnotrawstwo nie musi zaczynać się w magazynie; może powstać już na etapie planowania, partii zamówień, polityki cenowej lub przekazywania niepełnych danych. Opóźniona aktualizacja stanów magazynowych może w praktyce wywołać nadmiarowe zakupy i wydłużyć kompletację.

Pojęcie marnotrawstwa wiąże się najczęściej z koncepcją Lean Management oraz japońskim określeniem Muda. Istotą koncepcji „szczupłego zarządzania” jest założenie ciągłego i systematycznego odchudzania procesów ze wszelkich nieefektywności, przy

stałej maksymalizacji wartości. Z kolei sam termin Muda oznacza każdą czynność, która bezproduktywnie pochłania czas i zasoby firmy, nie wnosząc żadnej wartości dodanej z perspektywy odbiorcy. Podejście to wypracowano w systemie produkcyjnym firmy Toyota opierającym się na eliminacji marnotrawstwa, gdzie o wartości decyduje klient: produkt ma mieć odpowiednią jakość i zostać dostarczony we właściwym miejscu i czasie [Womack i Jones 2003; Liker 2020]. I choć Lean rodził się na liniach montażowych, jego rola w logistyce jest równie krytyczna. Łańcuch dostaw to przecież nic innego jak gęsta sieć punktów styku, przekazania, fizycznego oczekiwania i tysięcy mikrodecyzji. W przypadku produkcji łatwiej wskazać stanowisko, operację lub gniazdo, w którym występuje strata. Ponieważ w logistyce marnotrawstwo może być wynikiem relacji między dostawcą, magazynem, przewoźnikiem, systemem informatycznym i odbiorcą, przyjmuje postacie materialne, czasowe, przestrzenne, informacyjne lub organizacyjne. Usprawnienia marnotrawstwa powinny obejmować nie tylko sam fizyczny ruch towaru, lecz także obieg informacji, harmonogramowanie, komunikację oraz proces podejmowania decyzji. Błędy kompletacyjne przyczyniają się do zwrotów i reklamacji, zbędne przeładunki wydłużają czas realizacji zamówień, nadmierne zapasy zamrażają kapitał i zajmują powierzchnię magazynową, a niespójne dane w systemach informatycznych prowadzą do podejmowania decyzji opartych na nieaktualnym obrazie sytuacji. Złożoność sieci dostaw, liczba pozycji asortymentowych oraz rozproszenie dostawców i odbiorców zwiększają skalę problemu.

Różne aspekty marnotrawstwa wpływają również na jakość pracy oraz zdolności pracowników. Zmniejszona wydajność jest spowodowana liczbą ustanowionych wyjątków, takich jak ręczne wyszukiwanie towaru, konieczność ciągłego poprawiania dokumentów i wielokrotnego wyjaśniania tych samych niezgodności. Monotonne i niezautomatyzowane czynności powodują zmęczenie pracowników, co z kolei wpływa na popełnianie przez nich kolejnych błędów. Zwalczanie marnotrawstwa obejmuje także kwestie związane z organizacją pracy, wzmacnianiem odpowiedzialności procesowej oraz budową struktury opartej na szybkim ujawnianiu problemów.

Ponieważ wiele strat ma charakter międzydziałowy, niezbędne jest podejście procesowe. Knop [2020] wskazał, że narzędzia mapowania powinny być dobierane do rodzajów marnotrawstwa występujących w strumieniu wartości, a nie do granic funkcjonalnych organizacji. W transporcie podobną logikę potwierdzają dane Eurostatu [2021]: w 2020 roku około jedna piąta pracy przewozowej drogowego transportu towarowego w UE, mierzonej w wozokilometrach, była realizowana pustymi pojazdami. Ten wynik to nie tylko dane statystyczne, lecz także przykład straty powstającej na styku planowania, konsolidacji przesyłek, dostępności ładunków powrotnych i współpracy z odbiorcami. Dodatkowym czynnikiem wzmacniającym znaczenie problematyki jest rozwój handlu elektronicznego i obsługi wielokanałowej. Boysen i in. [2019] wskazują, że magazyny e-commerce muszą uwzględniać zapotrzebowanie na zmienny popyt, krótkie czasy realizacji, dużą liczbę małych zamówień oraz szeroki asortyment. Van Gils i in. [2018] podkreślają natomiast, że optymalizacja kompletacji wymaga łączenia decyzji dotyczących trasowania, grupowania zleceń, rozmieszczenia zapasów i podziału stref. Nawet niewielkie niezgodności w lokalizacji, opóźnienia danych bądź nieprzemyślana partia zleceń może szybko zmienić się w koszt zarówno finansowy, jak i czasowy.

Artykuł ma charakter przeglądowo-analityczny i koncentruje się na zastosowaniu podejścia Lean Management w magazynowaniu, transporcie, przepływie informacji oraz zarządzaniu zapasami. Sformułowano następujące pytanie badawcze: jakie rodzaje marnotrawstwa występują najczęściej w logistyce przedsiębiorstwa i jakie narzędzia organizacyjne, procesowe oraz informatyczne mogą mieć wpływ na jego efektywność operacyjną?

Cel i metodyka badań

Podstawę niniejszego opracowania stanowi przegląd literatury przedmiotu połączony z syntezą koncepcji zarządzania procesami logistycznymi. Zakres analizowanej literatury obejmował z jednej strony klasyczne pozycje opisujące filozofię Lean Management, z drugiej zaś współczesne publikacje i raporty instytucjonalne poświęcone cyfryzacji [Eurostat 2021; World Bank 2023]. Badania miały charakter jakościowy i opisowy, celowo zrezygnowano z analizy przypadków konkretnych firm. Taki zabieg pozwala skupić się na pogłębionym zrozumieniu mechanizmów powstawania marnotrawstwa, zamiast ograniczać się do jego statystycznej ewidencji.

Najpierw przeanalizowano siedem klasycznych strat Lean Management w kontekście specyfiki łańcuchów dostaw, rozszerzając je o marnotrawstwo informacyjne i organizacyjne [Hicks 2007; Knop 2020]. Następnie przyporządkowano do nich wybrane narzędzia eliminacji strat, takie jak 5S, Kaizen, standaryzacja, VSM (value stream mapping), system ssący, kontrola wizualna, WMS (warehouse management system), TMS (transportation management system), identyfikacja automatyczna i analityka danych. Efektem takiego podejścia jest uporządkowanie problemu marnotrawstwa i wskazanie zależności między stratami, objawami operacyjnymi i konkretnymi metodami ich zwalczania. Zaproponowane zestawienie może pełnić funkcję modelu diagnostycznego wspierającego identyfikację i ograniczanie marnotrawstwa w procesach logistycznych.

Wyniki badań i dyskusja

Istota marnotrawstwa w procesach logistycznych

Pojęcie wartości w logistyce wiąże się nierozdzielnie z dostarczeniem pożądanego produktu we właściwym czasie i miejscu oraz przy akceptowalnych nakładach finansowych. Z tego punktu widzenia każda operacja, która nie wspiera tego nadrzędnego celu, jest potencjalnym marnotrawstwem. Należy jednak pamiętać, że nie wszystkie działania nietworzące bezpośrednio wartości można bezwzględnie usunąć z systemu. Wymogi prawne i standardy bezpieczeństwa wymuszają chociażby przeprowadzanie rygorystycznej kontroli jakości, obsługę dokumentacji czy dodatkowe zabezpieczanie ładunków. Rola zarządzania procesowego sprowadza się więc do umiejętnego odseparowania operacji obiektywnie koniecznych od tych, które są generowane wyłącznie przez organizacyjny chaos. Chociaż tradycyjna typologia Lean Management definiuje siedem głównych strat – nadprodukcję, oczekiwanie, zbędny transport, nadmierne przetwarzanie, nadmierne zapasy, zbędny ruch oraz wady [Liker 2020] – w realiach logistycznych

podział ten wymaga pewnej redefinicji. Wynika to z faktu, że symptomy marnotrawstwa potrafią być doskonale zakamuflowane w rutynowych operacjach.

Nadmierne zapasy mogą być uznawane za bufor bezpieczeństwa, długie trasy kompletacyjne – za naturalną konsekwencję układu magazynu, a powielanie tych samych danych – za zwykły element pracy administracyjnej. Dopiero analiza strumienia wartości pokazuje, że są to koszty wynikające z niewłaściwie zaprojektowanego procesu.

Aby ułatwić identyfikację ukrytych nieefektywności, w tabeli 1 zaprezentowano klasyczne kategorie marnotrawstwa dotyczące specyfiki operacji logistycznych. Wskazano najczęstsze operacyjne symptomy strat oraz ich realne skutki biznesowe.

Przedstawione rodzaje strat pokazują, że marnotrawstwo rzadko występuje w izolacji. Nadmierne zapasy mogą być skutkiem niedokładnego prognozowania, lecz także reakcji na niestabilne dostawy. Konieczność oczekiwania przy rampie może wynikać z niewłaściwego harmonogramowania transportu, ale również z braku aktualnej informacji nt. gotowości zamówienia do wydania. Z kolei błędy kompletacyjne często są konsekwencją nieczytelnego oznakowania, zbyt dużej liczby podobnych indeksów w jednej lokalizacji lub słabej integracji systemu WMS z rzeczywistym układem magazynu.

Tabela 1. Wybrane formy marnotrawstwa w procesach logistycznych

Table 1. Selected forms of waste in logistics processes

Forma marnotrawstwa	Typowe objawy w logistyce	Możliwe skutki
Nadmierne zapasy	wysoki poziom stanów magazynowych, zaleganie indeksów, częste przeceny	zamrożenie kapitału, zajęcie powierzchni, ryzyko przestarzenia
Zbędny transport	wielokrotne przeładunki, nieoptymalne trasy, puste przebiegi	wzrost kosztów, emisji i czasu realizacji
Oczekiwanie	przestoje przy rampach, brak dokumentów, kolejki do kompletacji	wydłużenie lead time, mniejsze wykorzystanie zasobów
Zbędny ruch	długie ścieżki kompletacyjne, szukanie towaru, ręczne przenoszenie	spadek wydajności i wzrost obciążenia pracowników
Nadmierne przetwarzanie	podwójne kontrole, wielokrotne wpisywanie danych, zbędne raporty	nadmierna pracochłonność i opóźnienia decyzyjne
Straty informacyjne	niespójne dane, opóźnione aktualizacje, brak widoczności zapasu	nietrafne decyzje, konflikty planów, niski poziom obsługi

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Hicks 2007; Knop 2020; Liker 2020]

Source: own elaboration based on [Hicks 2007; Knop 2020; Liker 2020]

Źródła strat w magazynowaniu, transporcie i przepływie informacji

Jednym z najczęściej wskazywanych źródeł marnotrawstwa jest brak stabilnego i czytelnego przepływu procesu. W magazynach objawia się to niewłaściwym rozmieszczeniem asortymentu, brakiem jednoznacznych standardów dotyczących odkładania, niepełnym oznakowaniem lokalizacji oraz mieszaniem stref przyjęcia, składowania, kompletacji i wydań. W transporcie źródłem strat są m.in. puste przebiegi, zbyt małe wykorzystanie przestrzeni ładunkowej, brak konsolidacji przesyłek oraz słaba synchronizacja z oknami czasowymi odbiorców.

Przeglądy badań nad magazynowaniem pokazują, że źródła strat należy analizować według funkcji procesu, a nie tylko według stanowisk pracy. Gu i in. [2007] porządkują problemy planowania magazynu wokół przyjęcia, składowania, kompletacji i wysyłki, co dobrze odpowiada praktyce audytu logistycznego. Jeżeli każda z tych funkcji jest optymalizowana osobno, przedsiębiorstwo może poprawić lokalny wskaźnik, ale jednocześnie wydłużyć całkowity czas realizacji zamówienia. Faber i in. [2002] zwracają dodatkowo uwagę, że wraz ze zwiększaniem się złożoności magazynu rośnie znaczenie właściwej struktury planowania i kontroli, w tym dopasowania systemu WMS do realnego przebiegu pracy. Ważną grupę stanowią także straty informacyjne. Współczesne procesy logistyczne opierają się w dużej mierze na jakości danych, dlatego opóźnienia w aktualizacji stanów magazynowych, niespójne kody produktów, brak elektronicznej wymiany dokumentów lub ręczne przepisywanie informacji mogą generować straty porównywalne z fizycznymi przestojami [Hicks 2007].

Przyczyną marnotrawstwa bywają również źle dobrane wskaźniki efektywności. Jeżeli dział zakupów jest oceniany głównie przez pryzmat ceny jednostkowej, może preferować duże partie zakupowe, nawet jeśli zwiększa to stan zapasów i koszty magazynowania. Jeśli transport jest rozliczany wyłącznie z kosztów jednego kilometra, może zabraknąć motywacji do poprawy terminowości, konsolidacji dostaw lub ograniczania pustych przebiegów. Lokalna optymalizacja wskaźników prowadzi wówczas do strat na poziomie całego łańcucha dostaw.

Aby zapobiec tego typu błędom i ułatwić zarządzającym trafną identyfikację problemów, w tabeli 2 zaprezentowano przykładową matrycę diagnozy marnotrawstwa logistycznego. Porządkuje ona poszczególne obszary operacyjne, przypisując konkretnym sygnałom ostrzegawczym odpowiednie mierniki oraz optymalne kierunki usprawnień.

Tabela 2. Przykładowa matryca diagnozy marnotrawstwa logistycznego

Table 2. Example matrix for diagnosing logistics waste

Obszar	Sygnał ostrzegawczy	Przykładowy miernik	Kierunek usprawnienia
Zapasy	częste braki mimo wysokiego stanu magazynu	rotacja zapasów, poziom zapasu bezpieczeństwa	klasyfikacja ABC/XYZ, planowanie popytu, Kanban
Kompletacja	duża liczba korekt i ponownych pobrań	liczba błędów na 1000 linii zamówień	5S, mobilne skanowanie kodów/AutoID, standaryzacja lokalizacji
Transport	puste przebiegi i niski stopień wypełnienia pojazdów	udział pustych kilometrów, wykorzystanie ładowności	TMS, konsolidacja, planowanie tras
Przepływ informacji	ręczne przepisywanie danych między systemami	czas aktualizacji statusu, liczba korekt dokumentów	integracja ERP-WMS-TMS, EDI, kody GS1
Przyjęcia i wydania	kolejki przy rampach, nierówne obciążenie zmian	czas obsługi pojazdu, punktualność okien czasowych	harmonogram ramp, awizacja, taktowanie pracy
Jakość	zwroty z powodu pomyłek i uszkodzeń	wskaźnik reklamacji, koszt błędów	kontrola u źródła, Poka-Yoke, szkolenia stanowiskowe

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Kompletacja zamówień jako obszar o wysokim potencjale strat

Procesem podatnym na powstawanie marnotrawstwa pozostaje kompletacja zamówień. W większości magazynów absorbuje ona najwięcej roboczogodzin, co wynika z konieczności nieustannego synchronizowania wielu zmiennych: od lokalizacji towaru i trasowania, po dostępność nośników czy końcową kontrolę zgodności. Skalę tego zjawiska dobrze obrazują analizy de Kostera i in. [2007], z których wynika, że sama tylko kompletacja może pochłaniać nawet 55% całkowitych kosztów operacyjnych obiektu. Taka struktura wydatków implikuje jasny wniosek analityczny: potencjał usprawnieniowy poszczególnych etapów logistycznych jest mocno zróżnicowany. Skoro zbiórka towaru generuje ponad połowę kosztów, to właśnie eliminacja błędów pobrań, redukcja zbędnego ruchu czy walka z chaosem lokalizacyjnym powinny stanowić dla przedsiębiorstwa absolutny priorytet. Ukierunkowanie wysiłków organizacyjnych na obszar o tak dużym znaczeniu pozwala dużo szybciej osiągnąć wymierne rezultaty biznesowe niż w przypadku optymalizowania zadań o znaczeniu marginalnym.

W nowszych publikacjach podkreśla się, że kompletacji nie należy usprawniać, podejmując izolowane decyzje. Van Gils i in. [2018] wskazują, że oddzielne rozwiązywanie problemów planistycznych, takich jak grupowanie zamówień, trasowanie pracowników, podział stref i rozmieszczenie zapasu, może prowadzić do wyniku gorszego niż podejście łączone. Dla diagnozy marnotrawstwa oznacza to, że długi dystans przejścia nie musi wynikać wyłącznie ze złego układu regałów; może być skutkiem sposobu tworzenia fal kompletacyjnych, reguł priorytetyzacji zleceń albo braku zgodności między polityką składowania a strukturą zamówień klientów.

Dukic i Oluic [2007] zwracają uwagę, że w magazynach konwencjonalnych znaczna część czasu kompletacji jest związana z przemieszczaniem się pracowników, a symulacyjne porównanie jej metod wskazało możliwość istotnego ograniczenia dystansów koniecznych do przejścia przez odpowiednie połączenie zasad trasowania, rozmieszczenia towarów i grupowania zamówień. Wniosek ten potwierdza procesowy charakter marnotrawstwa: sama szybkość pracy kompletującego nie wystarczy, jeśli układ magazynu, sposób przydzielania zleceń i logika składowania generują niepotrzebny ruch.

Z punktu widzenia praktyki oznacza to konieczność łącznego analizowania kilku decyzji operacyjnych. Zastosowanie klasyfikacji ABC może ograniczyć dystans dotarcia do produktów szybko rotujących, ale efekt będzie słabszy, jeśli zlecenia nie zostaną właściwie pogrupowane. Wprowadzenie skanowania kodów ograniczy błędy pobrań, lecz nie wyeliminuje oczekiwania wynikającego z braku dostępnych terminali lub niewłaściwego harmonogramu pracy. Podobnie optymalizacja tras przejścia nie przyniesie oczekiwanego rezultatu, jeżeli dane dotyczące lokalizacji są nieaktualne. Przykład kompletacji zamówień dobrze pokazuje więc, że eliminacja marnotrawstwa wymaga łączenia narzędzi organizacyjnych, informatycznych i analitycznych.

Aby obiektywnie zdiagnozować opisywany obszar, analitycy wykorzystują specjalne wskaźniki efektywności. Należą do nich przede wszystkim parametry wydajnościowe (liczba skompletowanych linii na godzinę), jakościowe (wskaźnik błędów na 1000 pobrań, odsetek zleceń bezkorekcyjnych) oraz przestrzenno-czasowe (średni dystans na zamówienie i udział przemieszczania się w całkowitym czasie trwania procesu). Dopiero rzetelne nałożenie tych danych na fizyczną mapę procesu pozwala

zdemaskować prawdziwe źródło strat. Dzięki takiemu zestawieniu można precyzyjnie rozstrzygnąć, czy problem leży w nieprzemyślanym układzie regałów albo niedoborach sprzętowych, czy może jest echem błędów zagnieżdżonych głęboko w danych systemu WMS. Diagnoza taka umożliwia dobór narzędzi pozwalających eliminować straty odpowiednio do rzeczywistej przyczyny problemu.

Lean Management jako podstawa eliminacji marnotrawstwa

Filozofia Lean Management opiera się na rygorystycznym eliminowaniu wszelkich działań niemających wartości dodanej, przy jednoczesnym skracaniu cykli przepływu i oddaniu inicjatywy w ręce zespołu. Przenosząc tę koncepcję na grunt logistyki, nie należy jej sprowadzać do zwykłego przybornika z technikami operacyjnymi. To raczej całościowy wzorec zarządzania łańcuchem od dostawcy aż do klienta końcowego. O sile tego podejścia decydują: stabilizacja procesów, narzucenie standardów, wizualne ukazanie błędów oraz natychmiastowa reakcja na najdrobniejsze anomalie [Shah i Ward 2007].

Wdrażanie tych założeń w przedsiębiorstwach nierzadko rozpoczyna się od absolutnego fundamentu, jakim jest metodyka 5S (selekcja, systematyka, sprzątanie, standaryzacja, samodyscyplina). Nie chodzi tu jednak o trywialne dbanie o porządek w hali magazynowej. Narzędzie to pozwala zorganizować fizyczną przestrzeń pracy, zmniejszyć czas tracony na poszukiwanie skanerów czy dokumentów przewozowych i wydatnie zwiększać wskaźniki bezpieczeństwa. Ma to znaczenie krytyczne szczególnie w przypadku gęsto upakowanych stref kompletacji, gdzie najmniejszy chaos przestrzenny skutkuje pomyłkami i wydłużeniem tras przejścia.

Naturalnym rozwinięciem tego systematycznego podejścia jest Kaizen – kultura ewolucyjnego, nieprzerwanego doskonalenia. Zamiast kosztownych rewolucji stawia się tu na mikrousprawnienia, bazując na wiedzy osób będących najbliżej problemu: operatorów wózków, planistów czy kierowców. Ich umiejętność dostrzegania szczegółów skutkuje najczęściej wprowadzeniem realnych usprawnień – poprzez optymalizację ścieżki zbiórki, logiczniejsze ułożenie rotującego asortymentu czy zmniejszenie liczby biurokratycznych formularzy.

Żeby jednak te punktowe usprawnienia nie były optymalizacją wyłącznie lokalną, konieczne jest bardziej ogólne spojrzenie na dany proces. Służy do tego mapowanie strumienia wartości (VSM), pozwalające zwizualizować cały obieg materiału i informacji. Analityk może dzięki niemu bezbłędnie oddzielić czas rzeczywistej pracy od jałowego oczekiwania, zbędnych przeładunków i poprawek. Jak zauważa Knop [2020], mapowanie okazuje się kluczowe w sytuacjach, w których chcemy uchwycić całą siatkę wzajemnie napędzających się strat, a nie tylko mierzyć się z ich pojedynczymi objawami.

Dla uzyskania pełnej przejrzystości prowadzonych analiz celowe jest bezpośrednie powiązanie zidentyfikowanych form marnotrawstwa z ich operacyjnymi przejawami oraz metodami ewaluacji. W tabeli 3 przedstawiono zestawienie klasycznych strat typu Muda w logistyce, przypisując im objawy występowania, dedykowane wskaźniki efektywności (KPI) oraz konkretne instrumenty „szczupłego zarządzania”.

Tabela 3. Zestawienie strat Muda, objawów i wskaźników KPI oraz narzędzi Lean w logistyce
Table 3. Factsheet of Muda losses, symptoms, KPIs and Lean tools in logistics

Zidentyfikowana strata (Muda)	Objawy operacyjne w przepływie	Kluczowy wskaźnik efektywności (KPI)	Proponowane narzędzie Lean Management
Nadmierne zapasy	Zaleganie, blokowanie alejek transportowych, zamrażanie kapitału obrotowego	Wskaźnik rotacji zapasów, stopień wykorzystania pojemności składowej	Klasyfikacja ABC/XYZ, system ssący (pull), wyznaczenie poziomów min./maks.
Oczekiwanie	Przestoje wózków widłowych, kolejki kierowców przed rampami, wyczekiwanie na dokumenty lub zlecenia	Średni czas obsługi środka transportu, czas przestoju	Taktowanie pracy, standaryzacja procedur, tablice FIFO
Zbędny transport	Kilkukrotne przestawianie tych samych jednostek paletowych, zbyt długie dystanse między strefami	Liczba operacji przeładunkowych na zamówienie, średni dystans przewozu	Mapowanie strumienia wartości (VSM), diagram spaghetti
Zbędny ruch	Pracownicy krążący po halach w poszukiwaniu towaru, niska ergonomia stanowisk pracy, ręczne przeszukiwanie regałów	Średni dystans pieszy przypadający na linię zamówienia	Metodyka 5S, standaryzacja ścieżek zbiórki (picking paths)
Nadmierne przetwórstwo	Wielokrotna weryfikacja tych samych zamówień, dublowanie papierowej dokumentacji, zbędne kroki kontrolne	Pracochłonność administracyjna procesu (roboczo-godziny/zlecenie)	Mapowanie procesów, Kaizen (uproszczenie i odchudzanie procedur)
Wady i błędy	Uszkodzenia mechaniczne opakowań, błędne etykietowanie, reklamacje	Wskaźnik dokładności kompletacji, koszt obsługi zwrotów	Mechanizmy Poka-Yoke (np. weryfikacja wagowa), kontrola u źródła
Nadprodukcja	Kompletowanie zamówień przed podstawieniem auta, powodujące zapelnienie strefy wydań	Powierzchnia zablokowana przez ładunki oczekujące (m ²), czas ekspedycji	Harmonogramowanie just-in-time (JIT), poziomowanie zleceń
Straty informacyjne	Praca na nieaktualnych danych, sprzeczne komunikaty na linii biuro-magazyn	Czas opóźnienia w synchronizacji danych, liczba incydentów korygujących	Zarządzanie wizualne (Andon), codzienne odprawy operacyjne

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Cyfryzacja i automatyzacja jako wsparcie redukcji strat

Samo wdrożenie technologii informatycznych nie gwarantuje automatycznej eliminacji strat operacyjnych. Nadrzędną rolą tych systemów jest wychwycenie „wąskich gardeł” i drastyczne skrócenie czasu reakcji na wszelkie odchylenia. Każdy z nich zabezpiecza inny odcinek przepływu: WMS wspiera zarządzanie lokalizacjami, kontrolę stanów magazynowych, kompletację i inwentaryzację, podczas gdy

TMS optymalizuje planowanie tras, harmonogramowanie załadunków oraz rozliczanie kosztów transportu. Z kolei klasyczny system ERP (enterprise resource planning), pełniący funkcję centralnego układu planowania zasobów przedsiębiorstwa, łączy wymienione operacje w jedną spójną całość finansowo-zakupową i sprzedażową. Znaczenie widoczności danych potwierdza raport LPI 2023 [World Bank 2023]. Wynika z niego wprost, że transparentność przepływów na całej długości łańcucha (end-to-end) to fundament skracania opóźnień i budowania logistycznej niezawodności.

Błędem jest jednak postrzeganie cyfryzacji jako celu samego w sobie. Jak udowadniają Faber i in. [2002], w środowisku magazynowym o wysokim stopniu komplikacji oprogramowanie WMS staje się centralnym ośrodkiem planowania i kontroli. Jego realna skuteczność zależy jednak od ścisłego dopasowania do faktycznej złożoności operacji. Informatyzacja potrafi skrócić czas wyszukiwania towaru i radykalnie zmniejszyć odsetek pomyłek, ale pod jednym warunkiem: fizyczny magazyn musi zostać wcześniej uporządkowany. Jeśli lokalizacje są błędnie opisane, indeksy asortymentowe niespójne, a pracownicy ignorują zasady jednolitego skanowania, inwestycja w technologię przyniesie odwrotny skutek. Zamiast porządkować proces, oprogramowanie zacznie utrwalać i automatyzować organizacyjny chaos.

W prewencji błędów ogromną rolę odgrywa z kolei automatyczna identyfikacja obiektów, obejmująca kody kreskowe, tagi RFID oraz terminale mobilne. Zdejmuje ona z barków operatorów konieczność ręcznego wprowadzania danych, co obarczone jest wysokim ryzykiem pomyłki. Zestawienie takich czytników z twardymi regułami walidacji w systemie WMS tworzy swoistą barierę Poka-Yoke – mechanizm z zasady uniemożliwiający wadliwe wykonanie czynności. W praktyce magazynowej oznacza to systemową blokadę wydania niewłaściwego indeksu, wymuszenie skanowania lokalizacji docelowej lub natychmiastowy sygnał ostrzegawczy o przekroczeniu dopuszczalnej liczby sztuk w opakowaniu zbiorczym.

Przeglądy badań nad Logistyką 4.0 wskazują, że technologie takie jak internet rzeczy, systemy cyberfizyczne, big data, rozwiązania mobilne i chmura mogą wspierać integrację planowania, śledzenie przepływu oraz podejmowanie szybszych decyzji operacyjnych [Winkelhaus i Grosse 2020; Efthymiou i Ponis 2021]. Jednocześnie Minashkina i Happonen [2023] podkreślają, że systemy WMS mogą także wzmacniać społeczne i środowiskowe aspekty zrównoważenia magazynu, jeśli są powiązane z miernikami procesu. W praktyce zatem automatyzowanie procesu pełnego zbędnych ruchów i niejasnych reguł może jedynie utrwalić marnotrawstwo, ale w droższej technologicznie postaci.

Podobne zależności występują w transporcie. System TMS może wspierać planowanie tras, konsolidację przesyłek i monitorowanie punktualności, lecz nie zlikwiduje strat wynikających z błędnych okien czasowych, niepełnych danych dotyczących zleceń lub braku współpracy między planistą, magazynem i przewoźnikiem. Dopiero połączenie informacji o zleceniach, dostępności pojazdów, ograniczeniach odbiorców i rzeczywistym czasie załadunku pozwala ograniczać puste przebiegi oraz skracać czas oczekiwania przy rampach. Cyfryzacja zwiększa również możliwości analizy predykcyjnej. Dane z systemów WMS, TMS i ERP mogą służyć do identyfi-

kacji sezonowości, niestabilnych dostawców, lokalizacji generujących błędy oraz tras o wysokim udziale pustych przebiegów. Kache i Seuring [2017] zwracają uwagę, że wykorzystanie big data analytics w zarządzaniu łańcuchem dostaw tworzy zarówno szanse, jak i wyzwania związane z jakością danych, kompetencjami i infrastrukturą. Dlatego przejście od reaktywnego gaszenia problemów do planowego ograniczania źródeł strat wymaga nie tylko systemów, ale także odpowiedzialności za dane oraz spójnego systemu wskaźników.

Proponowany tok postępowania przy ograniczaniu marnotrawstwa

Na podstawie przeprowadzonej analizy można wskazać ogólną sekwencję działań, która ułatwia przedsiębiorstwu ograniczanie strat logistycznych. Pierwszym krokiem jest wybór procesu o istotnym znaczeniu dla klienta lub kosztów, na przykład realizacji zamówienia od przyjęcia zlecenia do wydania przesyłki. Następnie należy zebrać dane dotyczące czasu realizacji, liczby błędów, poziomu zapasów, obciążenia zasobów i punktów oczekiwania. Dopiero na tej podstawie można przygotować mapę stanu obecnego.

Drugim krokiem jest klasyfikacja zidentyfikowanych działań jako: tworzących wartość, koniecznych nietworzących wartości lub zbędnych. Ten etap wymaga udziału pracowników operacyjnych, ponieważ część strat jest niewidoczna w raportach systemowych. Przykładowo raport może pokazywać średni czas kompletacji, ale nie wskaże, ile minut pracownik traci na szukanie wolnego terminala lub wyjaśnianie niezgodności między etykietą a dokumentem.

Trzecim krokiem jest wybór narzędzi adekwatnych do przyczyny problemu. Jeżeli źródłem strat jest nieporządek i brak oznakowania, właściwe będzie zastosowanie 5S oraz zarządzania wizualnego. Jeżeli problem dotyczy niestabilnego przepływu informacji, priorytetem będzie standaryzacja danych i integracja systemów. Jeżeli natomiast przyczyną są nadmierne partie i zapasy, należy rozważyć mechanizmy ssące, częstsze dostawy, Kanban lub zmianę zasad planowania popytu. Najczęstszym błędem jest wdrażanie narzędzia bez zrozumienia przyczyny marnotrawstwa.

Ostatnim krokiem jest utrwalenie usprawnienia przez wprowadzenie standardów pracy, pomiarów efektów i cyklicznych przeglądów. Redukcja marnotrawstwa nie jest jednorazowym projektem, lecz procesem ciągłego doskonalenia. W praktyce oznacza to konieczność monitorowania wskaźników, audytowania standardów oraz aktualizowania rozwiązań wraz ze zmianą asortymentu, technologii, wolumenów i wymagań klientów.

Analiza SWOT

W celu zidentyfikowania uwarunkowań operacyjnych oraz wyzwań rynkowych przeprowadzono kategoryzację czynników wpływających na proces eliminacji marnotrawstwa. Zestawienie w tabeli 3 systematyzuje wewnętrzny potencjał organizacji i zewnętrzne trendy technologiczne, w tym klasyczny obraz Lean Management, oraz pokazuje ryzyko związane z nieprzemyślaną cyfryzacją łańcuchów dostaw.

Tabela 3. Analiza SWOT dla procesu eliminacji marnotrawstwa w logistyce

Table 3. SWOT analysis for the waste elimination process in logistics

Czynniki	Pozytywny wpływ	Negatywny wpływ
Wewnętrzne	- Zastosowanie narzędzi Lean Management (np. 5S, Kaizen, VSM) skutecznie porządkuje przestrzeń pracy, uwidacznia odchylenia od normy i angażuje pracowników. - Podejście procesowe umożliwia kompleksową identyfikację strat o charakterze międzyoddziałowym. - Skuteczne i systemowe ograniczanie marnotrawstwa prowadzi do bezpośredniego obniżenia kosztów operacyjnych i poprawy jakości obsługi.	- Symptomy marnotrawstwa doskonale ukrywają się w rutynowych operacjach, co znacznie utrudnia ich identyfikację bez przeprowadzenia diagnozy. - Lokalna optymalizacja poszczególnych działów oraz dobór niewłaściwych wskaźników efektywności mogą generować dodatkowe straty w innych ogniwach łańcucha. - Wdrażanie zaawansowanych technologii (WMS, TMS) w środowisku nieuporządkowanym i pozbawionym standardów grozi organizacyjnym chaosem.
Zewnętrzne	- Rozwój cyfryzacji i narzędzi Logistyki 4.0 (big data, IoT, chmura) umożliwia przejście od reaktywnego niwelowania problemów do analizy predykcyjnej i planowego zapobiegania stratom. - Wykorzystanie automatycznej identyfikacji (np. kody kreskowe, RFID) pozwala na tworzenie systemowych barier Poka-Yoke, bezwzględnie zapobiegających ludzkim błędom. - Integracja przepływów poprzez systemy ERP zapewnia transparentność typu end-to-end, co jest fundamentem skracania opóźnień i budowania niezawodności logistycznej.	- Ciągła zmienność popytu, rosnąca presja minimalizacji kosztów oraz skracania czasów realizacji stanowią potężne obciążenie dla stabilności współczesnych łańcuchów dostaw. - Dynamiczny rozwój handlu e-commerce potęguje trudności operacyjne ze względu na dużą liczbę małych zamówień, szeroki asortyment i presję błyskawicznej kompletacji. - Zjawiska takie jak efekt byczego bicia prowadzą do zniekształceń informacyjnych, które błyskawicznie generują nadmierne zapasy, nieefektywny transport i problemy z planowaniem zdolności.

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Podsumowanie i wnioski

Zjawisko marnotrawstwa w logistyce jest wielowymiarowe. Obejmuje nie tylko widoczne straty, takie jak uszkodzenia towaru, puste przebiegi lub nadmierne zapasy, lecz także straty ukryte w przepływie informacji, organizacji pracy i systemie podejmowania decyzji. Analiza wykazała, że marnotrawstwo jest najczęściej międzyoddziałowe, dlatego jego skuteczne ograniczanie wymaga spojrzenia na cały proces, a nie wyłącznie na pojedynczy dział. Wysokie koszty marnotrawstwa występują najczęściej przy dużej liczbie powtarzalnych operacji. Standardowym przykładem jest kompletacja zamówień, na którą wpływają pracownicy, jakość danych systemowych czy fizyczny układ regałów, a błąd popełniony na tym etapie wyzwała efekt domina, zwiększając koszty pakowania i transportu, co ma wpływ na relacje z klientami.

Przeprowadzona weryfikacja metod dowodzi, że fundamentem skutecznej redukcji strat pozostaje Lean Management. Natomiast narzędzia takie jak 5S, VSM czy standaryzacja nie tylko pozwalają uporządkować przestrzeń, ale przede wszystkim wykryć odchy-

lenia od normy. Technologie cyfrowe, choć bezdyskusyjnie krytyczne w nowoczesnych łańcuchach dostaw, stanowią jedynie nadbudowę dla tych działań. Wnioski z analizy wykazały konieczność zachowania odpowiedniej sekwencji wdrożeniowej. Cyfryzacja nie może wyprzedzać porządkowania procesów. Instalacja zaawansowanych systemów WMS czy TMS w organizacji pozbawionej standardów to najkrótsza droga do utrwalenia błędów systemowych w nowej, nieporównywalnie droższej formie technologicznej.

Przekładając te ustalenia na praktykę, przedsiębiorstwa powinny inicjować zmiany, zaczynając od diagnozy stanu obecnego. Zaproponowana w artykule sekwencja działań ma w tym kontekście służyć jako praktyczne narzędzie logistyczne. Pozwala ono zrezygnować z intuicyjnej niwelacji problemów na rzecz systematycznego parowania obserwowanych objawów z konkretnymi, mierzalnymi działaniami naprawczymi. Dopiero powiązanie tych usprawnień z systemami mierników gwarantuje trwałą redukcję kosztów i wzmacnia odporność sieci dostaw.

Naturalnym kierunkiem przyszłych badań powinna być empiryczna weryfikacja zaproponowanego wzorca w rzeczywistych środowiskach logistycznych. Pozwoli to rozstrzygnąć, w jakich warunkach innowacje cyfrowe dają realną przewagę nad „miękkimi” usprawnieniami, a kiedy stają się jedynie kosztownym kamuflażem dla nieuporządkowanych procesów.

Z przeprowadzonej analizy wynika kilka kluczowych wniosków:

- Zjawisko marnotrawstwa rzadko ogranicza się do jednego, odizolowanego stanowiska. W praktyce straty, zwłaszcza te natury informacyjnej, płynnie przenikają przez różne działy firmy, wymuszając spojrzenie na problem z wielu stron.
- W codziennej praktyce logistycznej to kompletacja zamówień oraz polityka zarządzania zapasami okazują się strefami największego ryzyka.
- Walkę z nieefektywnością należy zaczynać od podstaw. Zaleca się zastosowanie klasycznych, „miękkich” rozwiązań z nurtu Lean (takich jak 5S, standaryzacja pracy czy filozofia Kaizen).
- Zaawansowane systemy informatyczne (WMS, TMS czy infrastruktura RFID) zwiększają wydajność operacyjną, jednak decyzja o ich implementacji powinna być podejmowana ostrożnie. Cyfryzacja ma sens tylko wtedy, gdy dotyczy środowiska już zoptymalizowanego.

Bibliografia

- Bowersox D.J., Closs D.J., Cooper M.B., Bowersox J.C., 2013: *Supply Chain Logistics Management*, 4th ed., McGraw-Hill, New York.
- Boysen N., de Koster R., Weidinger F., 2019: Warehousing in the e-commerce era: A survey, *European Journal of Operational Research* 277(2), 396–411, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.08.023>
- Bozarth C.C., Handfield R.B., 2019: *Wprowadzenie do zarządzania operacjami i łańcuchem dostaw*, Wydawnictwo Helion, Gliwice.
- Christopher M., 2016: *Logistics & Supply Chain Management*, 5th ed., Pearson, London.
- Coyle J.J., Langley C.J., Novack R.A., Gibson B.J., 2017: *Supply Chain Management: A Logistics Perspective*, 10th ed., Cengage Learning, Boston.

- de Koster R., Le-Duc T., Roodbergen K.J., 2007: Design and control of warehouse order picking: A literature review, *European Journal of Operational Research* 182(2), 481–501, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.009>
- Dukic G., Oluic C., 2007: Order-picking methods: Improving order-picking efficiency, *International Journal of Logistics Systems and Management* 3(4), 451–460, <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2007.013214>
- Efthymiou O.K., Ponis S.T., 2021: Industry 4.0 Technologies and Their Impact in Contemporary Logistics: A Systematic Literature Review, *Sustainability* 13(21), 11643, <https://doi.org/10.3390/su132111643>
- Eurostat, 2021: A fifth of road freight kilometres by empty vehicles, *Products Eurostat News*, December 10, 2021, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20211210-1> [dostęp: 12.02.2026].
- Faber N., de Koster R.B.M., van de Velde S.L., 2002: Linking warehouse complexity to planning and control structure, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 32(5), 381–395, <https://doi.org/10.1108/09600030210434161>
- Gu J., Goetschalckx M., McGinnis L.F., 2007: Research on warehouse operation: A comprehensive review, *European Journal of Operational Research* 177(1), 1–21, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.02.025>
- Hicks B.J., 2007: Lean information management: Understanding and eliminating waste, *International Journal of Information Management* 27(4), 233–249, <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2006.12.001>
- Kache F., Seuring S., 2017: Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management, *International Journal of Operations & Production Management* 37(1), 10–36, <https://doi.org/10.1108/IJOPM-02-2015-0078>
- Knop K., 2020: Value Stream Mapping in Logistics, *Production Engineering Archives* 26(3), 114–118, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.005>
- Liker J.K., 2020: Droga Toyoty. 14 zasad zarządzania wiodącej firmy produkcyjnej świata, MT Biznes, Warszawa.
- Minashkina D., Happonen A., 2023: Warehouse Management Systems for Social and Environmental Sustainability: A Systematic Literature Review and Bibliometric Analysis, *Logistics* 7(3), 40, <https://doi.org/10.3390/logistics7030040>
- Rushton A., Croucher P., Baker P., 2017: *The Handbook of Logistics and Distribution Management*, 6th ed., Kogan Page, London.
- Shah R., Ward P.T., 2007: Defining and developing measures of lean production, *Journal of Operations Management* 25(4), 785–805, <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.019>
- Skowronek C., Sarjusz-Wolski Z., 2012: *Logistyka w przedsiębiorstwie*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa.
- van Gils T., Ramaekers K., Caris A., de Koster R.B.M., 2018: Designing efficient order picking systems by combining planning problems: State-of-the-art classification and review, *European Journal of Operational Research* 267(1), 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.09.002>
- Winkelhaus S., Grosse E.H., 2020: Logistics 4.0: A systematic review towards a new logistics system, *International Journal of Production Research* 58(1), 18–43, <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1612964>
- Womack J.P., Jones D.T., 2003: *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*, revised and updated edition, Free Press, New York.
- World Bank, 2023: *Connecting to Compete 2023: Trade Logistics in an Uncertain Global Economy*, World Bank, Washington, <https://lpi.worldbank.org/report> [dostęp: 12.02.2026].

Kacper Lipski✉

Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki

Linie okrężne jako element optymalizacji systemu kolei pasażerskiej w ujęciu Lean Management

Circular railway lines as an element of passenger rail system optimization from a Lean Management perspective

Synopsis. Wzrost znaczenia kolei aglomeracyjnej w Polsce powoduje konieczność poszukiwania rozwiązań zwiększających efektywność funkcjonowania systemów transportowych przy ograniczonych zasobach infrastrukturalnych i taborowych. Celem artykułu jest ocena możliwości wykorzystania linii okrężnych jako narzędzia zwiększania efektywności systemów kolei aglomeracyjnej w ujęciu Lean Management, ze szczególnym uwzględnieniem ograniczania marnotrawstwa operacyjnego oraz poprawy wykorzystania dostępnych zasobów. W pracy wykorzystano przegląd wybranych źródeł oraz dostępnych koncepcji transportowych, a także studium przypadku koncepcji linii okrężnej SKA4 w krakowskim węźle kolejowym, prowadzonej po tzw. dużej obwodnicy kolejowej. Analizie poddano parametry eksploatacyjne obejmujące: czas przejazdu, konstrukcję rozkładu jazdy, organizację obiegów taboru oraz pracę drużyn pociągowych. Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że zastosowanie linii okrężnej umożliwia poprawę wykorzystania taboru, ograniczenie nieproduktywnych postojów oraz zwiększenie atrakcyjności oferty przewozowej. Zidentyfikowano także wyzwania oraz ograniczenia związane z nowatorską w polskich warunkach organizacją połączeń. Przeprowadzone badania wskazują, że odpowiednio zaprojektowane linie okrężne mogą stanowić skuteczne narzędzie zwiększania efektywności systemów kolei aglomeracyjnej i wspierać rozwój zrównoważonego transportu publicznego.

Słowa kluczowe: linie okrężne, transport kolejowy, kolej aglomeracyjna, Lean Management, krakowski węzeł kolejowy

✉ **Kacper Lipski** – student kierunku transport na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki; e-mail: kacper.lipski.555@gmail.com

Abstract. The growing importance of suburban rail transport in Poland creates a need for solutions that improve the efficiency of transport systems while operating under limited infrastructure and rolling stock resources. This paper examines circular railway lines as a tool for optimizing urban and suburban passenger rail systems from a Lean Management perspective, with particular emphasis on reducing operational waste and improving resource utilization. The research is based on a review of selected literature and existing transport concepts, as well as a case study of the proposed SKA4 circular railway line in the Kraków railway junction. The analysis focuses on key operational parameters, including travel time, timetable design, rolling stock circulation and train crew scheduling. The results indicate that the implementation of a circular railway line can improve rolling stock utilization, reduce non-productive dwell times and enhance the attractiveness of transport services. The study also identifies challenges and limitations associated with this innovative service organization in Polish conditions. The findings suggest that properly designed circular railway lines can constitute an effective tool for increasing the efficiency of suburban rail systems and supporting the development of sustainable public transport.

Keywords: circular railway lines, rail transport, suburban rail, Lean Management, Kraków railway junction

Kody JEL: R41, R42

Wprowadzenie

Rozwój dużych miast i aglomeracji miejskich wiąże się z rosnącym zapotrzebowaniem na sprawny, wydajny i niezawodny transport zbiorowy. Wraz z postępującą suburbanizacją coraz większą rolę odgrywa kolej aglomeracyjna, która dzięki swojej przepustowości i prędkości może skutecznie uzupełniać także system transportu miejskiego. W wielu europejskich miastach kolej pełni funkcję środka nie tylko transportu regionalnego, lecz również codziennych podróży wewnątrzmijskich.

Jednocześnie operatorzy kolejowi mierzą się z istotnymi wyzwaniami. Ograniczona dostępność nowoczesnego taboru, wysokie koszty eksploatacyjne oraz problemy z przepustowością kluczowych węzłów kolejowych powodują, że sama rozbudowa oferty przewozowej nie zawsze jest możliwa. Konieczne staje się poszukiwanie rozwiązań, które pozwalają osiągnąć więcej przy wykorzystaniu tych samych zasobów. Odpowiedzią na to wyzwanie dostarcza filozofia Lean Management, wywodząca się z japońskiego systemu produkcyjnego Toyoty, której celem jest maksymalizacja wartości dostarczanej użytkownikowi przy jednoczesnej eliminacji wszelkiego marnotrawstwa zasobów.

Jednym z rozwiązań organizacyjnych, które w naturalny sposób wpisują się w założenia Lean Management, jest koncepcja linii okrężnych – połączeń kolejowych kursujących w zamkniętej, nieprzerwanej pętli, bez klasycznej stacji początkowo-końcowej. Linie tego typu z powodzeniem funkcjonują w wielu miastach świata, w tym w Berlinie, Kopenhadze, Moskwie czy aglomeracjach azjatyckich, generując wysoki ruch pasażerski i charakteryzując się bardzo efektywnym wykorzystaniem taboru. Jak dotąd żadne połączenie tego rodzaju nie zostało uruchomione w Polsce.

Celem pracy jest ocena możliwości wdrożenia połączenia okrężnego w warunkach polskich. Jako poligon badawczy wybrano krakowski węzeł kolejowy i przebiegającą przez niego dużą obwodnicę kolejową Krakowa. Opracowano koncepcję połączenia nazwanego roboczo SKA4, wykorzystującego 45-kilometrową pętlę w ciągu linii kolejowych nr 8, 91 i 95.

W pracy postawiono następujące problemy badawcze: czy organizacja przewozów w formie linii okrężnej może przyczynić się do efektywniejszego wykorzystania istniejącej infrastruktury i taboru kolejowego, czy możliwe jest ograniczenie wybranych przejawów marnotrawstwa (zgodnie z ideą Lean Management) występujących w tradycyjnych połączeniach kolejowych oraz jakie korzyści i ograniczenia operacyjne wiąże się z wdrożeniem takiego rozwiązania.

Metodyka badań

W artykule opisano ideę linii okrężnych na tle istniejących systemów światowych. Zwrócono uwagę na liczne zalety, a także pojawiające się wyzwania operacyjne związane z niekonwencjonalną organizacją połączeń. W ramach metodyki badawczej zastosowano identyfikację i analizę marnotrawstwa (Muda) występującego w systemie kolejowego transportu pasażerskiego w ujęciu Lean Management. Przeprowadzono także badanie z wykorzystaniem metody studium przypadku dla krakowskiego węzła kolejowego. Analizie poddano istniejącą infrastrukturę kolejową tworzącą dużą obwodnicę Krakowa oraz rozkładowe czasy przejazdu na poszczególnych odcinkach sieci. Na tej podstawie opracowano koncepcję połączenia okrężnego SKA4 obejmującą przebieg trasy, rozkład jazdy, organizację obiegów taboru oraz organizację pracy drużyn pociągowych, a następnie przeanalizowano specyfikę funkcjonowania proponowanej linii, w tym rozwiązania z zakresu zarządzania opóźnieniami.

Idea linii okrężnych

Definicja oraz przykłady systemów

W trakcie przeglądu literatury dotyczącej linii okrężnych zidentyfikowano niejednoznaczności w definiowaniu połączenia tego typu. Do analizy przyjęto wyłącznie połączenia wykonujące nieprzerwanie przynajmniej kilka kursów w zamkniętej pętli typu A-B-C-D-A. Niekiedy do linii okrężnych zalicza się również linie typu „lasso”, a więc funkcjonujące w układzie półokrężnym A-B-C-D-B-A – w artykule nie uwzględniono jednak podobnych koncepcji, ograniczając się do „prawdziwych” pętli zamkniętych.

Linie okrężne charakteryzują się brakiem wyraźnej stacji początkowo-końcowej i w konsekwencji brakiem miejsca na postój pojazdu w celu wyrównania czasu powstałego opóźnienia. Powoduje to zmaksymalizowanie wskaźników efektywności wykorzystania taboru, a jednocześnie wyraźnie utrudnia zarządzanie opóźnieniami [Liebchen i in. 2022; Zhou i in. 2024].

Zgodnie ze stanem na 2022 rok zidentyfikowano 12 systemów kolejowych linii okrężnych funkcjonujących na świecie (tab. 1). Żadna znana linia okrężna nie działa w Polsce.

Tabela 1. Parametry linii okrężnych na świecie

Table 1. Characteristics of circular railway lines around the world

Miasto	Linia	Długość [km]	Liczba stacji	Śr. odl. między stacjami [m]	Czas jazdy [min]	Prędkość średnia [km/h]	Prędkość maksymalna [km/h]	Inne linie na trasie	Szczytowy interwał [min]
Pekin	2	23,1	18	1280	45	31,5	80		2,5
Pekin	10	57,1	45	1270	104	32,9	80		2
Berlin	S41/42	37,1	27	1370	60	37,1	80	+	5
Chengdu	7	38,6	31	1250	66	35,1	80		3,5
Kopenhaga	M3	15,5	17	910	30	31	80	+	3
Glasgow	N/A	10,5	15	700	24	26,3	54		4
Hamburg	U3	17,5	23	760	40	26,3	70	+	2; 3; 5
Madryt	6	23,5	28	840	52	27,1	80		3
Moskwa	5	19,4	12	1620	28	41,6	80		1,75
Seul	2	48,8	43	1130	84	34,9	80	+	2,33

Źródło: [Liebchen i in. 2022]

Source: [Liebchen et al. 2022]

Wyszczególnione w tabeli 1 linie to przede wszystkim szybkie koleje miejskie, o średnich odległościach międzyprzystankowych ok. 1 km. Wszystkie oceniane są pozytywnie, generują bardzo duży ruch pasażerski oraz charakteryzują się wysoką częstotliwością kursowania – interwały w godzinach szczytu wahają się od 5,5 min w Zhengzhou do 1,75 min na linii moskiewskiej. Berlińska S41/S42 wyróżnia się na tle pozostałych linii okrężnych – nie jest to typowa linia metra, lecz oficjalnie zwykłe połączenie kolejowe [Liebchen i in. 2022].

Wady i zalety linii okrężnych

Podsumowano zalety oraz wady połączeń okrężnych w formie zamkniętej pętli.

Do zalet zaliczono:

- zwiększenie liczby relacji bezpośrednich przez brak końca trasy;
- bardzo wysoki wskaźnik wykorzystania taboru – brak przestojów (przerw), brak straty czasu potrzebnego na zmianę kierunku jazdy, brak przejazdów technicznych w ciągu dnia;
- poprawa efektywności wykorzystania połączenia – dwukierunkowa obsługa każdego z przystanków ulokowanych na trasie umożliwia bezpośrednie połączenie w dwóch alternatywnych kierunkach – brak końca linii, który pozwala korzystać z połączeń wyłącznie jednokierunkowo;
- w przypadku wielu relacji możliwe jest połączenie dwoma alternatywnymi korytarzami;
- możliwość połączenia łącznikowego różnych linii radialnych (kolejowych, tramwajowych, autobusowych) – odciążenie centrum miasta jako węzła przesiadkowego;
- impuls do rozwoju gospodarczego poza centrum miasta [Suzuki i in. 2013].

Wśród wad połączeń okrężnych wyróżniono:

- utrudnione zarządzanie w razie opóźnień, konieczność zastosowania niestandardowego podejścia;
- konieczność stworzenia odrębnego, czytelnego systemu informacji pasażerskiej;
- skomplikowana organizacja pracy drużyny pociągowej (konieczność zapewnienia przerw);
- komplikacje związane z rozpoczęciem oraz zakończeniem kursowania pojazdu na linii;
- potencjalne trudności związane z ułożeniem praktycznych rozkładów jazdy z równomiernymi interwałami między kolejnymi kursami;
- nierównomierne obciążenie odcinków – niesymetryczne potoki pasażerskie w ramach pętli, występowanie „gorących” i „zimnych” segmentów [Tirachini i in. 2021].

Pomimo licznych wyzwań operacyjnych linie okrężne zapewniają istotne korzyści, takie jak wysoki wskaźnik wykorzystania taboru oraz efektywności połączeń. W tych obszarach połączenia okrężne wykazują przewagę nad klasycznymi połączeniami radialnymi, wpisując się także idealnie w zasady Lean Management dotyczące eliminacji marnotrawstwa i maksymalizacji efektywności wykorzystania zasobów. Wskazane wcześniej wady systemu okrężnego można zminimalizować poprzez odpowiednie planowanie rozkładu jazdy oraz organizację pracy drużyn pociągowych i systemów zarządzania ruchem.

Linie okrężne a Lean Management

Koncepcja Lean Management to sposób zarządzania, którego głównym celem jest dostarczanie jak największej wartości dla klienta przy jednoczesnym eliminowaniu marnotrawstwa, wywodząca się z japońskiego systemu produkcyjnego Toyoty. Choć Lean Management narodził się w przemyśle wytwórczym, jego zasady z powodzeniem wykorzystywane są w usługach, logistyce, opiece zdrowotnej, a w ostatnich dekadach także w transporcie publicznym. W sektorze transportowym „wartością” jest możliwość przemieszczenia się z punktu A do punktu B w sposób szybki, niezawodny i wygodny. Marnotrawstwem są natomiast wszelkie zasoby pochłaniane przez system bez wytwarzania tej wartości.

Taiichi Ohno zidentyfikował pierwotnie siedem rodzajów marnotrawstwa (jap. Muda), które następnie zaadaptowano w różnych sektorach [Ohno 1988]. W kontekście transportu kolejowego można je przedstawić następująco:

- nadprodukcja – uruchamianie kursów bez pasażerów, puste przebiegi techniczne taboru;
- oczekiwanie – czas, w którym pojazd stoi beczynnie na stacji końcowej lub w zajezdni;
- zbędny transport – przejazdy techniczne taboru między zajezdnią a miejscem rozpoczęcia kursu oraz w ciągu dnia;
- nadmierne przetwarzanie – skomplikowane procedury zmiany kierunku jazdy, niepotrzebne manewry na stacjach;
- nadmierne zapasy – utrzymywanie zbyt dużej floty rezerwowej w stosunku do rzeczywistych potrzeb;
- zbędny ruch – niepotrzebne przemieszczanie taboru i pracowników;
- defekty – awarie, opóźnienia.

W przypadku klasycznego połączenia kolejowego marnotrawstwo rozpatrywane jest przede wszystkim w kategoriach oczekiwania oraz nadmiernego przetwarzania – pomiędzy kursami oraz w trakcie manewrów, kiedy pojazd nie wykonuje pracy przewozowej.

W idei linii okrężnych można odnaleźć wiele założeń Lean. Jedną z najważniejszych zalet połączeń okrężnych jest bardzo wysoki poziom wykorzystania taboru. Dzięki brakowi klasycznego końca trasy ogranicza się postoje techniczne oraz czas potrzebny na zmianę kierunku jazdy. Linia okrężna przypomina organizację ciągłego przepływu (continuous flow), w której pojazd jest w nieprzerwanym ruchu, co ogranicza straty związane z oczekiwaniem oraz operacjami pomocniczymi. Z perspektywy Lean Management oznacza to zwiększenie płynności procesu przewozowego oraz lepsze wykorzystanie dostępnych zasobów technicznych. Jest to także oczywista redukcja czasu, w którym pojazd nie wykonuje pracy przewozowej, co bezpośrednio wpisuje się w zgodne z duchem Lean ograniczanie marnotrawstwa, szczególnie w zakresie oczekiwania i nadmiernego przetwarzania. Istotnym aspektem jest również zwiększona liczba relacji oraz możliwość połączenia różnych linii radialnych, co poprawia płynność całego systemu transportowego i odciąża przepełnione węzły przesiadkowe w centrach miast. Z perspektywy Lean oznacza to usprawnienie przepływu pasażerów i skrócenie czasu podróży, czyli zwiększenie wartości dostarczanej pasażerom korzystającym z systemu transportowego.

Jednocześnie organizacja połączeń okrężnych wiąże się z wyzwaniami charakterystycznymi dla wysoce zoptymalizowanych systemów. Brak klasycznego początku i końca linii utrudnia zarządzanie opóźnieniami, ponieważ zakłócenie w jednym miejscu może wpływać na funkcjonowanie całej pętli. Z punktu widzenia Lean są to potencjalne źródła strat organizacyjnych, wymagające ciągłego monitorowania i doskonalenia procesów.

Można więc stwierdzić, że linie okrężne stanowią przykład rozwiązania zgodnego z filozofią Lean Management, ponieważ umożliwiają maksymalizację efektywności wykorzystania taboru i infrastruktury oraz poprawę jakości obsługi pasażerów. Ich skuteczne funkcjonowanie wymaga jednak bardzo sprawnego zarządzania operacyjnego oraz elastycznego reagowania na zakłócenia w ruchu.

Kluczowe aspekty organizacji połączeń okrężnych

Szczególnie istotnym aspektem organizacji połączeń w formie okrężnej jest reagowanie w razie opóźnień. Połączenia okrężne, tak jak wszystkie pozostałe linie komunikacyjne, narażone są na występowanie opóźnień o różnej genezie. Ze względu na brak czasu wyrównawczego na końcu trasy (jak w przypadku linii klasycznych) zarządzanie opóźnieniami jest wyraźnie trudniejsze. W literaturze dotyczącej linii okrężnych [Liebchen i in. 2022; Zhou i in. 2024] wyróżniono kilka możliwych reakcji w sytuacji opóźnień, takich jak:

- przyspieszenie opóźnionego pojazdu – pominięcie przystanku, przejazd skrótem;
- spowolnienie pozostałych pojazdów w danym kierunku;
- włączenie pociągu z innego zadania przewozowego (np. linii okrężnej w drugim kierunku bądź odrębnej linii);
- włączenie pociągu rezerwowego do obsługi linii.

Wszystkie wymienione rozwiązania mają swoje wady i zalety. Możliwość oraz opłacalność ich zastosowania zależy w dużym stopniu od specyfiki danej linii oraz konkretnej sytuacji – nie każde rozwiązanie będzie odpowiednie na wszystkich liniach. Pierwsze trzy przedstawione powyżej możliwości reakcji sprawdzą się wyłącznie na liniach o bardzo krótkich taktach, gdzie pociągi pojawiają się na przystankach co kilka minut, a pasażerowie nie muszą wcześniej sprawdzać rozkładu jazdy. W ramach koncepcji wdrożenia rozwiązania linii okrężnej w polskich warunkach ze względu na przewidywane dłuższe interwały między kolejnymi kursami w przypadku kumulujących się opóźnień realnie wydaje się tylko włączanie do obsługi linii pociągu rezerwowego.

Założenie kursowania pociągów w zamkniętej pętli typu A-B-C-D-A jest jednak rozwiązaniem nowatorskim w realiach polskiej kolei – nie jest znane żadne funkcjonujące w kraju połączenie w formie linii okrężnej. Sprawdzone, czy obecny stan prawny nie wyklucza takiej organizacji połączenia, i nie znaleziono żadnych przeciwwskazań [MTBiGM 2013; PKP PLK 2025a]. Konieczne jest wskazanie stacji początkowej i stacji końcowej, chociażby na potrzeby stworzenia tablicy kierunkowej. Uznano jednak, że przyjęcie dowolnej spośród stacji na trasie linii zarówno jako stacji początkowej, jak i końcowej połączenia można uznać za rozwiązanie wystarczające.

Linia okrężna po dużej obwodnicy kolejowej Krakowa – studium przypadku

Uwarunkowania lokalne

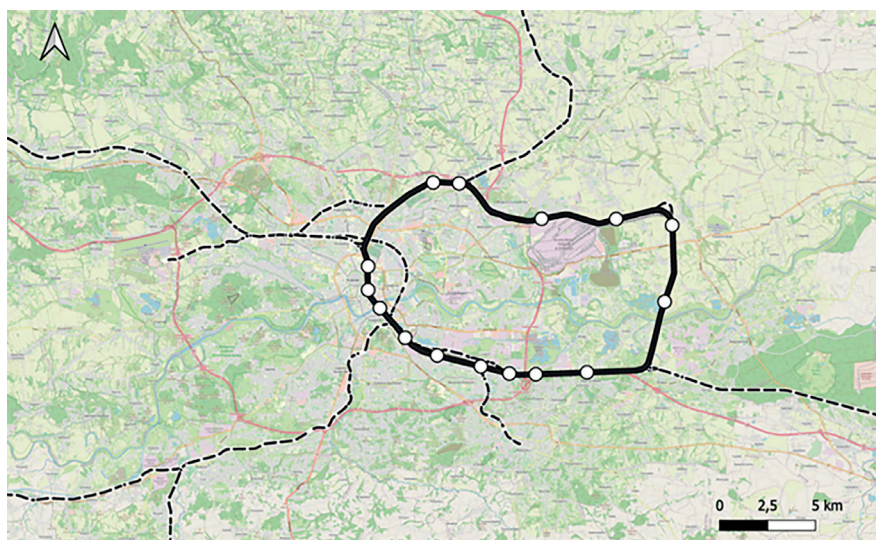
Zasadność oraz możliwość uruchomienia kolejowego połączenia okrężnego w polskich warunkach postanowiono sprawdzić na przykładzie wytypowanego poligonu – krakowskiego węzła kolejowego oraz dużej obwodnicy kolejowej Krakowa.

Według statystyk prowadzonych przez Urząd Transportu Kolejowego (UTK) znaczenie kolei aglomeracyjnej stale rośnie. Nie inaczej jest w przypadku Krakowa, gdzie w ostatnich latach wewnątrz miasta powstało kilka nowych przystanków kolejowych, co umożliwia efektywne podróżowanie także w obrębie jego granic [Ciastoń-Ciulkin i in. 2024]. W ramach krakowskiego węzła kolejowego przewoźnicy regionalni świadczą trzech przewoźników, czyli Koleje Małopolskie, Polregio oraz Koleje Śląskie. Obsługują one 12 różnych relacji, promieniście rozchodzących się w czterech podstawowych kierunkach z dworca Kraków Główny i dalej w siedmiu alternatywnych kierunkach różnych linii kolejowych. Połączenia obsługujące krakowski węzeł kolejowy to przede wszystkim kursy łączące odległe części aglomeracji, z kierunków takich jak Tarnów, Katowice, Oświęcim czy Kielce, oddalonych często o blisko 100 km od stolicy Małopolski [Polregio 2025]. Jedynym wyjątkiem jest linia SKA1 na trasie Kraków Lotnisko – Wieliczka Rynek-Kopalnia, która dzięki krótkiej trasie, zlokalizowanej w całości w obrębie aglomeracji, pełni funkcję środka transportu miejskiego. Linia ta charakteryzuje się ponadto wysoką częstotliwością kursowania, dużą dostępnością czasową w ciągu doby oraz równymi, 30-minutowymi interwałami pomiędzy kursami [PKP PLK 2025b]. Są to cechy szczególnie cenione przez pasażerów i wskazywane jako pożądane przy kształtowaniu efektywnej oferty komunikacji miejskiej [European Commission 2023]. Linia ta

jest jednak w skali regionu przypadkiem wyjątkowym i wskazuje kierunek, w którym powinny podążać także pozostałe połączenia, aby stanowić atrakcyjną ofertę poruszania się po mieście.

Przeanalizowano wnioski z przeprowadzonego w 2023 roku badania ankietowego [Ciastoń-Ciulkin i in. 2024]. Potwierdzają one, że przystanek Kraków Złocień, który jest zlokalizowany w pobliżu gęsto zabudowanego osiedla mieszkaniowego, służy przede wszystkim do obsługi podróży wewnątrzmięjskich. Ankietowani ocenili jakość oferty kolejowej w Krakowie oraz wskazali swoje potrzeby w zakresie jej dalszego rozwoju – czynnikami zniechęcającymi do wyboru pociągu są: niska częstotliwość kursowania, problemy z integracją taryfową i punktualnością oraz słabo rozwinięta siatka połączeń z różnymi częściami aglomeracji – w wielu przypadkach cel podróży znajdował się poza zasięgiem kolei. Są to kluczowe obszary wymagające dalszej poprawy, co wzięto pod uwagę w niniejszej pracy.

Wytyczenie okrężnego połączenia kolejowego, które mogłoby być odpowiedzią na problemy związane z oceną atrakcyjności przewozów kolejowych w obrębie miasta, jest uzależnione od odpowiedniej infrastruktury, umożliwiającej poruszanie się taboru w nieprzerwanej pętli. Kraków dysponuje rozbudowanym węzłem kolejowym, w którym podstawę układu stanowią linie promieniste zbiegające się w rejonie stacji Kraków Główny. Uzupełnieniem tego układu są linie obwodowe, w tym tzw. duża obwodnica kolejowa Krakowa. Jej zasadniczą część stanowi linia kolejowa nr 95. Pod uwagę wzięto jednak zamkniętą pętlę w ciągu linii o numerach 8, 91 oraz 95, wytyczoną pomiędzy stacjami Kraków Główny – Kraków Batowice – Kraków Nowa Huta – Kraków Bieżanów – Kraków Płaszów – Kraków Główny, przedstawioną na rysunku 1.



Rysunek 1. Przebieg wytyczonej pętli
Figure 1. Route of the proposed loop line

Źródło: opracowanie własne
Source: own elaboration

Infrastruktura ta jest w pełni przejezdna i wykorzystywana w ruchu pasażerskim oraz towarowym, jednak obecna oferta przewozowa ma miejscami charakter nieciągły. W latach 2016–2018 linia nr 95 (duża obwodnica) przeszła kapitalny remont umożliwiający zwiększenie maksymalnej prędkości do 100 km/h na większości odcinków [Madrjas 2016] – jest to prędkość wystarczająca do prowadzenia efektywnych przewozów kolejowych w obrębie aglomeracji.

Wytyczona pętla obejmuje swoim zasięgiem zarówno duże osiedla miejskie, jak i okolice słabiej zaludnione, jednak stale się rozwijające wraz z postępującymi procesami urbanizacyjnymi. Wzdłuż jej przebiegu wciąż przybywa mieszkańców, czyli potencjalnych pasażerów potrzebujących sprawnego transportu. Biorąc pod uwagę analizę materiałów źródłowych, w tym badania ankietowego [Ciastoń-Ciulkin i in. 2024], oraz inne czynniki, stwierdzono istnienie niewykorzystanego potencjału poprawy jakości przewozów realizowanych z wykorzystaniem dużej obwodnicy kolejowej Krakowa. Rozwój efektywnego, szybkiego i niezawodnego transportu szynowego byłby istotnym czynnikiem ruchotwórczym zarówno w relacjach wewnątrzmijskich, jak i pomiędzy peryferyjnymi obszarami miasta, a także – co istotne – czynnikiem stymulującym dalszy rozwój urbanistyczny Krakowa.

Opracowano koncepcję uruchomienia nowego połączenia kolejowego w formie linii okrężnej, poruszającego się po wytyczonej obwodnicy dwukierunkowo, w ramach nieprzerwanej pętli, na wzór okrężnych linii funkcjonujących na świecie, m.in. w Berlinie, Kopenhadze, Glasgow czy aglomeracjach azjatyckich.

Linia okrężna prowadzona po dużej obwodnicy

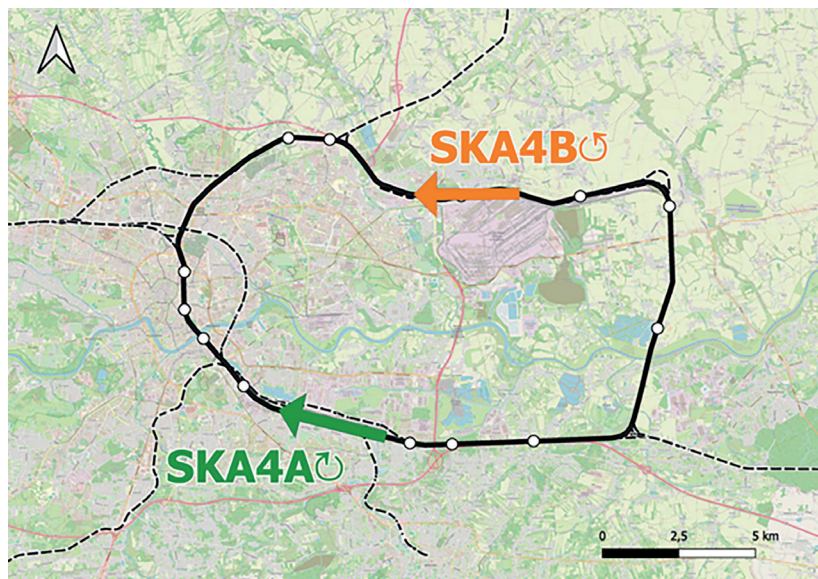
Zdecydowano się na przeanalizowanie rozwiązania, które umożliwi pełniejsze wykorzystanie istniejącej infrastruktury oraz zapewni nową jakość połączeń wewnątrzaglomeracyjnych. Wychodząc naprzeciw zidentyfikowanym problemom, przedstawiono propozycję usprawnienia komunikacji kolejowej na dużej obwodnicy poprzez uruchomienie linii okrężnej prowadzonej po analizowanej 45-kilometrowej pętli.

Koncepcja zakłada uruchomienie połączenia poruszającego się po wspomnianej pętli (ciąg linii kolejowych nr 8, 95, 91) dwukierunkowo, przelotowo, bez dłuższego zatrzymywania (kończenia biegu pociągu).

Połączenie to zostało roboczo nazwane SKA4, przy czym wyróżniono dwie relacje:

- SKA4A – poruszającą się po pętli w prawo zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, czyli Kraków Główny – Kraków Batowice – Kraków Przylasek – Kraków Płaszów – Kraków Główny;
- SKA4B – poruszającą się po pętli w lewo, w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, czyli Kraków Główny – Kraków Płaszów – Kraków Przylasek – Kraków Batowice – Kraków Główny.

Zostały one przedstawione schematycznie na rysunku 2.



Rysunek 2. Przyjęte kierunki połączenia SKA4

Figure 2. Assumed service directions of the SKA4 line

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Dla zaproponowanej koncepcji połączenia okrężnego opracowano założenia dotyczące rozkładu jazdy, organizacji pracy taboru i drużyn pociągowych, a także zarządzania opóźnieniami i innymi kwestiami operacyjnymi, które przedstawiono w dalszych punktach artykułu. Przyjęte założenia miały na celu możliwie efektywne wykorzystanie istniejącej infrastruktury i taboru zgodnie z założeniami Lean Management.

Czas przejazdu połączenia

W przygotowanym wariantcie obsługi przebiegu analizowanej obwodnicy w formie połączenia okrężnego uwzględniono stan obecny, czyli bez zmian infrastrukturalnych (np. budowy nowych przystanków). Przeanalizowano możliwość uruchomienia połączenia praktycznie „od zaraz”, bez żadnych inwestycji.

W związku z powyższym czasy przejazdów konkretnych odcinków zostały przyjęte na podstawie aktualnych czasów rozkładowych pociągów regionalnych. Dla odcinka Kraków Przylasek – Węgrzce Wielkie (łącznicy nieużywanej liniowo) czas przejazdu oszacowano na 6 min, uwzględniając odległości, parametry linii kolejowych oraz przeciętny czas przejazdu przyjmowany dla porównywalnych odcinków, z uwzględnieniem bezpiecznej rezerwy. W tabeli 2 podano charakterystykę proponowanej trasy linii SKA4A (obsługa w kierunku prawym, zgodnie z ruchem wskazówek zegara). Wyłuszczone czas przejazdu na odcinku pomiędzy przystankami Kraków Przylasek i Węgrzce Wielkie, który nie jest obsługiwany przez pociągi regionalne jeżdżące liniowo i został oszacowany na potrzeby analizy.

Tabela 2. Charakterystyka przebiegu linii SKA4

Table 2. Route characteristics of the SKA4 line

Lp.	Nazwa przystanku	Odległość całkowita [km]	Odległość od poprzedniego przystanku [km]	Czas przejazdu od początku trasy [min]	Czas przejazdu od poprzedniego przystanku [min]
1	Kraków Główny	0	0,0	0	0
2	Kraków Batowice	6,2	6,2	6	6
3	Kraków Piastów	7,5	1,3	9	3
4	Kraków Lubocza	12,5	5,0	15	6
5	Kraków Nowa Huta	16,5	4,0	20	5
6	Kraków Kościelniki	20,2	3,7	25	5
7	Kraków Przylasek	24,2	4,0	29	4
8	Węgrzce Wielkie	30,7	6,5	35	6
9	Kokotów	33,4	2,7	37	2
10	Kraków Złocien	34,7	1,3	40	3
11	Kraków Bieżanów	36,3	1,6	42	2
12	Kraków Prokocim	38,6	2,3	44	2
13	Kraków Płaszów	40,6	2,0	46	2
14	Kraków Zabłocie	42,6	2,0	49	3
15	Kraków Grzegórzki	43,7	1,1	51	2
16	Kraków Główny	45	1,3	54	3

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Na analizowanej trasie 45-kilometrowej pętli znalazło się 15 przystanków. Średnia odległość międzyprzystankowa wynosi 3 km, przy czym największa wynosi aż 6,5 km, a najmniejsza 1,1 km (w centrum Krakowa).

Po przeanalizowaniu czasu jazdy można zauważyć, że przejazd pełnego odcinka pętli, od stacji Kraków Główny z powrotem na stację Kraków Główny, zajął 54 min. Jest to bardzo korzystna sytuacja – jeśli przyjmiemy, że czas obsługi stacji Kraków Główny wynosi 6 min, kolejny kurs danej brygady obsłuży wszystkie przystanki linii dokładnie godzinę później. Założyć więc można obsługę trasy w co najmniej godzinny takt o równych interwałach, ze stałymi końcówkami minutowymi godzin odjazdów. Pozwala to zwiększyć czytelność rozkładów jazdy i jest uważane przez pasażerów za dodatkowy atut [Pitka i in. 2024].

Konieczność sześciominutowego postoju na stacji Kraków Główny może się wydawać pasażerom tranzytowym nieatrakcyjnym wydłużeniem podróży. Jest on jednak istotny, ponieważ znajdzie odzwierciedlenie w poprawie punktualności linii – jest to jedyne miejsce na trasie, gdzie pociąg może próbować wyrównać powstałe opóźnienia (w klasycznych liniach jest to stacja początkowo-końcowa). Dłuższy czas obsługi stacji (czas wyrównawczy) warto zaplanować właśnie na Krakowie Głównym – to największa stacja linii oraz całego krakowskiego węzła kolejowego. W przypadku większości pociągów przyjmuje

się dłuższe czasy postoju na tej stacji, uwzględniające potencjalne utrudnienia wjazdu lub wyjazdu oraz możliwość przedłużania się wymiany pasażerskiej. Dzięki temu, że czas przejazdu po pełnej pętli wynosi równą godzinę, odjazdy z przystanków będą ułożone w równych taktach, ze stałymi końcówkami minutowymi w ciągu doby.

Układ kursów

Jak wspomniano, w opisywanej koncepcji w ciągu całego okresu funkcjonowania połączenia pociągi będą pojawiać się na przystankach równo co godzinę w obu kierunkach. Założenie to wynika z ograniczonej przepustowości newralgicznych punktów krakowskiego węzła kolejowego oraz nieznanego popytu na przewozy w ramach analizowanej relacji. W przyszłości nie wyklucza się zagęszczenia odjazdów, np. do taktu 30-minutowego w godzinach szczytu – wymagałoby to jednak z pewnością szczegółowej analizy przepustowości poszczególnych odcinków sieci.

W celu stworzenia rozkładu jazdy niezbędne było określenie wzajemnego przesunięcia odjazdów pojazdów w różnych kierunkach (równoznaczne z określeniem stałych miejsc krzyżowania się brygad). Ze względu na brak poważnych ograniczeń dotyczących krzyżowania pociągów na trasie (ciągłość linii dwutorowych) rozkład starano się ułożyć, uwzględniając przede wszystkim potrzeby pasażerów.

Na podstawie wyników ankietowych [Ciaśko-Ciulkin i in. 2024] oraz ogólnych schematów przytaczanych w literaturze [Suzuki i in. 2013; European Commission 2023] założono, że najpopularniejszymi stacjami będą Kraków Główny i Kraków Grzegórzki, zlokalizowane w centrum miasta.

Z charakterystyki linii okrężnej wynika, że czas przejazdu pomiędzy przeciwległymi stacjami w pętli jest zbliżony w przypadku połączeń w obu kierunkach. Rozkłady ułożono pod kątem atrakcyjnego dojazdu pasażerów do centrum miasta z przeciwległego końca linii, a więc stacji: Kraków Przylasek, Kraków Kościelniki oraz Kraków Nowa Huta. W przypadku wszystkich trzech przystanków proponowana linia byłaby najprawdopodobniej jedynym dostępnym połączeniem regionalnym. W miarę możliwości starano się ułożyć naprzemiennie odjazdy linii z powyższych przystanków, zapewniając skoordynowane połączenia do i z centrum (na stacje Kraków Główny i przystanek Kraków Grzegórzki), z wykorzystaniem trasy przez Kraków Batowice naprzemiennie z trasą przez Kraków Płaszów. Odjazdy z Krakowa Głównego ułożone zostały z wzajemnym przesunięciem naprzemiennie 29 i 31 min w celu zapewnienia dobrej koordynacji dla przystanków po wschodniej stronie pętli i z innymi liniami. Przy przyjętych odsunięciach czasowych kursów pociągi linii SKA4A i SKA4B rozkładowo krzyżować się będą pomiędzy przystankami Kraków Piastów i Kraków Lubocza, a drugi raz pomiędzy przystankami Kraków Złocień i Kraków Bieżanów.

Odjazdy (stałe końcówki minutowe w ciągu doby) dla powyższych stacji przedstawiono w tabeli 3.

Fragment rozkładu jazdy potencjalnie interesujących połączeń, w odniesieniu do których zadbano o wzajemną koordynację, na podstawie wybranych relacji przedstawiono w tabelach 4 i 5. To jedynie niewielki wycinek, jednak obrazuje analogie występujące przez cały dobowy okres kursowania linii i naprzemiennie kursy pozwalające dojechać do centrum Krakowa alternatywnymi trasami.

Tabela 3. Końcówki minutowe odjazdów z poszczególnych przystanków

Table 3. Scheduled departure minutes at individual stops

Przystanek	↓ SKA4A ↓	
Kraków Główny	54	17
Kraków Batowice	0	11
Kraków Piastów	3	8
Kraków Lubocza	9	2
Kraków Nowa Huta	14	57
Kraków Kościelniki	19	52
Kraków Przylasek	23	48
Węgrzce Wielkie	29	42
Kokotów	31	40
Kraków Złocień	34	37
Kraków Biezanów	36	35
Kraków Prokocim	38	33
Kraków Płaszów	40	31
Kraków Zabłocie	43	28
Kraków Grzegórzki	45	26
Kraków Główny	48	23
↑ SKA4B ↑		

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Tabela 4. Połączenia w relacji Kraków Nowa Huta – Kraków Grzegórzki

Table 4. Rail connections between Kraków Nowa Huta and Kraków Grzegórzki

Trasa Kraków Nowa Huta – Kraków Grzegórzki				
Połączenie	Odjazd	Przyjazd	Czas jazdy [min]	Przez stacje:
SKA4B	10:14	10:45	31	Kraków Kościelniki, Kraków Biezanów...
SKA4A	10:57	11:26	29	Kraków Lubocza, Kraków Piastów...
SKA4B	11:14	11:45	31	Kraków Kościelniki, Kraków Biezanów...
SKA4A	11:57	12:26	29	Kraków Lubocza, Kraków Piastów...

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Tabela 5. Połączenia w relacji Kraków Przylasek – Kraków Główny

Table 5. Rail connections between Kraków Przylasek and Kraków Główny

Trasa Kraków Przylasek – Kraków Główny				
Połączenie	Odjazd	Przyjazd	Czas jazdy [min]	Przez stacje:
SKA4B	10:23	10:48	25	Węgrzce Wielkie, Kraków Biezanów...
SKA4A	10:48	11:17	29	Kraków Kościelniki, Kraków Piastów...
SKA4B	11:23	11:48	25	Węgrzce Wielkie, Kraków Biezanów...
SKA4A	11:48	12:17	29	Kraków Kościelniki, Kraków Piastów...

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Istotnym aspektem tworzenia rozkładów jazdy jest uwzględnienie koordynacji pomiędzy liniami na wspólnie obsługiwanych ciągach [Nash i Canzler 2014; Pitka i in. 2024]. W analizowanym przypadku krakowskiego węzła kolejowego przy obecnym rozkładzie jazdy koordynacja taka jest zwykle niemożliwa – zdecydowana większość połączeń regionalnych kursuje w nieuporządkowanych odstępach czasowych, bez taktów i stałych końcówek minutowych odjazdów [PKP PLK 2025b]. Wyjątkiem jest linia SKA1 (Wieliczka Rynek-Kopalnia – Kraków Lotnisko) kursująca w takcie 30-minutowym przez większość doby, z którą trasa linii SKA4 pokrywa się na odcinku Kraków Główny – Kraków Bieżanów, gdzie podjęto próbę koordynacji odjazdów obydwu połączeń. Ze względu na częstotliwości ich kursowania możliwe było wyłącznie połowiczne skoordynowanie proponowanej linii SKA4 pomiędzy dwoma kursami SKA1 jako wypełnienie co drugiego interwału – sumaryczne odjazdy odbywają się w takcie 15, 15, 30 min w ciągu godziny.

Rozkład jazdy połączenia

Podobnie jak w przypadku niektórych innych połączeń kolejowych przyjęto obowiązywanie identycznego rozkładu jazdy przez cały tydzień – dlatego pociągi proponowanej linii SKA4 odjeżdżać będą równo co godzinę we wszystkie dni tygodnia.

Do stworzenia pełnego rozkładu jazdy konieczne jest określenie godzin funkcjonowania linii w ciągu doby. Na podstawie analizy przeciętnych godzin kursowania pociągów kolei regionalnych oraz pozostałych pojazdów komunikacji publicznej w Krakowie (tramwaje, autobusy miejskie, autobusy aglomeracyjne, autobusy zamiejskie) stwierdzono, że proponowana linia SKA4 powinna operować w przybliżonych godzinach 4–24. Warto podkreślić, że na znacznej części trasy będzie ona najprawdopodobniej pełnić funkcję jedyne go dostępnego połączenia, dlatego zakres godzinowy powinien być jak najszerszy.

Aby dobrać szczegółowe godziny kursowania linii okrężnej, niezbędne jest określenie miejsca rozpoczęcia i zakończenia liniowego kursowania przez dany pojazd. W przypadku organizacji połączenia okrężnego jest to szczególnie istotne – są to jedyne planowe kursy niefunkcjonujące w zamkniętej pętli. Wybrany miejscem jest dworzec Kraków Główny – punkt dobrze zlokalizowany, zapewniający zaplecze socjalne podczas przerw oraz dogodny dojazd dla pracowników. Przy założeniu obsługi połączenia przez Koleje Małopolskie dodatkowym aspektem jest lokalizacja najbliższej zaplecza taborowego przewoźnika w Krakowie przy ul. Składowej (przy linii kolejowej nr 133).

Przyjęto, że pierwszy kurs relacji SKA4A z Krakowa Głównego w kierunku stacji Kraków Batowice powinien odjechać o godzinie 3:54, a SKA4B w kierunku stacji Kraków Płaszów o godzinie 4:23. Ostatni kurs do Krakowa Głównego ze stacji Kraków Batowice przyjedzie o godzinie 23:17, a ze stacji Kraków Płaszów o 23:48. Zgodnie z tym rozkładem linia SKA4A wykonuje dziennie 20 kursów, a linia SKA4B 19 kursów, co daje łącznie 39 kursów oraz 1755 wozokilometrów pracy przewozowej. Rozkład jazdy przedstawiono szczegółowo w formie odjazdów z przykładowego przystanku Kraków Piastów na rysunku 3. Ze względu na miejski charakter linii rozkład zaprezentowano, wzorując się na wzorze tabliczek przystankowych wykorzystywanym na co dzień przez Zarząd Transportu Publicznego w Krakowie.

SKA4A 		Kraków Piastów		
LINIA OKRĘŻNA		TRASA: Kraków Główny - Kraków Batowice - Kraków Piastów - Kraków Nowa Huta - Kraków Przylasek - Kraków Biechanów Kraków Płaszów - Kraków Główny		
Czas* Przystanek:		Dzień powszedni	Soboty	Święta
0	Kraków Piastów	4 03	4 03	4 03
6	Kraków Lubocza	5 03	5 03	5 03
11	Kraków Nowa Huta	6 03	6 03	6 03
16	Kraków Kościelniki	7 03	7 03	7 03
20	Kraków Przylasek	8 03	8 03	8 03
26	Węgrzce Wielkie	9 03	9 03	9 03
28	Kokotów	10 03	10 03	10 03
31	Kraków Złocień	11 03	11 03	11 03
33	Kraków Biechanów	12 03	12 03	12 03
35	Kraków Prokocim	13 03	13 03	13 03
37	Kraków Płaszów	14 03	14 03	14 03
40	Kraków Zabłocie	15 03	15 03	15 03
42	Kraków Grzegórzki	16 03	16 03	16 03
45	Kraków Główny	17 03	17 03	17 03
57	Kraków Batowice	18 03	18 03	18 03
60	Kraków Piastów	19 03	19 03	19 03
...		20 03	20 03	20 03
*czas przejazdu w minutach		21 03	21 03	21 03
		22 03	22 03	22 03
		23 03A	23 03A	23 03A
		A - kurs skrócony do stacji Kraków Główny		

Rysunek 3. Rozkład jazdy linii SKA4A na przystanku Kraków Piastów

Figure 3. Timetable of the SKA4A line at Kraków Piastów station

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Przydział taboru i obsługi

Obsługa trasy mającej formę zamkniętej, ciągłej pętli wymaga zawsze użycia co najmniej dwóch pojazdów – każdy porusza się po pętli w innym kierunku (zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara i przeciwnie do nich, jako relacje SKA4A i SKA4B). Koncepcja zakłada „wchłonięcie” przez proponowaną linię SKA4 obecnych kursów realizowanego połączenia K63 i zwiększenie efektywności ich wozokilometrów oraz przypisanych pojazdów trakcyjnych.

Stałą obsługę połączenia zapewnią dwa pojazdy (brygady) w ciągu dnia. Pojazdy, w przeciwieństwie do ludzi, nie wymagają żadnej przerwy na odpoczynek i mogą być w ruchu praktycznie bez przerwy, co czyni połączenie bardzo wydajnym w myśl Lean Management (realizując proces w sposób ciągły). Osiągnięty zostanie dzięki temu maksymalnie wysoki wskaźnik wykorzystania taboru (brak przerw wyrównawczych w ciągu dnia), dlatego istotne jest, aby do obsługi połączenia wykorzystywane były jednostki charakteryzujące się wysoką sprawnością operacyjną. Przy nieprzerwanym wykorzystaniu pojazdów w ciągu dnia dla dobra pasażerów istotne jest zapewnienie gotowości pojazdu rezerwowego (analogicznie jak w przypadku komunikacji miejskiej). Jego dyspozycyjności nie należy uwzględniać w ramach brygad wymaganych

do obsługi połączenia – pociąg rezerwowo może jednocześnie pełnić funkcję zapasu dla większej liczby połączeń, np. wszystkich przewozów w rejonie krakowskiego węzła kolejowego.

Oprócz przydziału taboru należy zaplanować także przydział pracowników do obsługi połączenia. Ze względu na nieustanną pracę taboru w zamkniętej pętli (konsekwencja organizacji połączenia w formie linii okrężnej) konieczne było rozdzielenie harmonogramu pojazdów od harmonogramu pracowników, aby zapewnić tym ostatnim niezbędne przerwy. Harmonogram pracy drużyny trakcyjnej (maszynisty) oraz drużyny konduktorskiej jest tożsamy – wszyscy pracownicy drużyny pociągowej muszą mieć zapewnione przerwy w pracy. W zaproponowanym rozwiązaniu podczas obsługi zasadniczej pracują jednocześnie trzy zespoły obsługujące dwie brygady pociągowe naprzemiennie. Zmiany przewidziane są na stacji Kraków Główny, gdzie każdy kurs odbywa wydłużony do 6 min planowy postój. Na stacji znajduje się także niezbędne zaplecze socjalne, z którego pracownicy mogą korzystać podczas przerw w oczekiwaniu na przyjazd następnego kursu. Do całonocnej obsługi połączenia niezbędne jest sześć zespołów pracowników (oznaczonych cyframi 1–6) pracujących w systemie 8–9-godzinnych zmian. Pełny rozkład jazdy z uwzględnieniem zespołów przypisanych do obsługi poszczególnych kursów przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Obsługa połączeń linii SKA4 przez drużyny pociągowe

Table 6. Assignment of train crews to SKA4 services

Oznaczenie kursu	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4	A5	B5	A6	B6
Początek	3:54	4:23	4:54	5:23	5:54	6:23	6:54	7:23	7:54	8:23	8:54	9:23
Koniec	4:48	5:17	5:48	6:17	6:48	7:17	7:48	8:17	8:48	9:17	9:48	10:17
Nr zespołu pracowników	1	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
Oznaczenie kursu	B7	A8	B8	A9	B9	A10	B10	A11	B11	A12	B12	A13
Początek	10:23	10:54	11:23	11:54	12:23	12:54	13:23	13:54	14:23	14:54	15:23	15:54
Koniec	11:17	11:48	12:17	12:48	13:17	13:48	14:17	14:48	15:17	15:48	16:17	16:48
Nr zespołu pracowników	3	1	2	3	1	2	3	4	3	4	5	6
Oznaczenie kursu	A14	B14	A15	B15	A16	B16	A17	B17	A18	B18	A19	B19
Początek	16:54	17:23	17:54	18:23	18:54	19:23	19:54	20:23	20:54	21:23	21:54	22:23
Koniec	17:48	18:17	18:48	19:17	19:48	20:17	20:48	21:17	21:48	22:17	22:48	23:17
Nr zespołu pracowników	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	5

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Długość czasu pracy wszystkich sześciu drużyn pociągowych mieści się w bezpiecznych normach. Szczegóły przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Czas pracy poszczególnych drużyn pociągowych

Table 7. Train crew working times

Nr zespołu	Początek pracy	Koniec pracy	Czas pracy	Liczba kursów	Czas w ruchu	Czas przerw
1	3:54	13:17	9:23	7	06:24	2:59
2	4:23	13:48	9:25	7	06:24	3:01
3	5:54	15:17	9:23	7	06:24	2:59
4	13:54	21:48	7:54	6	05:30	2:24
5	15:23	23:17	7:54	6	05:30	2:24
6	15:54	23:48	7:54	6	05:30	2:24

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Przykładowy rozkład pracy jednej z drużyn pociągowych (zespołu nr 1) przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Dzienny harmonogram pracy zespołu nr 1

Table 8. Daily work schedule of train crew no. 1

Zadanie	Początek	Koniec	Czas
Kurs A1	3:54	4:48	0:54
Kurs A2	4:54	5:48	0:54
Przerwa	5:48	6:23	0:35
Kurs B3	6:23	7:17	0:54
Przerwa	7:17	7:54	0:37
Kurs A5	7:54	8:48	0:54
Przerwa	8:48	9:23	0:35
Kurs B6	9:23	10:17	0:54
Przerwa	10:17	10:54	0:37
Kurs A8	10:54	11:48	0:54
Przerwa	11:48	12:23	0:35
Kurs B9	12:23	13:17	0:54

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Harmonogram można uznać za odpowiedni i zgodny z normami – nieprzerwany czas pracy nie przekracza 2 godz., a w ciągu zmiany zazwyczaj po godzinie pracy następuje ok. 30 min przerwy. Dzięki rozdzieleniu harmonogramu eksploatacji taboru i pracy obsługi zapewnione zostały długie przerwy dla pracowników przy jednoczesnym maksymalnym wykorzystaniu taboru.

W przypadku Krakowa maksymalizacja efektywności wykorzystania taboru jest szczególnie istotna w obliczu ograniczeń sprzętowych i stale rosnącego zapotrzebowania na przewozy regionalne, aglomeracyjne i miejskie. Zaproponowana strategia powinna się przyczynić do wzmocnienia roli kolei w układzie transportowym miasta zgodnie ze strategiami rozwoju mobilności [European Commission 2023].

Specyfika funkcjonowania linii okrężnej

Opisany w poprzednim rozdziale wariant zakłada kursowanie pociągów w zamkniętej pętli typu A-B-C-D-A, czyli linię okrężną będącą rozwiązaniem nowatorskim w realiach polskiej kolei. Wymaga ono dodatkowego omówienia kilku istotnych aspektów, które wzięto pod uwagę na etapie koncepcyjnym projektu.

Porównanie linii SKA4 z innymi liniami okrężnymi

Na świecie z powodzeniem funkcjonuje kilkanaście systemów okrężnych linii kolejowych [Liebchen i in. 2022]. W tabeli 9 zestawione zostały wybrane parametry dotyczące funkcjonowania linii istniejących i proponowanej linii SKA4.

Tabela 9. Zestawianie parametrów linii SKA4 z połączeniami okrężnymi funkcjonującymi na świecie
Table 9. Comparison of SKA4 line parameters with circular railway services around the world

Miasto	Linia	Długość [km]	Liczba stacji	Śr. odl. między stacjami [m]	Czas jazdy [min]	Prędkość średnia [km/h]	Prędkość maksymalna [km/h]	Inne linie na trasie	Szczytowy interwał [min]
Pekin	2	23,1	18	1280	45	31,5	80		2,5
Pekin	10	57,1	45	1270	104	32,9	80		2
Berlin	S41/42	37,1	27	1370	60	37,1	80	+	5
Chengdu	7	38,6	31	1250	66	35,1	80		3,5
Kopenhaga	M3	15,5	17	910	30	31,0	80	+	3
Glasgow	N/A	10,5	15	700	24	26,3	54		4
Hamburg	U3	17,5	23	760	40	26,3	70	+	2; 3; 5
Madryt	6	23,5	28	840	52	27,1	80		3
Moskwa	5	19,4	12	1620	28	41,6	80		1,75
Seul	2	48,8	43	1130	84	34,9	80	+	2,33
Kraków	SKA4	45,0	15	3000	60	45	100	+	60

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Liebchen i in. 2022]

Source: own elaboration based on [Liebchen et al. 2022]

Wszystkie wyszczególnione linie pełnią odmienne funkcje niż zaproponowane połączenie okrężne prowadzone po dużej obwodnicy kolejowej Krakowa. Linia SKA4 miałaby się poruszać po tradycyjnej sieci kolejowej z małym zagęszczeniem stacji. Trasa linii nie przebiega przez gęsto zaludnione tereny, dlatego najprawdopodobniej nie przewiezie ona porównywalnego wolumenu pasażerów, a częstotliwość jej kursowania będzie wyraźnie niższa.

Zestawienie parametrów pokazuje, że linia SKA4 wyraźnie wyróżnia się na tle pozostałych linii okrężnych. Są to przede wszystkim wydajne systemy linii metra lub kolei miejskiej kursujące bardzo często, a linia SKA4 łączy o wiele słabiej zaludnione tereny, przystanki są położone od siebie dalej, prędkości większe, a pociągi pojawiają się na przystankach nieporównywalnie rzadziej. Z uwagi na te różnice organizacja połączenia SKA4 może wymagać zastosowania innowacyjnych strategii, np. w zakresie sposobów zarządzania opóźnieniami.

Reagowanie w razie opóźnień i awarii

Okrężny charakter linii SKA4 wymaga niekonwencjonalnych strategii zarządzania opóźnieniami pojazdów będących praktycznie w nieustannym ruchu. Linie okrężne, tak jak wszystkie pozostałe linie komunikacyjne, narażone są na powstawanie opóźnień o różnej genezie. Ze względu na brak czasu wyrównawczego na końcu trasy (jak w przypadku klasycznych linii) zarządzanie opóźnieniami jest wyraźnie trudniejsze.

Do znanych z literatury sposobów reagowania w sytuacji opóźnień należą:

- przyspieszenie opóźnionego pojazdu – pominięcie przystanku, przejazd skrótem;
- spowolnienie pozostałych pojazdów w danym kierunku;
- włączenie pociągu rezerwowego do obsługi linii;
- włączenie pociągu z innego zadania przewozowego (np. linii okrężnej w drugim kierunku bądź odrębnej linii).

Jednak nie wszystkie te sposoby są adekwatne do specyfiki proponowanej linii SKA4, istotnie różniącej się od funkcjonujących systemów linii okrężnych na świecie. Z góry odrzucono przyspieszanie oraz opóźnianie kursów – przy zbyt niskiej częstotliwości kursowania pojazdów odstępstwa od rozkładu jazdy nie są możliwe. Odrzucono także możliwość włączenia do obsługi linii pociągu wykonującego inną pracę przewozową – w warunkach krakowskich każdy pojedynczy kurs jest istotny, ponieważ połączenia nie są ze sobą skoordynowane i nie oferują atrakcyjnych interwałów kursowania.

Jedynym wziętym pod uwagę pomysłem jest włączenie do obsługi pociągu rezerwowego. Przy opóźnieniu przekraczającym kilkanaście minut, a więc niemożliwym do nadrobienia na stacji Kraków Główny (gdzie odbywa się dłuższy postój wyrównawczy), zaleca się uruchomienie składu rezerwowego, który zostanie włączony do obsługi liniowej połączenia zgodnie z rozkładem jazdy najbliższego kursu. Opóźniony skład powinien dokończyć swój kurs liniowy tak, aby zapewnić pasażerom znajdującym się na pokładzie możliwość dotarcia do założonych celów podróży. Włączenie dodatkowego składu ograniczy nakładanie się opóźnień na następne połączenia.

Przy obsłudze linii SKA4 założono bardzo wysokie wykorzystanie taboru, który z racji specyfiki linii okrężnej pracuje nieustannie przez większość doby, aż do nocnej przerwy technicznej przeznaczonej na mycie, sprzątanie oraz ewentualne naprawy. Przy planowaniu linii komunikacyjnej należy się liczyć z potencjalną awarią taboru. Poniżej omówiono dwa możliwe typy awarii występujące w ciągu dnia pracy.

Awaria umożliwiająca dokończenie kursu

W przypadku, w którym konieczna jest podmiana taboru, gdy może on dokończyć kurs liniowo, należy ją zaplanować w jak najwygodniejszy dla pasażerów sposób, mając na uwadze ciągłość odbywanych po obwodnicy podróży. W tym celu sugeruje się jej przeprowadzanie na stacji Kraków Główny, gdzie przewidziano kilkuminutowe przerwy. Podmiana powinna odbyć się w obrębie jednego peronu, przy którym pasażerowie odpowiednio poinformowani przesiadą się do czekającego składu rezerwowego bez konieczności pokonywania różnic poziomów na dworcu. Zabezpieczona rezerwa czasowa na stacji Kraków Główny pozwoli rozpocząć kolejny kurs bez niepotrzebnego opóźnienia, a sytuacja nie będzie dotkliwa dla pozostałych pasażerów.

Awaria niepozwalająca dokończyć kursu

Przygotowano także scenariusz na wypadek awarii uniemożliwiającej dokończenie kursu przez pojazd. Jest to sytuacja niekorzystna dla pasażerów, ponieważ skutkuje opóźnieniami lub koniecznością zmiany sposobu realizacji podróży. Zaletą okrężnego charakteru linii jest możliwość wyboru alternatywnej trasy przejazdu w przypadku wystąpienia zakłóceń w ruchu. Dla wielu podróżnych korzystnym rozwiązaniem może być skorzystanie z połączenia linii SKA4 kursującego w przeciwnym kierunku – rozkład jazdy został zaprojektowany w taki sposób, aby zapewnić atrakcyjną ofertę naprzemiennych odjazdów na kluczowych relacjach. Dodatkowo z wielu stacji obsługiwanych przez linię SKA4 kursują również inne pociągi regionalne, które mogą pełnić funkcję połączeń zastępczych. Częstotliwość kursowania linii SKA4 powoduje, że w przypadku awaryjnego odwołania kursu pasażerowie w najgorszym przypadku oczekują na odjazd maksymalnie godzinę. W wielu przypadkach możliwe będzie jednak szybsze odbycie podróży dzięki wyborowi alternatywnych połączeń.

W razie konieczności podmiany taboru zasadne wydaje się włączenie pojazdu rezerwowego do ruchu liniowego jako najbliższego możliwego kursu zgodnego z rozkładem jazdy. Pozwala to ograniczyć propagację opóźnień na kolejne kursy i sprawia, że skutki awarii dotyczą głównie pasażerów kursu, na którym wystąpiła usterka.

Systemy informacji pasażerskiej

Połączenia realizowane w formie linii okrężnej nie były dotąd stosowane w Polsce, dlatego konieczne jest stworzenie dobrego, czytelnego systemu informacji pasażerskiej (SIP). SIP przygotowany dla linii okrężnej musi różnić się od informacji przedstawianych w przypadku klasycznych linii. System powinien być zaprojektowany tak, aby pasażer wiedział, że dany kurs nie kończy biegu na żadnej ze stacji pośrednich. Należy uwzględnić fakt, że charakter linii może być dla niezorientowanego pasażera początkowo niezrozumiały.

Zgodnie ze stanem prawnym [MTBiGM 2013] w ramach SIP przewozów kolejowych konieczne jest przygotowanie tablicy kierunkowej zawierającej stacje początkową, końcową, stacje pośrednie oraz nazwę połączenia. Przykładową tablicę przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Tablica kierunkowa linii SKA4A

Figure 4. Destination board of the SKA4A line

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Zwrócono również uwagę na potrzebę podkreślenia okrężnego charakteru linii w ramach SIP wewnątrz pojazdów, na przystankach oraz na schematach. Zaleca się używanie w tym celu symbolu domkniętej pętli, np. w jeden ze sposobów przedstawionych na rysunku 5.



Rysunek 5. Graficzne sposoby podkreślenia okrężnego charakteru linii SKA4

Figure 5. Visual emphasis of the circular character of the SKA4 line

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Istotne jest także zwrócenie uwagi na odpowiednie oznaczenie kursów kończących bieg (bez kontynuacji pętli). Mogą to być kursy, przy których nastąpiła konieczność wymiany taboru i w konsekwencji przesiadki pasażerów do drugiego pojazdu w obrębie jednego peronu – w tej sytuacji niezbędne jest skuteczne informowanie pasażerów za pomocą odpowiednich komunikatów głosowych. Także w przypadku kończenia biegu pociągu, który rozkładowo nie kontynuuje jazdy w pętli (np. ostatniego kursu linii w ciągu doby), szczególnie ważne jest informowanie pasażerów z wyprzedzeniem oraz specjalne oznaczenie kursu w rozkładzie jazdy.

Podsumowanie i wnioski

Linie okrężne stanowią interesujące i stosunkowo rzadko wykorzystywane rozwiązanie organizacyjne w transporcie kolejowym. Systemy tego typu funkcjonują z powodzeniem w wielu aglomeracjach świata, szczególnie jako element wydajnych systemów kolei miejskiej i metra. Ich główną cechą jest organizacja ruchu w formie zamkniętej pętli, bez klasycznej stacji początkowo-końcowej, co prowadzi do odmiennego sposobu planowania pracy przewozowej, zarządzania taboru oraz organizacji ruchu.

Przeprowadzona analiza potwierdziła, że linie okrężne mogą oferować szereg korzyści niedostępnych dla klasycznych połączeń radialnych. Szczególnie istotny jest bardzo wysoki poziom wykorzystania taboru – dzięki eliminacji postojów technicznych i ograniczeniu czasu potrzebnego na zmianę kierunku jazdy możliwe staje się zwiększenie efektywności funkcjonowania systemu transportowego bez konieczności proporcjonalnego zwiększania zasobów. Zwłaszcza w tym aspekcie widoczne jest powiązanie linii okrężnych z filozofią Lean Management. Organizacja połączeń w formie zamkniętej pętli pozwala ograniczyć część zjawisk uznawanych za marnotrawstwo w systemach

transportowych. Linie okrężne mogą więc stanowić przykład praktycznego wykorzystania założeń Lean w transporcie publicznym poprzez dążenie do maksymalizacji wartości dostarczanej pasażerom przy możliwie efektywnym wykorzystaniu infrastruktury, taboru i pracy ludzkiej.

Jednocześnie analiza wykazała, że systemy okrężne wymagają bardzo sprawnego zarządzania operacyjnego. Ograniczenie rezerw czasowych oraz brak klasycznych stacji końcowych utrudniają reagowanie na zakłócenia w ruchu pojazdów, a opóźnienia mogą łatwo przenosić się na kolejne kursy. Konieczne jest więc stosowanie odpowiednich procedur reagowania oraz utrzymywanie rezerwy taborowej. Istotne jest także przygotowanie pasażerów do korzystania z połączenia o nietypowym charakterze, które w warunkach polskich pozostaje rozwiązaniem praktycznie niespotykanym.

Przeprowadzone studium przypadku wykazało, że uruchomienie linii okrężnej SKA4 prowadzonej po dużej obwodnicy kolejowej Krakowa jest możliwe przy wykorzystaniu istniejącej infrastruktury, bez konieczności realizacji dodatkowych inwestycji. Opracowana koncepcja pozwoliła wytyczyć 45-kilometrową pętlę obsługiwaną w dwóch kierunkach, dla której czas przejazdu pełnego obiegu wynosi 54 minuty. Parametr ten umożliwia skonstruowanie czytelnego, godzinowego rozkładu jazdy z równymi odstępami między kursami.

Do całodzienniej obsługi linii wystarczają dwa pojazdy będące praktycznie nieprzerwanie w ruchu. Pozwala to ograniczyć postoje nieprodukcyjne, wyeliminować konieczność zmiany kierunku jazdy oraz zwiększyć stopień wykorzystania taboru, co jest zgodne z założeniami Lean Management dotyczącymi eliminacji marnotrawstwa.

Opracowany rozkład przewiduje realizację 39 kursów oraz ok. 1755 wozokilometrów pracy przewozowej dziennie. Dzięki dwukierunkowej obsłudze pętli pasażerowie uzyskują możliwość wyboru alternatywnych tras przejazdu, a liczba dostępnych relacji bezpośrednich ulega zwiększeniu. W ramach niniejszej pracy przygotowano szczegółowe założenia funkcjonowania połączenia, obejmujące m.in. organizację obiegów taboru i harmonogram pracy drużyn pociągowych. Jednocześnie potwierdzono, że głównym ograniczeniem funkcjonowania linii okrężnych pozostaje zarządzanie zakłóceniami ruchowymi. W warunkach krakowskich najbardziej efektywną strategią reagowania na opóźnienia i awarie wydaje się wykorzystanie pojazdu rezerwowego, umożliwiające ograniczenie skutków zakłóceń do pojedynczych kursów.

Zaproponowane rozwiązanie mogłoby poprawić dostępność komunikacyjną części miasta, a także zwiększyć atrakcyjność podróży wewnętrznych realizowanych za pomocą kolei. Linia SKA4 mogłaby także pełnić funkcję czynnika stymulującego rozwój przestrzenny terenów położonych w jej sąsiedztwie.

Opracowanie nie wyczerpuje w pełni tematyki linii okrężnych oraz ich potencjalnego zastosowania. Dla krakowskiego poligonu zasadne byłoby przeprowadzenie w przyszłości modelowania potoków pasażerskich, szczegółowej analizy przepustowości infrastruktury czy symulacji odporności systemu na zakłócenia ruchowe pozwalającej wypracować optymalną strategię w zakresie zarządzania opóźnieniami.

Koncepcja kolejowych połączeń okrężnych pozostaje niewątpliwie ciekawym, wartym dalszego rozwijania zagadnieniem. Przeprowadzona analiza wskazuje, że odpowiednio zaprojektowane linie okrężne mogą przynieść liczne korzyści dla systemów transportowych w Polsce i na świecie.

Bibliografia

- Ciastoń-Ciulkin A., Puławska-Obiedowska S., Trzebunia A., 2024: Badanie znaczenia kolei w podróżach wewnątrzmijskich na przykładzie rejonu osiedla Złocien w Krakowie, *Transport Miejski i Regionalny* 1, 20–24.
- European Commission, 2023: Topic Guide – Planning for attractive public transport, https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/system/files/2023-11/planning_for_attractive_public_transport.pdf [dostęp: 08.05.2026].
- Liebchen C., Dutsch S., Jin S., Tomii N., Wang Y., 2022: The ring never relieves – Response rules for metro circle lines, *Journal of Rail Transport Planning & Management* 23, 100331.
- Madrjas J., 2016: Do 100 km/h po kolejowej obwodnicy Krakowa, *Rynek Kolejowy*, <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/do-100-kmh-po-kolejowej-obwodnicy-krakowa-79460.html> [dostęp: 08.05.2026].
- MTBiGM, 2013: Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 3 stycznia 2013 r. w sprawie sposobu prowadzenia rejestru oraz sposobu oznakowania pojazdów kolejowych, *DzU* 2013, poz. 211.
- Nash A., Canzler M., 2014: Timetable planning and coordination, *International Association of Public Transport (UITP)*, Bruksela.
- Ohno T., 1988: *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*, Productivity Press, Portland, OR.
- Pitka P., Simeunović M., Miličić M. i in., 2024: Planning level optimisation of headway regularity, *Applied Sciences* 14(13), 5706.
- PKP PLK, 2025a: Instrukcja o prowadzeniu ruchu pociągów Ir-1, https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Akty_prawne_i_przepisy/Instrukcje/Wydruk/Ir/Instrukcja_Ir-1_od_29_05_2025_WCAG..pdf [dostęp: 08.05.2026].
- PKP PLK, 2025b: Sieciowy rozkład jazdy pociągów – ważny od 26.10.2025 r. do 13.12.2025 r., <https://portalpasazera.pl/Tablice> [dostęp: 10.12.2025].
- Polregio, 2025: Małopolska – schemat linii komunikacyjnych, <https://polregio.pl/media/26608/schemat-linii-komunikacyjnych.pdf> [dostęp: 08.05.2026].
- Suzuki H., Cervero R., Iuchi K., 2013: *Transforming cities with transit: Transit and land use integration for sustainable urban development*, World Bank Publications, Waszyngton, DC.
- Tirachini A., Godachevich A., Cats O., Muñoz J.C., Soza Parra A., 2021: Headway variability in public transport: A review, *Transport Reviews* 42(3), 337–361.
- Zhou Y., Wang Y., Liebchen C., Zhu S., Li B., Zhou D., 2024: Train rescheduling for a metro circle line: a comparison of different response rules, *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 12(1), 2336041.

Michał Thlon✉

Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

Koszty stabilizacji systemu elektroenergetycznego w warunkach ograniczeń sieciowych – perspektywa logistyki systemowej

Costs of power system stabilization under network constraints – a systems logistics perspective

Synopsis. Artykuł podejmuje problematykę kosztów ponoszonych przez operatorów systemów przesyłowych (TSO) oraz uczestników rynku energii w procesie zapewniania stabilności pracy systemu elektroenergetycznego w warunkach narastających ograniczeń sieciowych i rosnącego udziału odnawialnych źródeł energii. Celem badania jest reinterpretacja kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego z perspektywy logistyki systemowej oraz analiza porównawcza ich struktury i zróżnicowania w wybranych europejskich systemach elektroenergetycznych. W badaniu wykorzystano analizę literatury przedmiotu oraz analizę porównawczą danych pochodzących od operatorów – ENTSO-E, BNetzA, RTE, APG i Svenska Kraftnät – dla wybranych europejskich systemów elektroenergetycznych w 2022 roku. Uzyskane wyniki wskazują, że wzrost udziału zmiennych odnawialnych źródeł energii (variable renewable energy, VRE) w systemach charakteryzujących się ograniczoną elastycznością prowadzi do ponadproporcjonalnego wzrostu kosztów zarządzania ograniczeniami przesyłowymi (congestion management, CM). Zastosowanie perspektywy logistyki systemowej umożliwia uporządkowanie kosztów stabilizacji poprzez ich odniesienie do znanych kategorii kosztowych występujących w logistyce, takich jak koszty zmiany tras przepływu (rerouting), zapasy bezpieczeństwa (safety stock) czy amortyzacja infrastruktury. Wyniki badania wskazują na potrzebę szerszej internalizacji kosztów sieciowych w mechanizmach rynkowych oraz mają istotne implikacje dla polityki taryfowej, projektowania rynku energii i planowania rozwoju infrastruktury elektroenergetycznej.

Słowa kluczowe: koszty stabilizacji sieci, rynek energii, ograniczenia sieciowe, logistyka systemowa, transformacja energetyczna, rynek bilansujący

✉Michał Thlon – Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Katedra Ekonomii Stosowanej; e-mail: michal.thlon@uek.krakow.pl; <https://orcid.org/0000-0001-9627-7773>

Abstract. This paper examines the operational costs incurred by transmission system operators (TSOs) and electricity market participants in maintaining power system stability under increasing network constraints and a growing share of renewable energy sources. The objective of the study is to reinterpret power system stabilization costs from a systems logistics perspective and to conduct a comparative analysis of their structure and variation across selected European power systems. The research combines a review of the relevant literature with a comparative analysis of operational data obtained from ENTSO-E, BNetzA, RTE, APG, and Svenska Kraftnät for selected European power systems in 2022. The findings support the hypothesis that congestion management costs increase nonlinearly with the penetration of variable renewable energy (VRE) in systems characterized by insufficient flexibility resources. The systems logistics perspective provides a coherent framework for classifying stabilization costs through analogies with well-established logistics cost categories, including rerouting costs, safety stock costs, and infrastructure depreciation. The results contribute to a better understanding of the economic consequences of network constraints and support the application of logistics-based analytical approaches in electricity market research. The findings also have important implications for tariff design, electricity market regulation, and long-term transmission network planning.

Keywords: power system stabilization costs, energy market, network constraints, systems logistics, energy transition, balancing market

Kody JEL: L94, Q41, Q48, R40, D47

Wprowadzenie

Transformacja systemu elektroenergetycznego w kierunku wysokiego udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) generuje nową klasę wyzwań operacyjnych. O ile tradycyjny system oparty na dyspozycyjnych elektrowniach węglowych i gazowych umożliwiał stosunkowo łatwe bilansowanie podaży z popytem, o tyle system zdominowany przez zmienne źródła energii – wiatr i fotowoltaikę – wymaga ciągłego, aktywnego zarządzania przepływami mocy, rezerwami i ograniczeniami przesyłowymi. Koszty tej stabilizacji, choć często ukryte za mechanizmami taryfowymi i bilansowaniem na poziomie TSO¹, stanowią realną i rosnącą pozycję w rachunku ekonomicznym transformacji energetycznej. Tylko w Niemczech koszty zarządzania ograniczeniami sieciowymi (obejmujące redispatching, countertrading i grid reserve zgodnie z metodologią Redispatch 2.0) wzrosły z ok. 1,5 mld EUR w 2018 roku do 4,2 mld EUR w 2022 roku [BNetzA 2023], a prognozy dla UE wskazują na możliwy wzrost do 11–26 mld EUR rocznie do 2030 roku [Thomassen i in. 2024].

Głównym wkładem artykułu jest reinterpretacja kosztów stabilizacji sieci przez aparat pojęciowy logistyki systemowej. Sieć elektroenergetyczna jest złożonym systemem logistycznym, w którym ograniczenia fizyczne (przepustowość linii, napięcie węzłów,

¹ Operator systemu przesyłowego (transmission system operator, TSO) – podmiot odpowiedzialny za eksploatację, utrzymanie i rozwój sieci przesyłowej wysokiego napięcia oraz zapewnienie jej niezawodnego i bezpiecznego funkcjonowania, w tym bilansowanie systemu elektroenergetycznego w czasie rzeczywistym.

bezpieczeństwo N-1) nakładają się na ograniczenia rynkowe (strefy cenowe, zdolności przesyłowe, mechanizmy aukcyjne). Wykorzystanie kategorii analitycznych wywodzących się z logistyki systemowej – kosztów przekierowania przepływów, zapasów bezpieczeństwa, zarządzania ograniczeniami sieciowymi – do analizy kosztów stabilizacji energetycznej nie jest jedynie zabiegiem terminologicznym, lecz umożliwia dostęp do kilkudziesięcioletniego dorobku badań nad zarządzaniem łańcuchem dostaw.

Celem artykułu jest reinterpretacja kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego z perspektywy logistyki systemowej oraz przeprowadzenie analizy porównawczej ich struktury i zróżnicowania w wybranych europejskich systemach elektroenergetycznych. Rozważania koncentrują się na ocenie, w jakim zakresie zastosowanie aparatu pojęciowego logistyki systemowej umożliwia pełniejszą identyfikację uwarunkowań kosztów stabilizacji sieci niż podejścia stosowane w klasycznej ekonomice energetyki.

System elektroenergetyczny jako sieć logistyczna

Zasadność stosowania perspektywy logistyki systemowej do analizy kosztów stabilizacji sieci wymaga explicite uzasadnienia. W rozumieniu Stadtlera i Kilgera [2008] logistyka systemowa zajmuje się zarządzaniem przepływami materiałów, informacji i finansów wzdłuż łańcucha wartości z uwzględnieniem ograniczeń pojemnościowych sieci i kosztów zarządzania tymi ograniczeniami. System elektroenergetyczny ma wszystkie cechy definicyjne sieci logistycznej, a każdy z jej elementów znajduje precyzyjny odpowiednik w aparacie pojęciowym logistyki.

Po pierwsze, przepływy energii elektrycznej odpowiadają przepływowi materiałowym w sieci dystrybucji. Energia jest wytwarzana w węzłach generacji, przesyłana siecią i dostarczana do węzłów konsumpcji. Kluczową specyfiką – i źródłem szczególnych kosztów logistycznych – jest niemożność magazynowania energii na skalę systemową w technologiach konwencjonalnych. Odpowiada to warunkowi zerowych zapasów pośrednich: każde zakłócenie balansu generacja–konsumpcja musi być korygowane natychmiast, co jest odpowiednikiem dostawy dokładnie na czas (just-in-time), z zerową tolerancją opóźnień.

Po drugie, ograniczenia sieciowe (congestion) odpowiadają przeciążeniom tras w sieci logistycznej. Gdy przepływ mocy na linii przekracza jej zdolność przesyłową, TSO przeprowadza przekierowanie generacji (rerouting) – analogicznie do sytuacji, gdy operator logistyczny przekierowuje ładunek alternatywną trasą po przeciążeniu głównego korytarza. Koszty tego przekierowania w systemie elektroenergetycznym obejmują wyższe koszty paliwa jednostek rezerwowych, koszty rozruchu i straty sieciowe – odpowiedniki kosztów alternatywnej trasy logistycznej.

Po trzecie, rezerwy bilansujące (FCR, aFCR, mFCR²) są bezpośrednim odpowiednikiem zapasów bezpieczeństwa (safety stock) w logistyce. Utrzymywanie rezerw przez

² Rezerwy bilansujące dzielą się na: rezerwę pierwotną (frequency containment reserve, FCR) – aktywowaną automatycznie w ciągu sekund w odpowiedzi na odchylenia częstotliwości; rezerwę wtórną (automatic frequency restoration reserve, aFCR) – przywracającą częstotliwość do wartości nominalnej w ciągu minut; rezerwę trzeciorzędową (manual frequency restoration reserve, mFCR) – aktywowaną ręcznie w czasie od kilku do kilkunastu minut. Wszystkie trzy kategorie są obowiązkowe dla operatorów systemów przesyłowych zgodnie z wytycznymi ENTSO-E dotyczącymi usług systemowych.

TSO jest racjonalne z perspektywy analizy kosztów logistycznych: koszt utrzymania rezerwy jest niższy od kosztu zdarzenia niedoboru. Optymalny poziom rezerwy – jak w modelu typu newsvendor – wynika z wyważenia kosztu nadmiaru (over-procurement) i kosztu braku (blackout lub awaryjny zakup po cenie spot). Ela i in. [2011] formalizują tę analogię, proponując probabilistyczne modele wyznaczania rezerw operacyjnych w systemach o wysokiej penetracji VRE.

Po czwarte, magazyny energii (BESS, elektrownie pompowo-szczytowe) pełnią funkcję magazynów buforowych, absorbując zmienność przepływów – dokładnie tak jak bufor magazynowy w łańcuchu dostaw wygładzają wahania popytu. Brak adekwatnej pojemności buforowej prowadzi do wymuszonego odrzucenia nadwyżki (curtailment), co jest odpowiednikiem marnotrawstwa z powodu braku miejsca składowego w logistyce. Analogię tę wzmacnia perspektywa odporności łańcuchów dostaw – Ivanov [2022] wskazuje, że blackout jako zdarzenie systemowe generuje kaskadowe zakłócenia o charakterze zbliżonym do poważnych dysrupcji w sieciach logistycznych, wymagające podobnych mechanizmów buforowania i redundancji.

Zestawienie tych analogii tworzy spójną ramę konceptualną, w której koszty stabilizacji sieci elektroenergetycznej są interpretowane jako koszty logistyczne: koszty przekierowania generacji (redispatching), koszty rezerwy (safety stock), koszty kongestii węzłów (congestion rent), kary umowne za odchylenia (imbalance) i amortyzacja infrastruktury (CAPEX sieciowy). Perspektywa ta nie zastępuje analizy techniczno-ekonomicznej, lecz ją uzupełnia o aparat optymalizacyjny i terminologię kosztową wypracowaną w badaniach nad zarządzaniem łańcuchem dostaw. Kluczową przewagą podejścia opartego na logistyce systemowej nad klasyczną ekonomiką energetyki jest możliwość przeprowadzenia zintegrowanej analizy przepływów fizycznych, ograniczeń przepustowości oraz kosztów operacyjnych w ramach jednego, spójnego ujęcia analitycznego. W klasycznej ekonomice energetyki elementy te są najczęściej rozpatrywane odrębnie: przepływy mocy analizuje się w ramach modeli technicznych, mechanizmy kształtowania cen energii – modeli rynkowych, natomiast koszty działań regulacyjnych w ramach odrębnych rachunków kosztowych. Logistyka systemowa traktuje je jako jeden zintegrowany problem zarządzania siecią, co otwiera drogę do pełniejszej internalizacji kosztów sieciowych w decyzjach inwestycyjnych i taryfowych.

Przegląd literatury

Problematyka kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego łączy zagadnienia ekonomiki energetyki, teorii regulacji i logistyki systemowej. Za prekursorów systematycznej analizy kosztów funkcjonowania sieci elektroenergetycznej uznaje się Schweppe'a i współautorów [Schweppe i in. 1988], którzy na gruncie teorii cen czasu rzeczywistego (spot pricing) rozwinęli koncepcję węzłowych cen energii elektrycznej, uwzględniającą fizyczne ograniczenia przesyłowe systemu. Na tej podstawie Stoft [2022] rozwinął teorię ekonomiki ograniczeń sieciowych, analizując alternatywne mechanizmy alokacji zdolności przesyłowych – aukcje jawne (explicit auctions) oraz niejawne (implicit auctions) – i wskazując na ich zróżnicowany wpływ na strukturę kosztów ponoszonych przez uczestników rynku.

Kluczowym wkładem w rozumienie kosztów integracji VRE jest dekompozycja Hirtha, Ueckerda i Edenhofera [Hirth i in. 2015] na trzy składowe: koszty profilowe, lokalizacyjne i bilansujące. Hirth [2013] szacuje, że przy penetracji wiatru na poziomie 30–40% koszty integracji mogą przekraczać 30 EUR/MWh, co pokazuje nieliniowy charakter tej relacji. Ehrenmann i Smeers [2005] wskazują z kolei, że w warunkach niedoskonałej konkurencji ekonomiczna efektywność rynku energii jest w dużym stopniu uzależniona od właściwego odwzorowania ograniczeń sieciowych w strukturze cen. Autorzy dowodzą, że niedostosowanie obszarów cenowych do fizycznej topologii systemu elektroenergetycznego skutkuje systematycznym występowaniem nieefektywności rynkowych oraz generuje ponadprzeciętne koszty redispatchingu ponoszone w celu utrzymania bezpieczeństwa pracy sieci.

ACER w corocznych raportach monitoringowych dokumentuje skalę kosztów bilansujących w krajach UE i postuluje reformę stref cenowych jako priorytet regulacyjny [ACER 2021, 2022, 2023]. Analiza Thomassena i in. [2024] prognozuje wzrost wolumenu redispatchingu w UE 4–11-krotnie do 2030 roku bez odpowiedniej rozbudowy sieci, przy rocznych kosztach rzędu 5–13 mld EUR. Hirth i Ziegenhagen [2015] dokumentują wzrost kosztów rezerw bilansujących przy rosnącej penetracji OZE i wskazują na nieliniowy charakter tej relacji w badaniach dla rynku ENTSO-E. Kategoryzacji usług pomocniczych świadczonych przez rozproszone źródła OZE na poziomie sieci dystrybucyjnej – jako odrębnej kategorii kosztowej zarządzania siecią – podjęli się Demoulias i in. [2020]. Kompleksową analizę kosztów i korzyści opcji elastyczności stabilizujących sieć w kontekście niemieckiego systemu elektroenergetycznego przeprowadzili Ackermann i in. [2024], wskazując na zróżnicowaną efektywność kosztową poszczególnych instrumentów w zależności od struktury systemu. Z kolei Akkad i in. [2026] analizują optymalizację rozmieszczenia magazynów energii w sieciach OZE jako instrument redukcji kosztów przeciążeń, wskazując, że lokalizacja zasobów buforowych jest kluczowym czynnikiem efektywności kosztowej systemu.

Dane dotyczące Niemiec pokazują skalę zjawisk przewidywanych w trakcie prowadzonych wcześniej badań. Koszty zarządzania przeciążeniami i ograniczeniami sieciowymi wzrosły z ok. 220 mln EUR przy 11,5 TWh energii objętej działaniami korygującymi w 2016 r. [Staffell i Pfenninger 2018] do 4,2 mld EUR przy 32,8 TWh w 2022 r. [BNetzA 2023]. Dane te obejmują zmianę planów pracy jednostek wytwórczych, przeciwt transakcje rynkowe oraz wykorzystanie rezerw sieciowych zgodnie z zasadami programu Redispatch 2.0. Jednocześnie udział odnawialnych źródeł energii w niemieckim miksie elektroenergetycznym zwiększył się z 29 do 45%. W kontekście środkowoeuropejskim Kazimierski i in. [2026] analizują przepływy kołowe (loop flows) jako specyficzne źródło kosztów redispatchingu, których płatnikami są kraje inne niż te, gdzie przepływy te fizycznie zachodzą.

Z perspektywy logistyki systemowej Stadtler i Kilger [2008] definiują zarządzanie łańcuchem dostaw jako optymalizację przepływów przy ograniczeniach pojemnościowych sieci. Christine i in. [2012] eksplorują analogię pomiędzy smart grid i logistyką ostatniej mili, a Ela i in. [2011] proponują modele probabilistyczne wyznaczania rezerw operacyjnych oparte na aparacie teorii zapasów. Z kolei Silver i in. [1998] analizują model newsvendor jako narzędzie wyznaczania optymalnego poziomu zapasów bezpieczeństwa przy niepewności popytu, co bezpośrednio przekłada się

na problem wyznaczania rezerw FCR/aFCR przy niepewności generacji VRE. Luka, którą wypełnia niniejsza praca, polega na syntetycznym osadzeniu kosztów stabilizacji w aparacie logistyki systemowej z jednoczesnym empirycznym odniesieniem do danych operatorskich.

Material i metody

Celem artykułu jest reinterpretacja kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego z perspektywy logistyki systemowej oraz przeprowadzenie analizy porównawczej ich struktury i różnicowania w wybranych europejskich systemach elektroenergetycznych. Badanie odpowiada na trzy pytania badawcze: (1) Jakie kategorie kosztów składają się na koszty stabilizacji sieci i jak można je zaklasyfikować w ramach logistyki systemowej? (2) Jakie determinanty strukturalne (penetracja VRE, gęstość sieci, dostępność zasobów buforowych) wyjaśniają różnicowanie kosztów między analizowanymi systemami? (3) W jaki sposób perspektywa logistyki systemowej uzupełnia tradycyjne podejście ekonomiki energetyki?

Badanie opiera się na analizie porównawczej danych operatorskich dotyczących wolumenów i kosztów zarządzania ograniczeniami sieciowymi (congestion management, CM) za 2022 rok. Dane pierwotne pochodzą z: raportów monitoringowych BNetzA (Niemcy), bilansu elektrycznego RTE (Francja), sprawozdań APG (Austria) i Svenska Kraftnät (Szwecja) oraz raportów PSE i URE (Polska). W przypadku krajów, w których TSO nie publikuje jednolitego zestawienia kosztów CM, zastosowano estymację na podstawie dostępnych raportów rocznych TSO oraz danych ENTSO-E Transparency Platform. Dane te potraktowano szacunkowo i opatrzone odpowiednią adnotacją.

Próba badawcza obejmuje pięć europejskich systemów elektroenergetycznych dobranych w celu zapewnienia różnicowania pod względem struktury miksu energetycznego, gęstości sieci i stopnia integracji rynkowej: Niemcy (najwyższy absolutny wolumen CM w Europie, wysoki udział OZE), Francję (dominacja nuklearna, umiarkowane CM), Austrię (wysoki udział hydroenergetyki jako zasobu buforowego), Szwecję (hydro i cztery strefy cenowe) i Polskę (dominacja węgla, dynamiczny wzrost PV po 2019 roku).

Metodę analityczną stanowi procedura trzyetapowa: (1) konstrukcja macierzy klasyfikacji kosztów z odwzorowaniem na kategorie logistyczne (tab. 1), (2) porównanie wskaźników CM dla próby (tab. 2 i rys. 1), (3) interpretacja różnicowania przez pryzmat logistycznych determinant strukturalnych.

W artykule przyjęto podejście koncepcyjno-porównawcze. Badanie nie ma zatem charakteru empirycznego w znaczeniu formalnej weryfikacji hipotez statystycznych, lecz stanowi analizę teoretyczno-koncepcyjną opartą na systematycznym przeglądzie literatury oraz ilustracyjnym zastosowaniu proponowanych ram analitycznych z wykorzystaniem danych pochodzących od operatorów systemów elektroenergetycznych. Wnioski wynikające z analizy porównawczej należy interpretować jako obserwacje wspierające przyjętą ramę analityczną, a nie jako rezultaty formalnego testowania zależności o charakterze przyczynowo-skutkowym.

Wyniki badań i dyskusja

Klasyfikacja kosztów stabilizacji – perspektywa logistyki systemowej

Pierwszym wynikiem badania jest macierz klasyfikacji kosztów stabilizacji z odwzorowaniem na kategorie logistyczne (tab. 1).

Tabela 1. Klasyfikacja kosztów stabilizacji sieci elektroenergetycznej – perspektywa logistyki systemowej

Table 1. Classification of power grid stabilization costs – a systems logistics perspective

Kategoria kosztu	Mechanizm rynkowy	Analogia logistyczna	Rząd wielkości (UE)
Przekierowanie energii (redispatching, RD)	Rynek bilansujący, polecenia TSO	Koszt reroutingu w sieci dystrybucji	1–4 EUR/MWh generacji
Rezerwy bilansujące (FCR/aFCR/mFCR)	Przetargi TSO (godzinowe/dobowe)	Zapasy bezpieczeństwa (safety stock)	0,5–2 EUR/MWh
Ograniczenia sieciowe (congestion rent)	Aukcje zdolności przesyłowych (NTC)	Koszt kongestii węzła logistycznego	zmienny; śr. 0,3–1,5 EUR/MWh
Rozliczanie niezbilansowania (imbalance settlement)	Ceny odchyłań (BRP)	Kara za naruszenie normy dostawy	10–80 EUR/MWh (szczyt)
Inwestycje sieciowe (CAPEX)	Regulacja taryfowa (RAB)	Amortyzacja infrastruktury logistycznej	5–15% kosztów systemu

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Hirth i in. 2015; ENTSO-E 2023; ACER 2023; Stadtler i Kilger 2008]

Source: own elaboration based on [Hirth et al. 2015; ENTSO-E 2023; ACER 2023; Stadtler & Kilger 2008]

Klasyfikacja przedstawiona w tabeli 1 wskazuje, że do każdej z pięciu kategorii kosztów sieciowych można przyporządkować analogiczny mechanizm występujący w systemach logistycznych. Koszty działań redysponowania mocy można porównać do kosztów przekierowania strumieni transportowych w przypadku wystąpienia ograniczeń infrastrukturalnych uniemożliwiających realizację pierwotnie zaplanowanej trasy. Rezerwy bilansujące stanowią odpowiednik zapasów bezpieczeństwa utrzymywanych w systemach logistycznych w celu ograniczenia ryzyka niedoborów i zapewnienia ciągłości funkcjonowania systemu. Natomiast renta z tytułu ograniczeń przesyłowych (renta kongestyjna) odzwierciedla ekonomiczną wartość ograniczonej przepustowości infrastruktury sieciowej, analogicznie do wzrostu cen usług transportowych występującego w warunkach przeciążenia kluczowych szlaków lub węzłów logistycznych. Koszty rozliczania niezbilansowania (imbalance settlement) obciążają podmioty odpowiedzialne za bilansowanie (BRP³) w zakresie odchyłań od zgłoszonych harmonogramów dostaw, co można porównać do kar umownych lub opłat za niewykonanie zakontraktowanych usług logistycznych. Z kolei nakłady inwestycyjne na rozwój i utrzymanie infrastruktury sieciowej (CAPEX), finansowane za pośrednictwem taryf regulowanych, odpowiadają kosztom amortyzacji i odtworzenia infrastruktury transportowej oraz magazynowej w systemach logistycznych.

³ Podmiot odpowiedzialny za bilansowanie (balancing responsible party, BRP) – uczestnik rynku zobowiązany do utrzymania równowagi między zgłoszonym programem dostaw a rzeczywistą generacją lub poborem energii.

Analogii tej nie należy postrzegać wyłącznie jako zabiegu terminologicznego, lecz jako podstawę do transferu metod analitycznych pomiędzy logistyką a ekonomią sieci elektroenergetycznych. Przykładem jest model optymalizacji zapasu przy niepewnym popycie (newsvendor), stosowany w logistyce do wyznaczania poziomu zapasu bezpieczeństwa na podstawie relacji między oczekiwanymi kosztami nadmiaru i niedoboru zasobów, który może zostać zaadaptowany do określania uzasadnionego ekonomicznie poziomu rezerw bilansujących utrzymywanych przez operatorów systemów przesyłowych. Analogicznie algorytmy minimalnego kosztu przepływu (min-cost flow), powszechnie wykorzystywane do optymalizacji przepływów w sieciach transportowych, mogą być stosowane bezpośrednio do rozwiązywania problemów związanych z zarządzaniem ograniczeniami przesyłowymi w systemach elektroenergetycznych. Efektywność metod opartych na przepływach sieciowych w harmonogramowaniu logistycznym dokumentują Wang i in. [2025], a równowagę sieci przy ograniczeniach pojemnościowych analizują Peng i in. [2020] – oba podejścia mają bezpośrednie przełożenie na optymalizację zarządzania ograniczeniami w sieciach elektroenergetycznych.

W konsekwencji postulowana w literaturze ekonomiki energetyki internalizacja kosztów sieciowych poprzez wykorzystanie mechanizmów cen węzłowych (locational marginal pricing, LMP) znajduje dodatkowe uzasadnienie w teorii alokacji kosztów i optymalizacji przepływów rozwijanej na gruncie logistyki.

Zróżnicowanie kosztów zarządzania ograniczeniami sieciowymi w systemach elektroenergetycznych

Dane empiryczne dotyczące 2022 roku (tab. 2) wskazują na znaczące zróżnicowanie wolumenów i kosztów CM znormalizowanych do całkowitego wolumenu generacji. Ilustruje to również rysunek 1.

Tabela 2. Wolumen i koszty zarządzania ograniczeniami sieciowymi w wybranych europejskich systemach elektroenergetycznych (2022)

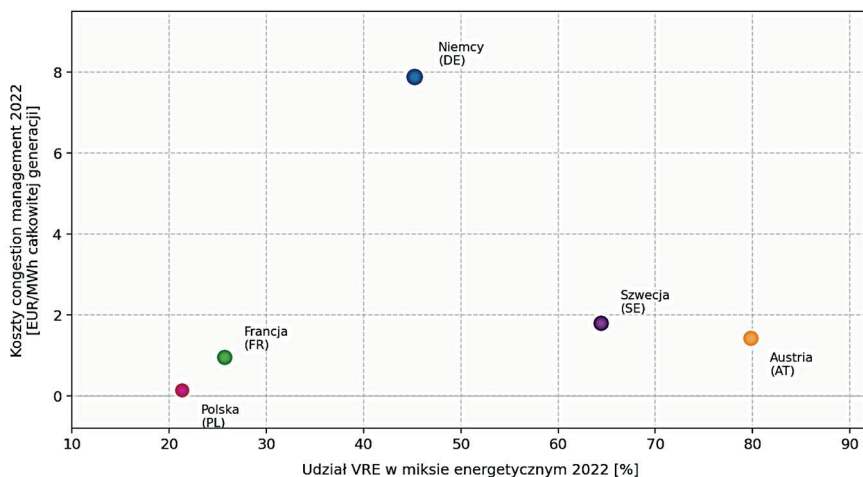
Kraj/TSO	Wolumen RD 2022 [GWh]	Koszty CM 2022	Udział VRE [%]	Koszty CM [EUR/MWh generacji]
Niemcy (4 TSO)	32 772	~4 200 mln EUR	45,2	~7,9
Francja (RTE)	~3 000	~450 mln EUR	25,7	~1,0
Austria (APG)	~1 200	94 mln EUR (domestic)	79,8	~1,4
Szwecja (Sv. Kraftnät)	~4 800	~310 mln EUR	64,4	~1,8
Polska (PSE)	~350 (ograniczenie generacji z OZE)	b.d. (marginalny)	21,3	< 0,2

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych i raportów operatorów systemów przesyłowych oraz organów regulacyjnych: APG Annual Report oraz komunikatu APG [2023] – Austria (koszty krajowego zarządzania kongestią w wysokości 94 mln EUR wg danych oficjalnie raportowanych przez APG; wolumeny oszacowano na podstawie danych ENTSO-E [2023]); BNetzA [2023] – Niemcy (prezentowane wolumeny i koszty obejmują zmianę planowanego rozkładu wytwarzania w celu usuwania ograniczeń sieciowych, transakcji przeciwstawnych (countertrading) oraz utrzymywania rezerwy sieciowej (grid reserve), zgodnie z zasadami mechanizmu

Redispatch 2.0; wartości zaczerpnięto bezpośrednio z monitoringowego raportu); RTE [2023] – Francja (koszty oszacowano na podstawie raportu rocznego); Svenska Kraftnät [2023] – Szwecja (koszty oszacowano na podstawie raportu rocznego); PSE [2023] oraz URE [2024] – Polska (dane odnoszą się przede wszystkim do nierynkowego ograniczania generacji z OZE, podczas gdy działania polegające na zmianie planowanego rozkładu wytwarzania w celu usuwania ograniczeń sieciowych odgrywają marginalną rolę). W przypadku braku jednolitego sposobu raportowania kosztów zarządzania ograniczeniami przesyłowymi zastosowano estymację opartą na dostępnych raportach rocznych operatorów systemów przesyłowych oraz danych publikowanych przez ENTSO-E [2023]. Ze względu na różnice w definicjach i zakresach raportowania stosowanych przez poszczególnych operatorów przedstawione wartości mają charakter szacunkowy i nie zawsze mogą być w pełni porównywalne między krajami

Source: [APG 2023; BNetzA 2023; ENTSO-E 2023; PSE 2023; RTE 2023; Svenska Kraftnät 2023; URE 2024]

Na rysunku 1 pokazano, że zależność między udziałem VRE a kosztami CM znormalizowanymi do generacji nie jest monotoniczna – co jest spójne z hipotezą o decydującej roli zasobów elastyczności systemowej (trzecia klasa determinant). Niemcy wyróżniają się z kosztami ok. 7,9 EUR/MWh przy udziale VRE 45%, podczas gdy Austria przy niemal 80-proc. udziale OZE wykazuje koszty ok. 1,4 EUR/MWh (94 mln EUR stanowią krajowe koszty zarządzania ograniczeniami sieciowymi za 2022 rok, przy całkowitej generacji ~67 TWh). Należy podkreślić, że wartość ta obejmuje wyłącznie koszty zarządzania ograniczeniami przesyłowymi ponoszone przez austriackich odbiorców energii, nie uwzględnia kosztów działań polegających na zmianie planowanego poziomu wytwarzania energii w poszczególnych jednostkach w celu usunięcia ograniczeń sieciowych realizowanych na terytorium Austrii na zlecenie operatorów sąsiednich systemów, przede wszystkim niemieckich. W 2022 r. koszty te wyniosły 718 mln EUR, jednak zostały przypisane odbiorcom w państwach zlecających, dlatego nie są ujmowane w analizowanej kategorii kosztowej.



Rysunek 1. Udział VRE a znormalizowane koszty zarządzania ograniczeniami przesyłowymi w wybranych systemach europejskich (2022)

Figure 1. VRE share and normalized congestion management costs in selected European power systems (2022)

Źródło: opracowanie własne na podstawie [APG 2023; BNetzA 2023; PSE 2023; RTE 2023; Svenska Kraftnät 2023]

Source: own elaboration based on [APG 2023; BNetzA 2023; PSE 2023; RTE 2023; Svenska Kraftnät 2023]

Polska zajmuje w tym zestawieniu pozycję specyficzną: bardzo niskie koszty CM w 2022 roku wynikają z dominacji dyspozycyjnych elektrowni węglowych, zapewniających wysoką elastyczność konwencjonalną. Jednak dane za lata 2023–2024 wskazują na dynamiczny wzrost wolumenu energii niewytworzonej wskutek ograniczania pracy odnawialnych źródeł energii – z 66 GWh w 2023 roku [URE 2024] do 731 GWh w 2024 roku [URE 2025] – co sygnalizuje zbliżanie się do progu, po przekroczeniu którego koszty CM zaczną gwałtownie rosnąć. Jest to dynamika analogiczna do tej, która występowała w Niemczech w latach 2016–2022. Narastająca zmienność rynkowa w polskim systemie elektroenergetycznym jest udokumentowana empirycznie – Thlon i in. [2024] wskazują, że szoki cenowe odnotowywane na polskim rynku energii elektrycznej od 2018 roku mają cechy trudno prognozowalnej niepewności systemowej, nie zaś mierzalnego ryzyka. Strukturalne uwarunkowania tych zmian – w tym wpływ miksu energetycznego i kosztów systemowych na ceny energii elektrycznej dla odbiorców końcowych – dokumentuje Thlon [2026] w analizie luki cenowej dotyczącej Polski i wybranych krajów UE w latach 2010–2025.

Szwecja, której rynek elektroenergetyczny jest podzielony na cztery strefy cenowe, ponosi wyższe koszty zarządzania ograniczeniami sieciowymi niż Austria mimo zbliżonego znaczenia hydroenergetyki w strukturze wytwarzania. Różnicę tę można wyjaśnić uwarunkowaniami instytucjonalnymi: podział rynku na strefy cenowe ujawnia ograniczenia przepustowości między poszczególnymi częściami systemu, co prowadzi do powstawania różnic w cenach oraz kosztach zarządzania ograniczeniami przesyłowymi między tymi obszarami. Jest to przykład współoddziaływania determinant technicznych (topologia sieci) i instytucjonalnych (konfiguracja stref) w kształtowaniu kosztów logistycznych systemu.

Mechanizm transmisji kosztów

Na rysunku 2 zilustrowano łańcuch przyczynowo-skutkowy między penetracją VRE i kosztami stabilizacji, zidentyfikowany na podstawie przeglądu literatury i danych empirycznych.

Wzrost penetracji VRE (wiatr, fotowoltaika)
Wzrost zmienności i przestrzennego niedopasowania przepływów mocy
Przeciążenia sieci przesyłowej (ograniczenia N-1)
Działania redispatchingowe TSO (przekierowanie generacji)
Aktywacja rezerw bilansujących i zarządzanie odchyleniami
Skumulowane koszty stabilizacji systemu elektroenergetycznego
Przełożenie na taryfy sieciowe odbiorców końcowych

Rysunek 2. Łańcuch transmisji kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego

Figure 2. Cost transmission chain in power system stabilization

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Analiza porównawcza pozwala wyróżnić trzy klasy logistycznych determinant kosztów stabilizacji. Determinanty przepustowości (capacity constraints) obejmują gęstość sieci przesyłowej, jej topologię oraz rozmieszczenie mocy VRE względem ośrodków konsumpcji. Determinanty zmienności przepływów (flow variability drivers) obejmują penetrację VRE, jej strukturę (sterowalna hydro vs. niesterowalny wiatr/PV) oraz sezonowość generacji. Determinanty elastyczności (flexibility resources) obejmują udział dyspozycyjnych jednostek generacji, pojemność magazynową, skalę reakcji strony popytowej (demand response) i połączenia transgraniczne.

Kluczowe jest to, że obserwowane dane są zgodne z oczekiwaniami wynikającymi z przyjętej ramy analitycznej – wzrost kosztów CM przy malejących zasobach elastyczności ma charakter ponadproporcjonalny, co jest spójne z analogicznymi zależnościami dokumentowanymi w literaturze [Hirth 2013; Hirth i Ziegenhagen 2015]. Przypadek Niemiec (wzrost kosztów zarządzania ograniczeniami sieciowymi o ok. 1800% przy wzroście udziału OZE o ~16 pp. w latach 2016–2022) jest zgodny z tą zależnością, lecz potwierdzenie jej formalnej struktury wymagałoby estymacji ekonometrycznej – co stanowi kierunek dalszych badań.

Podsumowanie i wnioski

W ramach przeprowadzonych analiz dokonano klasyfikacji kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego z perspektywy logistyki systemowej oraz analizy porównawczej tych kosztów w odniesieniu do pięciu europejskich systemów. Na podstawie przeprowadzonego badania można sformułować następujące wnioski.

Po pierwsze, zasadniczy wkład artykułu polega na reinterpretacji kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego z wykorzystaniem kategorii analitycznych wywodzących się z logistyki systemowej. System elektroenergetyczny wykazuje cechy sieci logistycznej: przepływy energii odpowiadają przepływom dóbr, rezerwy bilansujące pełnią funkcję zapasów bezpieczeństwa, magazyny energii stanowią bufor systemowy, a redysponowanie mocy odpowiada przekierowywaniu przepływów w sytuacji występowania ograniczeń sieciowych. Perspektywa ta pozwala wykorzystać narzędzia znane z logistyki i badań operacyjnych, takie jak model newsvendor, modele przepływu minimalno-kosztowego oraz mechanizmy cenowe odzwierciedlające ograniczoną przepustowość infrastruktury, do analizy i optymalizacji kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego.

Po drugie, koszty stabilizacji systemu mają charakter wielowymiarowy i obejmują pięć kategorii logistycznych, różniących się zarówno mechanizmami alokacji, jak i czynnikami determinującymi ich poziom. Skuteczne zarządzanie tymi kosztami wymaga zatem zastosowania zróżnicowanych instrumentów regulacyjnych, dostosowanych do specyfiki poszczególnych kategorii, a nie jednego, zunifikowanego podejścia.

Po trzecie, dane empiryczne dla 2022 roku wskazują na silne zróżnicowanie kosztów CM: od ok. 7,9 EUR/MWh generacji w Niemczech do poniżej 0,2 EUR/MWh w Polsce. Kluczową determinantą nie jest sam udział VRE, lecz dostępność elastycznych zasobów buforowych – hydroenergetyka Austrii i Szwecji utrzymuje koszty na niskim poziomie pomimo wysokiego udziału OZE. Obserwacje empiryczne są zgodne z zależnościami dokumentowanymi w literaturze dotyczącymi nieliniowego wzrostu kosztów integracji

VRE przy niewystarczających zasobach elastyczności – formalna weryfikacja tej zależności wymaga jednak dalszych badań ilościowych.

Po czwarte, wyniki badania wskazują na szereg implikacji dla polityki energetycznej. Obejmują one w szczególności potrzebę: przejrzystego odzwierciedlania kosztów stabilizacji systemu elektroenergetycznego w taryfach sieciowych, integracji prognoz kosztów zarządzania ograniczeniami sieciowymi z procesami planowania rozwoju sieci przesyłowych, wspierania inwestycji w zasoby elastyczności systemowej – takie jak magazyny energii, programy redukcji zapotrzebowania oraz połączenia międzysystemowe – a także rozważenia zmian w strukturze stref cenowych w celu ograniczenia przeciążeń sieciowych i poprawy efektywności ekonomicznej funkcjonowania rynku energii.

Ograniczeniami analizy są jej koncepcyjno-porównawczy charakter, oparcie na zagregowanych danych operatorskich oraz szacunkowy charakter części wartości podanych w tabeli 2. Kierunkiem dalszych badań powinna być budowa modelu panelowego opartego na danych zdarzeniowych (event-level panel), łączącego parametry techniczne z kosztami zarządzania ograniczeniami sieciowymi, co umożliwiłoby ilościowe testowanie hipotezy nieliniowości.

Badania sfinansowano ze środków projektu badawczego w ramach programu Potencjał nr 027/EEE/2025/POT administrowanego przez Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie.

Autor składa podziękowania uczestnikom VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Ekonomiczno-społeczne skutki kryzysów”, zorganizowanej przez Instytut Zarządzania SGGW w Warszawie 11 czerwca 2026 r., za wartościowe uwagi i komentarze zgłoszone podczas prezentacji wyników badań, które zostały uwzględnione przy opracowywaniu ostatecznej wersji artykułu.

Bibliografia

- ACER, 2021: Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2020.
- ACER, 2022: Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2021.
- ACER, 2023: Annual Report on the Results of Monitoring the Internal Electricity and Natural Gas Markets in 2022.
- Ackermann L., Gabrek N., Zachmann B., Neitz-Regett A., Seifermann S., 2024: Cost-benefit analysis and comparison of grid-stabilizing energy flexibility options and their applications in relation to the German energy system, *Renewable Energy Focus* 49, 100570, <https://doi.org/10.1016/j.ref.2024.100570>
- Akkad M.Z., Javani N., Banyai T., 2026: Cost-optimized placement of energy storage in renewable networks, *Pollack Periodica*, <https://doi.org/10.1556/606.2025.01464>
- APG, 2023: APG Annual Report 2022, Austrian Power Grid, Wiedeń.
- BNetzA, 2023: Monitoringbericht 2023/Monitoring Report 2023, Bundesnetzagentur & Bundeskartellamt, Bonn, <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/monitoringberichtenergie2023.pdf> [dostęp: 15.05.2026].

- Demoulias C.S., Malamaki K.N.D., Gkavanoudis S. i in., 2020: Ancillary services offered by distributed renewable energy sources at the distribution grid level: An attempt at proper definition and quantification, *Applied Sciences* 10(20), 7106, <https://doi.org/10.3390/app10207106>
- Ehrenmann A., Smeers Y., 2005: Inefficiencies in European congestion management proposals, *Utilities Policy* 13(2), 135–152, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2004.12.007>
- Ela E., Milligan M., Kirby B., 2011: Operating reserves and variable generation, NREL Technical Report TP-5500-51978, NREL, Golden (CO), <https://doi.org/10.2172/1023095>
- ENTSO-E, 2023: ENTSO-E Transparency Platform, <https://transparency.entsoe.eu> [dostęp: 10.05.2026].
- Hirth L., 2013: The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price, *Energy Economics* 38, 218–236, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004>
- Hirth L., Ueckerdt F., Edenhofer O., 2015: Integration costs revisited – an economic framework for wind and solar variability, *Renewable Energy* 74, 925–939, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.08.065>
- Hirth L., Ziegenhagen I., 2015: Balancing power and variable renewables: Three links, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50, 1035–1051, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.180>
- Ivanov D., 2022: Blackout and supply chains: Performance, resilience and viability impact analysis, *Annals of Operations Research*, <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04754-9>
- Kazimierski B.K., Baczyński D., Piotrowski P., 2026: Analiza wpływu przepływów kołowych na funkcjonowanie europejskiego i krajowego rynku energii, *Elektro.Info* 242(3), <https://www.elektro.info.pl/artikul/rynek-energii/220668,analiza-wplywu-przeplywow-kołowych-na-funkcjonowanie-europejskiego-i-krajowego-rynku-energii> [dostęp: 29.04.2026].
- Peng Y., Xu D., Li Y., Wang K., 2020: A product service supply chain network equilibrium model considering capacity constraints, *Mathematical Problems in Engineering*, 1295072, <https://doi.org/10.1155/2020/1295072>
- PSE, 2023: Raport roczny KSE 2022, Polskie Sieci Elektroenergetyczne, <https://www.pse.pl/dane-systemowe/funkcjonowanie-kse/raporty-roczne-z-funkcjonowania-kse-za-rok/raporty-za-rok-2022> [dostęp: 10.05.2026].
- RTE 2023: Bilan électrique 2022, Réseau de Transport d'Électricité, Paris, [https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2023-09/Bilan%20%C3%A9lectrique%202022%20rapport%20V4%20\(1\).pdf](https://assets.rte-france.com/analyse-et-donnees/2023-09/Bilan%20%C3%A9lectrique%202022%20rapport%20V4%20(1).pdf) [dostęp: 03.05.2026].
- Schweppe F.C., Caramanis M.C., Tabors R.D., Bohn R.E., 1988: *Spot Pricing of Electricity*, Kluwer Academic Publishers, Boston, <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-1683-1>
- Silver E.A., Pyke D.F., Peterson R., 1998: *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*, wyd. 3, Wiley, Nowy Jork.
- Stadtler H., Kilger C. (red.), 2008: *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies*, wyd. 4, Springer, Berlin–Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74512-9>
- Staffell I., Pfenninger S., 2018: The increasing impact of weather on electricity supply and demand, *Energy* 145, 65–78, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.051>
- Stoft S., 2002: *Power System Economics. Designing Markets for Electricity*, IEEE Press & Wiley-Interscience, Piscataway, <https://doi.org/10.1109/9780470545584>

- Svenska Kraftnät, 2023: Årsredovisning 2022, Svenska kraftnät, Sundbyberg, <https://www.svk.se/siteassets/om-oss/organisation/finansiell-information/arkiv/arsredovisning-affarsverket-svenska-kraftnat-220221.pdf> [dostęp: 03.05.2026].
- Thlon M., 2026: Poland and selected EU countries (2010–2025): Evolution and determinants of the household electricity price gap, *Utilities Policy* 102, 102262, <https://doi.org/10.1016/j.jup.2026.102262>
- Thlon M., Brożek A., Thlon, J., 2024: Rynek energii elektrycznej w Polsce: perspektywa ryzyka i niepewności, *Horizons of Politics/Horyzonty Polityki* 15(52), <https://doi.org/10.35765/hp.2582>
- Thomassen G., Fuhrmanek A., Cadenovic R., Pozo Camara D., Vitiello S., 2024: Redispatch and Congestion Management, Publications Office of the European Union, Luxembourg, JRC137685, <https://doi.org/10.2760/853898>
- Christine B., Gert B., Nele F., 2012: Smart Pricing to Reduce Network Investment in Smart Distribution Grids-Experience in Germany, [w:] F.P. Sioshansi (red.), *Smart Grid: Integrating Renewable, Distributed and Efficient Energy*, Elsevier.
- URE, 2024: Rynek energii elektrycznej: sprawozdanie Prezesa URE dotyczące redysponowania w 2023 r., Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa.
- URE, 2025: Rynek energii elektrycznej: sprawozdanie Prezesa URE dotyczące redysponowania w 2024 r., Urząd Regulacji Energetyki, Warszawa.
- Wang Y., Zhang H., Yuan C., Li X., Jiang, Z., 2025: An efficient scheduling method in supply chain logistics based on network flow, *Processes* 13(4), 969, <https://doi.org/10.3390/pr13040969>

