



Monografia naukowa

VIII Konferencja naukowa z cyklu „Logistyka dziś i jutro”



WELCOME TO
INDUSTRY 4.0

LOGISTYKA W INŻYNIERII PRODUKCJI

Przemyśl 2025

Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie
Katedra Inżynierii Produkcji, Logistyki i Informatyki Stosowanej

Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyśle
Instytut Nauk Technicznych

LOGISTYKA W INŻYNIERII PRODUKCJI

MONOGRAFIA

pod redakcją
Grzegorza Dzieniszewskiego
Macieja Kubonia

Przemyśl, 2025

Materiały z VIII Konferencji Naukowej z cyklu „Logistyka dziś i jutro”
Przemysł 2025

Opracowanie redakcyjne:
Mgr inż. Elżbieta Olech

Recenzenci:
Prof. dr hab. inż. Sławomir Kocira – Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
Dr hab. inż. Andrzej Borusiewicz, prof. Uczelni – MANS w Łomży

Korekta, łamanie oraz projekt okładki:
Zbigniew Szpila

Redakcja nie odpowiada za treść i formę materiałów nadesłanych.
Opinie wyrażone w artykułach są wyłącznymi opiniami ich autorów.

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji zabronione bez pisemnej
zgody autorów

Druk i oprawa:
NOVA SANDEC
ul. Lwowska 143, 33-300 Nowy Sącz
tel. +48 (18) 547 45 45
e-mail: biuro@novasandec.pl; <http://www.novasandec.pl>
Ark. wyd. 11,50; ark. Druk. 10,25
Nakład: 100 egz.

© Copyright by Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej, Kraków 2025
Wydanie I

ISBN 978-83-64377-71-6



Wydawnictwo „INŻYNIERIA ROLNICZA”
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków
<https://agriceng.org>; e-mail: redakcja@ptir.org

Spis treści

Anders A., Choszcz D. J., Markowski P.: Modelowanie 3D kształtu nasion fasoli na potrzeby optymalizacji logistyki wewnętrznej	5
Dzieniański G., Sasiela W., Babula J.: Optymalizacja sprzęgła napędu ślimaka korkującego w aspekcie inżynierii produkcji.....	19
Dzieniański G., Sasiela W., Jankó K.: Analiza procedur serwisowych w aspekcie inżynierskim i ekonomicznym.....	31
Giera J., Masłowski D., Dendera-Gruszka M.: Ujęcie traceability prób produkcyjnych w systemach klasy ERP	43
Gródek-Szostak Z., Olech E., Kornas R.: Geopolityka jako element zarządzania inżynierią produkcji	57
Jadwisieńczyk K. K., Choszcz D. J., Majkowska-Gadomska J.: Wpływ organizacji procesu produkcyjno-logistycznego na efektywność dezynfekcji jaj	67
Kuboń M., Dudziak A., Zając G., Słowik T.: Bezpieczeństwo w łańcuchu dostaw i jego wpływ na rozwój rynku e-commerce.....	75
Lemecha M., Choszcz D., Janulin M., Ligier K., Mikołajczak P.: Zastosowanie metody FMEA do oceny niezawodności maszyn w przedsiębiorstwie produkcyjnym	89
Łachman P., Kuboń M., Kwaśniewski D., Olech E., Furyk-Grabowska K., Gajda J., Kornas R.: Inżynieria wytwarzania w badaniach nad wpływem mikrododatków na właściwości fizyczne betonów ogniotrwałych	109
Malaga-Toboła U., Gibas K., Toboła N., Kuboń M., Kwaśniewski D.: Integracja transportu publicznego i współdzielonego jako wyzwanie dla logistyki w inżynierii produkcji	127
Sioma A.: Systemy wizyjne jako źródło danych w zarządzaniu jakością produkcji ..	143
Szwedziak K., Busławski A., Pieczyński M., Russek K.: Lean manufacturing jako metoda zwiększania efektywności w zarządzaniu procesami produkcyjnymi...	153

MODELOWANIE 3D KSZTAŁTU NASION FASOLI NA POTRZEBY OPTYMALIZACJI LOGISTYKI WEWNĘTRZNEJ

Andrzej Anders¹, Dariusz J. Choszcz¹, Piotr Markowski¹

¹ Katedra Pojazdów i Maszyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Wprowadzenie

Współczesna logistyka i przetwórstwo coraz częściej opierają się na precyzyjnych modelach geometrycznych surowców. Modele trójwymiarowe (3D) surowców rolniczych znajdują zastosowanie w optymalizacji procesów mechanicznej obróbki oraz w projektowaniu zespołów funkcjonalnych urządzeń do automatyzacji transportu i sortowania. Przypisanie modelom 3D właściwości fizycznych umożliwia przeprowadzanie symulacji procesów logistycznych i technologicznych, takich jak transport pneumatyczny, dozowanie, czyszczenie, czy sortowanie¹. Modelowanie geometryczne wykorzystywane w projektowaniu maszyn oraz optymalizacji łańcucha logistycznego zazwyczaj zakłada jednorodność materiału oraz jego uproszczony kształt (np. kula, elipsoida, stożek)². Jednak surowce rolnicze wykazują dużą zmienność kształtu i rozmiaru, co wpływa na sposób ich przemieszczania się w układach transportowych oraz ich zachowanie w maszynach przetwórczych³. Dzięki rozwojowi technik komputerowych, takich jak CAD (*Computer-Aided Design*) i CFD (*Computational Fluid Dynamics*), możliwe jest tworzenie i zastosowanie bardziej złożonych modeli geometrycznych do analiz przepływu, kontaktu i kolizji w systemach logistycznych i technologicznych⁴. Kluczowym wyzwaniem w projektowaniu urządzeń do mechanicznej obróbki i transportu nasion jest stworzenie realistycznych modeli 3D, które wiernie odwzorowują kształty i właściwości geometryczne rzeczywistych nasion⁵. Dotyczy to w dużej mierze nasion, które

¹ Binelo M.O., de Lima R.F., Khatchatourian O.A., Stransky J., Modelling of the drag force of agricultural seeds applied to the discrete element method. *Biosystems Engineering*, 178, s. 168–175, 2019

² Wiącek J. i in., Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls. *Biosystems Engineering*, 209, s. 216–231, 2021

³ Zubko V. i in., Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering*, 26(1), s. 25–37, 2022

⁴ Xiaolong L., Yitao L., Qingxi L., Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131, s. 29–39, 2016

⁵ Dongxu Y. i in., A general modelling method for soybean seeds based on the discrete element method. *Powder Technology*, 372, s. 212–226, 2020

mają nieregularny i zróżnicowany kształt, co wpływa na ich orientację, toczenie, tarcie oraz możliwość zakleszczania się w urządzeniach. Dlatego szczególnego znaczenia nabiera tworzenie modeli bazujących na siatkach przestrzennych generowanych z obrazów 2D lub skanów 3D, które umożliwiają analizę wymiarów, objętości i powierzchni⁶. W literaturze opisano szereg metod tworzenia modeli geometrycznych nasion i produktów rolnych – od analizy obrazu, przez techniki tomografii komputerowej, po rezonans magnetyczny i skanowanie 3D^{7,8}. Badania nad modelami wielosferycznymi (multi-sphere) wykorzystywane są w symulacjach metodą elementów dyskretnych (DEM – *Discrete Element Method*), co pozwala na przewidywanie zachowania cząstek w przepływach masowych, zbiornikach, przesiewaczach czy systemach pakowania^{9,10}. W kontekście nasion fasoli, modele 3D umożliwiają przeprowadzenie szczegółowych analiz przepływu materiału przez linie logistyczne oraz maszynowe (produkcyjne, technologiczne), identyfikację miejsc potencjalnych zatorów i strat surowców, a także optymalizację geometrii elementów mechanicznych – takich jak prowadnice, pochylnie, wibratory czy podajniki. Porównanie modeli uzyskanych metodą siatek przestrzennych z modelami ze skanowania 3D pozwala na ocenę dokładności odwzorowania parametrów geometrycznych i ich wpływu na efektywność procesów logistycznych i przetwórczych.

Celem niniejszej pracy jest opracowanie i analiza trójwymiarowych modeli geometrycznych nasion fasoli pod kątem ich zastosowania w logistyce wewnętrznej oraz obróbce mechanicznej. Szczególną uwagę poświęcono metodzie rekonstrukcji modeli na podstawie fotografii 2D oraz porównaniu ich z modelami uzyskanymi za pomocą skanowania 3D, w kontekście ich przydatności do symulacji i projektowania w środowiskach CAD/CFD oraz DEM.

Material i metody

Materiał badawczy stanowiły nasiona fasoli odmiany *Złota Saxa*, Nasiona zakupiono w Przedsiębiorstwie Nasiennictwa Ogrodniczego i Szkółkarstwa w Ożarowie Mazowieckim Sp. z o.o. (52°12'37"N, 20°48'0"E). Do badań losowo wybrano 30 nasion, niepołamanych i pozbawionych widocznych uszkodzeń. Nasiona miały walcowaty kształt i biały kolor. Do czasu skanowania 3D były przechowywane w chłodziarce w stałej temperaturze 6°C oraz przy wilgotności powietrza wynoszącej 60%. Długość, szerokość i grubość nasion fasoli wyznaczano za pomocą suwmiarki elektronicznej o dokładności $d = 0,01$ mm (rys. 1). Nasiona fasoli ważono na wadze elektronicznej RADWAG WAA 100/C/2 z dokładnością 0,0001 g.

⁶ Anders A., Markowski P., Kaliniewicz Z., Numerical modelling of agricultural products on the example of bean and yellow lupine seeds. *International Agrophysics*, 29(4), s. 397–403, 2015

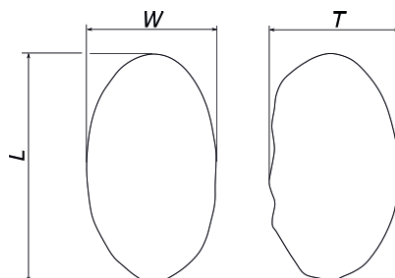
⁷ Goni S.M., Purlis E., Salvadori V.O., Geometry modeling of food materials from magnetic resonance imaging. *Journal of Food Engineering*, 88, s. 561–567, 2008

⁸ Rahmi U., Ferruh E., Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. *Journal of Food Engineering*, 93, s. 337–343, 2009

⁹ Jian X. i in., Discrete element modeling and simulation of soybean seed using multi-spheres and super-ellipsoids. *IEEE Access*, 8, s. 222672–222683, 2020

¹⁰ Long Z. i in., Study on key issues in the modelling of maize seeds based on the multi-sphere method. *Powder Technology*, 394, s. 791–812, 2021

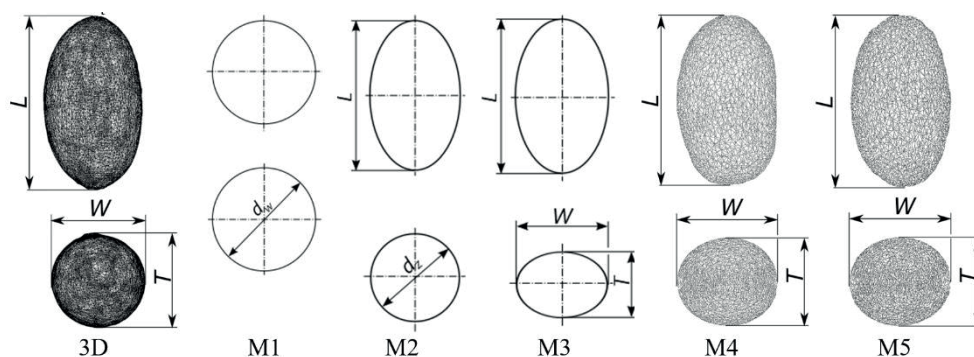
Skanowanie 3D wykonano skanerem Nextengine z gęstością skanowania 248 punktów na mm^2 . Dokładność skanowania 3D wynosiła 0,13 mm. Budowę modeli geometrycznych 3D nasion wykonano za pomocą programu komputerowego ScanStudio HD PRO¹¹. Pole powierzchni i objętości określono na podstawie modeli 3D nasion w programie MeshLab¹².



Rysunek 1. Podstawowe wymiary nasion fasoli: L – długość (mm), W – szerokość (mm), T – grubość (mm)

Źródło: opracowanie własne

Następnie obliczono pole powierzchni oraz objętość modeli geometrycznych przedstawionych na rysunku 2. Do obliczeń wymiarów geometrycznych nasion wykorzystano wyniki pomiarów przeprowadzonych suwmiarką elektroniczną, z zastosowaniem formuł matematycznych.



Rysunek 2. Modele geometryczne nasion fasoli: 3D – model utworzony za pomocą skanowania 3D, M1 – kula, M2 – elipsoida obrotowa, M3 – elipsoida, M4 – siatka trójkątów uzyskana w programie Monster Mash dla nasiona ustawionego bokiem, M5 – siatka trójkątów uzyskana w programie Monster Mash dla nasiona ustawionego bruzdką do góry, L – długość (mm), W – szerokość (mm), T – grubość (mm)

Źródło: opracowanie własne

¹¹ NextEngine, NextEngine User Manual. <http://www.nextengine.com> [dostęp: 2.06.2025]

¹² MeshLab Visual Computing Lab – ISTI – CNR. <http://meshlab.sourceforge.net> [dostęp: 2.06.2025]

Do oszacowania objętości i pola powierzchni nasion zastosowano następujące formuły matematyczne:

– model kuli ($M1$):

$$A_{M1} = \pi \cdot d_w^2 \quad (1)$$

$$V_{M1} = \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} \quad (2)$$

– model elipsoidy obrotowej ($M2$), gdy: $\frac{L}{2} > \frac{d_z}{2}$

to:

$$A_{M2} = \frac{4 \cdot \pi \cdot d_z^2 + \pi \cdot L \cdot d_z \cdot e \cdot \arcsin(e)}{8} \quad (3)$$

$$\text{gdzie: } e = \sqrt{1 - \frac{d_z^2}{L^2}} \quad (4)$$

$$V_{M2} = \frac{\pi \cdot d_z^2 \cdot L}{6} \quad (5)$$

– model elipsoidy ($M3$):

$$A_{M3} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{L}{2} \right)^2 + \frac{\frac{T}{2} \left(\frac{L}{2} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{W}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2}} \cdot F(\Theta, m) + \frac{T}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{W}{2} \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2} \cdot E(\Theta, m) \right) \quad (6)$$

gdzie:

$$m = \frac{L^2 \cdot T^2 - L^4}{T^2 \cdot W^2 - L^2 \cdot T^2} \quad (7)$$

$$\Theta = \arcsin \sqrt{\frac{\sqrt{W^2 - L^2}}{|W|}} \quad (8)$$

a $F(\Theta, m)$ i $E(\Theta, m)$ to niekompletne całki eliptyczne pierwszego i drugiego rodzaju¹³.

$$V_{M3} = \frac{\pi \cdot T \cdot W \cdot L}{6} \quad (9)$$

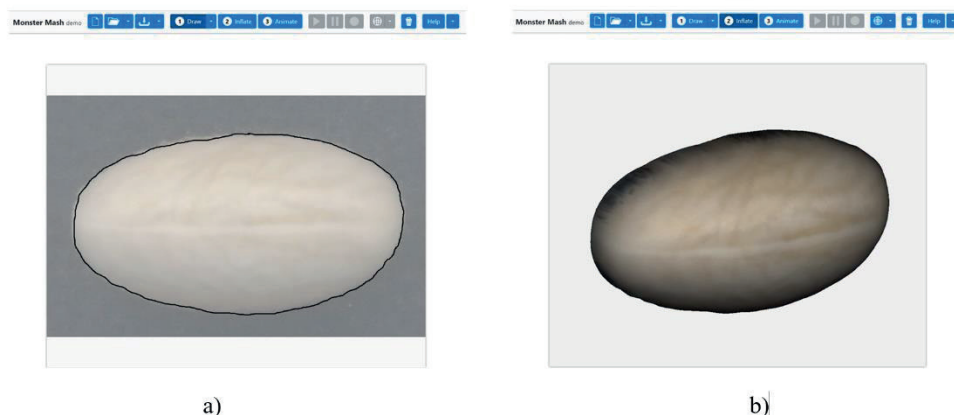
Występujące w modelach $M1$, $M2$ i $M4$ średnice zastępcze wyznaczano ze wzorów:

$$d_w = \frac{L+W+T}{3} \quad (10)$$

$$d_z = \frac{W+T}{2} \quad (11)$$

¹³ Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A., Musiol G., Muhling H., Nowoczesne kompendium matematyki. PWN, Warszawa, 2009

Model geometryczny nasion fasoli *M4* i *M5* zbudowano w programie Monster Mash w postaci siatki trójkątów (rys. 3). Przeskalowanie modeli *M4* i *M5* wykonano w programie Autodesk Netfabb Premium 2017. Fotografie nasion do tworzenia siatek trójkątów wykonano skanerem płaskim Plustek OpticPro ST24 o rozdzielczości 1 200 DPI. Tworzenie modeli 3D z rysunków 2D opierało się na analizie sylwetek i konturów nasion, rekonstrukcji osi szkieletowych (medial axis), przekształceniu tych osi w objętościowe bryły (inflacja, powierzchnie implicytne) i zastosowaniu założeń geometrycznych takich jak symetria czy gładkość. Użycie powierzchni implicytnych (SCALIS) i ich płynne łączenie pozwalało na budowę modeli 3D nasion z części o organicznych kształtach, dzięki zastosowaniu matematycznych funkcji, które tworzą gładkie i spójne połączenia między elementami^{14,15,16}.



Rysunek 3. Budowa siatki trójkątów w programie Montermash na podstawie fotografii nasiona: a) – wykonanie obrysu nasiona, b) – „nadmuchany” przestrzenny model nasiona

Źródło: opracowanie własne

Pole powierzchni i objętość dla tak otrzymanych modeli geometrycznych wyznaczono w programie Meshlab. Porównanie geometrii modeli z modelami nasiona zbudowanymi za pomocą skanowania 3D wykonano w programie GOM Inspect¹⁷, a obliczenia statystyczne w programie Statistica 10 przyjmując poziom istotności $\alpha = 0.05$. Błąd względny pola powierzchni i objętości obliczono według wzorów:

$$\delta_A = \frac{|A - A_{MX}|}{A} \cdot 100\% \quad (12)$$

¹⁴ Entem E. i in., Modeling 3D animals from a side-view sketch. Computers & Graphics, 46, s. 221–230, 2015

¹⁵ Igarashi T. i in.: Teddy, A sketching interface for 3D freeform design. Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '99), s. 409–416, 1999

¹⁶ Ma J. i in., Real-time skeletonization for sketch-based modeling. Computers & Graphics, 102, s. 56–66, 2022

¹⁷ GOM Inspect. <https://www.gom.com> [dostęp: 2.06.2025]

$$\delta_V = \frac{|V - V_{MX}|}{V} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie:

- A – pole powierzchni nasiona fasoli określone na podstawie skanowania 3D (mm²),
- A_{MX} – pole powierzchni nasiona fasoli modelu geometrycznego (mm²),
- V – objętość nasiona fasoli określona na podstawie skanowania 3D (mm³),
- V_{MX} – objętość nasiona fasoli modelu geometrycznego (mm³).

Wyniki badań i ich analiza (dyskusja)

Nasiono fasoli odmiany *Złota Saxa* posiada walcowaty kształt, a na jego przedniej stronie występuje bruzda. Masa najmniejszego z badanych nasion wynosiła 0,2151 g, a największego 0,3655 g. Na podstawie wyników uzyskanych w procesie skanowania 3D stwierdzono, że wartość pola powierzchni zewnętrznej nasion mieściła się w zakresie od 150,54 mm² do 211,10 mm², natomiast średnia wartość tego parametru wyniosła 180,85 mm². Z kolei objętość nasion mieściła się w przedziale od 156,35 mm³ do 264,25 mm³, ze średnią 207,96 mm³ (tab. 1). Średnie wymiary badanych nasion fasoli oraz pole powierzchni i objętość przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników pomiarów cech geometrycznych nasion fasoli

Zmienna	Średnia	Współczynnik zmienności	Odchylenie standardowe
L (mm)	10,68	5,14	0,55
W (mm)	6,17	6,32	0,39
T (mm)	5,90	5,59	0,33
A^{3D} (mm ²)	180,85	8,77	15,87
V^{3D} (mm ³)	207,96	13,64	28,37
m (g)	0,2881	13,88	0,040

^{3D}- skanowanie 3D

Określenie istotności różnic między średnimi wartościami pola powierzchni i objętości modeli 3D nasion wykonano nieparametrycznym testem Kruskala-Wallisa. Wynik oceny istotności różnic między parametrami nasion uzyskanymi za pomocą skanowania 3D, obliczeń na podstawie formuł matematycznych i obliczeń na podstawie modeli geometrycznych przedstawiono w tabelach 2 i 3. Średnie pole powierzchni nasiona fasoli określone na podstawie skanowania 3D nie różniło się istotnie od średniego pola powierzchni modelu geometrycznego $M1$, $M2$, $M3$ i $M4$ oraz różniło się istotnie od średniego pola powierzchni modelu $M5$.

Tabela 2. Wyniki obliczeń weryfikacji istotności różnic między średnimi wartościami pola powierzchni nasion fasoli

Pole powierzchni A (Kruskala-Wallisa test), $H(5, N=180)=15,5231$; $p=0,0083$

Prawdopodobieństwa porównań wielokrotnych

Metoda pomiaru	N ważnych	Suma Rang	Średnia Ranga	Średnia
3D	30	3091,00	103,03	180,85 ^a
$M1$	30	3133,00	104,43	181,37 ^a
$M2$	30	2733,00	91,10	176,90 ^a
$M3$	30	2918,00	97,26	178,99 ^a
$M4$	30	2650,00	88,33	175,13 ^a
$M5$	30	1765,00	58,83	165,32 ^b

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b ($p \leq 0,05$)

Średnia objętość nasiona fasoli określona na podstawie skanowania 3D nie różniła się istotnie od średniej objętości modelu geometrycznego zbudowanego za pomocą elipsoidy obrotowej $M2$, elipsoidy $M3$ i modelu $M4$ zbudowanego na podstawie rysunku 2D dla nasiona ustawionego bokiem.

Tabela 3. Wyniki obliczeń weryfikacji istotności różnic między średnimi wartościami objętości nasion fasoli

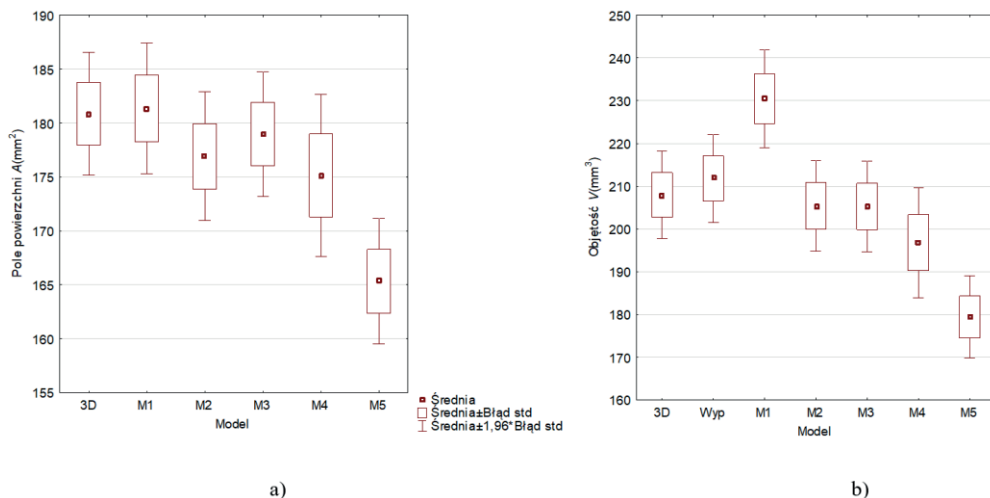
Objętość V (Kruskala-Wallisa test), $H(6, N=210)=35,2579$; $p=0,000$

Prawdopodobieństwa porównań wielokrotnych

Metoda pomiaru	N ważnych	Suma Rang	Średnia Ranga	Średnia
3D	30	3304,00	110,13	207,96 ^a
W_{yp}	30	3548,00	118,26	211,78 ^a
$M1$	30	4435,00	147,83	230,40 ^c
$M2$	30	3190,00	106,33	205,40 ^a
$M3$	30	3153,00	105,10	205,22 ^a
$M4$	30	1764,00	58,80	196,76 ^a
$M5$	30	2761,00	92,03	179,37 ^b

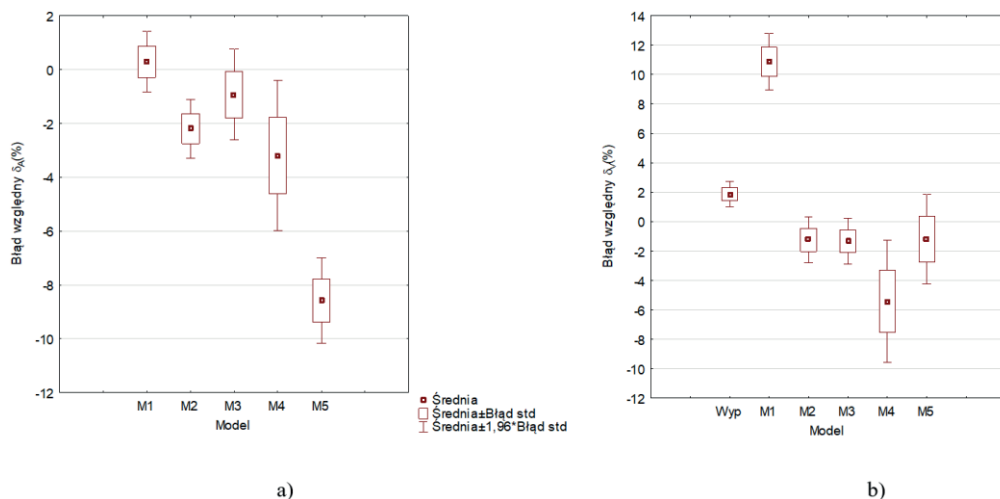
Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b, c ($p \leq 0,05$)

Rozkład pola powierzchni nasiona fasoli uzyskany przy zastosowaniu skanowania 3D i zbudowanych modeli geometrycznych przedstawiono na rysunku 4a, a rozkład objętości nasiona fasoli określonych tymi samymi metodami na rysunku 4b.



Rysunek 4. Parametry rozkładu normalnego: a) - pole powierzchni nasion fasoli, b) - objętość nasion fasoli

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 5. Błąd względny metody wyznaczania parametrów geometrycznych nasion fasoli z wykorzystaniem modeli geometrycznych, metody wypornościowej i skanów 3D: a) - pola powierzchni, b) - objętość

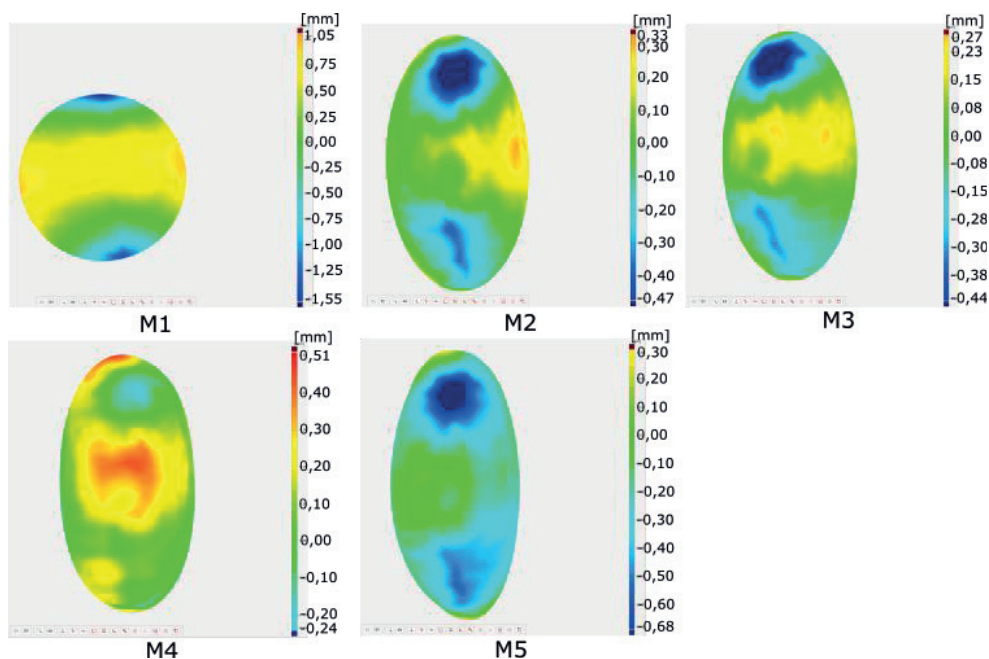
Źródło: opracowanie własne

Zakładając, że uzyskane metodą skanowania 3D wymiary nasion fasoli są obarczone niewielkim błędem, to mogą one stanowić bazę odniesienia dla wyników uzyskanych za pomocą pozostałych metod i przyrównania kształtu nasion do zbudowanych modeli geometrycznych. Błąd względny między wartościami uzyskanymi metodą pomiaru modelu 3D a uzyskanymi

metodą zastosowaną do budowy modeli geometrycznych nazwano „błędem metody”. Jak widać z rysunku 5a błąd metody pomiaru pola powierzchni jest najmniejszy dla modelu geometrycznego *M1* i wyniósł on 0,28%. Błąd względny dla modelu geometrycznego *M3* wynosił -0,93%. Błąd względny dla modelu geometrycznego *M2* i *M5* wynosił -2,19%, i -3,19%. W przypadku stosowania modelu *M5* błąd ten przekracza wartość -8%. Błąd metody pomiaru objętości ukazany na rysunku 5b jest najmniejszy dla modelu geometrycznego *M2*, *M3*, *M4* i wyniósł odpowiednio 1,24%, 1,33% i 1,19%. W przypadku stosowania pozostałych modeli (*M1*, *M5*) błąd ten przekracza wartość 5%.

Wyniki uzyskane w niniejszym opracowaniu wskazują, że przestrzenne modele 3D nasion fasoli, utworzone przy wykorzystaniu technologii skanowania 3D i numerycznego przetwarzania danych, stanowią istotne narzędzie wspierające projektowanie procesów logistycznych w rolnictwie i przetwórstwie rolno-spożywczym. Modele te pozwalają na precyzyjne określenie parametrów geometrycznych nasion, takich jak objętość, powierzchnia i kształt, co jest zgodne z obserwacjami autorów wcześniejszych prac, np. Andersa i in. (2015) oraz Borygi i Kołodzieja (2022), którzy podkreślali znaczenie dokładnych modeli geometrycznych w analizach przepływu i transportu materiałów sypkich. W kontekście logistyki geometryczne odwzorowanie nasion fasoli umożliwia symulację ich zachowania w różnych układach mechanicznych, a także optymalizację projektów urządzeń transportujących, sortujących i pakujących. Jak wykazali Pasha i in. (2016), nieregularny kształt cząstek ma istotny wpływ na ich przepływ w systemach opartych na metodzie elementów dyskretnych (DEM), co potwierdza konieczność uwzględniania dokładnych modeli 3D w analizach inżynierskich. Ponadto, zastosowanie metod numerycznych w analizie przestrzennej struktury nasion umożliwia lepsze prognozowanie ich zachowania w środowiskach o ograniczonej przestrzeni, takich jak silosy, kontenery transportowe czy dozowniki nasion. Badania Binelo i in. (2019) oraz Shuai i in. (2022) potwierdzają, że modelowanie oporu aerodynamicznego i kontaktów międzyziarnowych może znacząco przyczynić się do optymalizacji procesów zasypu, przepływu oraz napełniania zbiorników. Warto również zwrócić uwagę na możliwości integracji danych geometrycznych z systemami CAD i programami do analizy MES (np. FreeCAD, GOM Inspect), co umożliwia pełne odwzorowanie rzeczywistych warunków pracy nasion w maszynach rolniczych. Tego typu podejście, zaprezentowane m.in. przez Balcerzaka i in. (2015), pozwala na tworzenie wirtualnych prototypów maszyn, zanim zostaną one wdrożone do produkcji. Podsumowując, modelowanie 3D nasion fasoli nie tylko zwiększa precyzję analiz inżynierskich, ale również przyczynia się do zwiększenia efektywności i niezawodności procesów logistycznych w łańcuchu dostaw produktów rolnych. Należy jednak zwrócić uwagę na potrzebę dalszego rozwoju narzędzi symulacyjnych i standardów opisu geometrycznego, które zapewnią interoperacyjność pomiędzy różnymi systemami modelowania i analiz. Mapy odchyłek wymiarów zbudowanych modeli geometrycznych nasion fasoli w porównaniu do modeli numerycznych uzyskanych za pomocą skanowania 3D wykonane zostały w programie GOM Inspect¹⁸ (rys. 6). Obszary zaznaczone kolorem zielonym ukazują miejsca o najmniejszych odchyłkach wymiarów natomiast obszary zaznaczone kolorem niebieskim i czerwonym ukazują miejsca o największych odchyłkach.

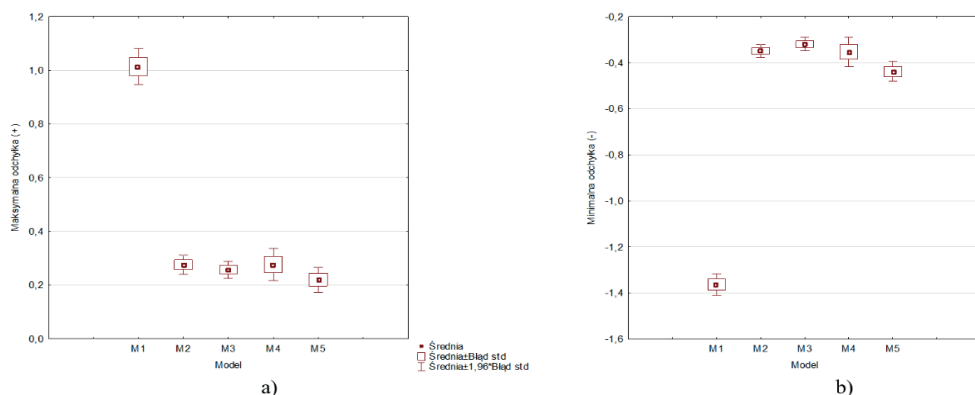
¹⁸ GOM Inspect. <https://www.gom.com> [dostęp: 2.06.2025]



Rysunek 6. Przykładowe mapy odchyłek wymiarów modeli nasion fasoli

Źródło: opracowanie własne

Rozkład maksymalnej odchyłki (+) wymiarów i minimalnej odchyłki (-) wymiarów dla badanych modeli geometrycznych nasion fasoli w porównaniu do modelu numerycznego przedstawiono na rysunku 7a i 7b.



Rysunek 7. Parametry rozkładu normalnego: a) – maksymalnej odchyłki (+) wymiarów, b) – minimalnej odchyłki (-) wymiarów

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4. Wyniki obliczeń weryfikacji istotności różnic między średnimi wartościami maksymalnych dodatnich odchyłek (+) modeli geometrycznych nasion fasoli

Maksymalna odchyłka (+) (Kruskala-Wallis test), $H(4, N=150)=75,42783$; $p=0,000$				
Prawdopodobieństwa porównań wielokrotnych				
Metoda pomiaru	N ważnych	Suma Rang	Średnia Ranga	Średnia
<i>M1</i>	30	4064,00	135,46	1,01 ^b
<i>M2</i>	30	2042,00	68,06	0,27 ^a
<i>M3</i>	30	1871,50	62,38	0,25 ^a
<i>M4</i>	30	1924,50	64,15	0,27 ^a
<i>M5</i>	30	1423,00	47,43	0,22 ^a

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b ($p \leq 0,05$)

Tabela 5. Wyniki obliczeń weryfikacji istotności różnic między średnimi wartościami minimalnych ujemnych odchyłek (-) modeli geometrycznych nasion fasoli

Minimalna odchyłka (-) (Kruskala-Wallis test), $H(4, N=150)=84,84473$; $p=0,000$				
Prawdopodobieństwa porównań wielokrotnych				
Metoda pomiaru	N ważnych	Suma Rang	Średnia Ranga	Średnia
<i>M1</i>	30	465,00	15,50	-1,36 ^b
<i>M2</i>	30	2815,50	93,85	-0,34 ^a
<i>M3</i>	30	3150,50	105,01	-0,31 ^a
<i>M4</i>	30	2898,50	96,61	-0,35 ^a
<i>M5</i>	30	1995,50	66,51	-0,43 ^c

Wartości w kolumnach z takimi samymi literami nie różnią się istotnie; a, b, c ($P \leq 0,05$)

Podsumowanie i wnioski

Budowanie modeli geometrycznych nasion fasoli za pomocą skanowania 3D, modeli z wykorzystaniem podstawowych brył geometrycznych oraz modeli budowanych w oparciu o rysunki 2D (program Monster Mash) pozwoliło na porównanie wybranych parametrów geometrycznych. Porównano takie parametry jak pole powierzchni, objętość oraz wymiary. Zastosowanie wyżej wymienionego oprogramowania oraz metody skanowania 3D pozwalają na budowanie bardziej zaawansowanych modeli surowców naturalnych. Na podstawie uzyskanych wyników w pracy można wysnuć następujące wnioski:

- Najlepiej dopasowanymi modelami geometrycznymi nasion fasoli, biorąc pod uwagę pole powierzchni są modele, dla których błąd względny pomiaru nie przekroczył 5%. Do modeli spełniających ten warunek należą modele M1, M2, M3 i M4. Błąd względny pomiaru pola powierzchni nasion fasoli przy zastosowaniu modelu M5 był większy od wyżej przedstawionych i wynosił ponad 8%.
- Do najlepiej dopasowanych modeli geometrycznych nasion fasoli biorąc pod uwagę ich objętość można zaliczyć modele M2, M3 i M5. Błąd względny pomiaru objętości dla wyżej wymienionych modeli nie przekraczał 2%. Błąd względny pomiaru objętości nasion fasoli przy zastosowaniu modelu M4 był większy i wynosił ponad 5%.
- Najmniejszą średnią maksymalną odchyłkę (+) wymiarów modeli geometrycznych nasion fasoli zaobserwowano dla modelu M5. Odchyłka ta różniła się od wymiarów rzeczywistych o około 0,2%. Najmniejszą średnią minimalną odchyłkę (-) wymiarów modeli nasion fasoli zaobserwowano dla modelu M3. Odchyłka ta różniła się od wymiarów rzeczywistych o około 0,3%.

Przestrzenne modele geometryczne zbudowane za pomocą przedstawionych w pracy metod pozwalają na wyznaczenie parametrów geometrycznych dla całych nasion fasoli, jak i ich wybranych fragmentów. Uzyskane modele szczególnie przydają się do wyznaczenia pola powierzchni, objętości, wymiarów geometrycznych i porównywania tych parametrów z innymi modelami geometrycznymi. Modele 3D nasion znajdują zastosowanie w logistyce w rolnictwie i przetwórstwie rolno-spożywczym, gdzie umożliwiają dokładne planowanie procesów magazynowania i transportu. Dzięki precyzyjnej analizie kształtu i objętości nasion możliwe jest optymalizowanie przestrzeni ładunkowej, projektowanie pojemników transportowych oraz prognozowanie zachowania nasion w trakcie przemieszczania w silosach i pojazdach transportowych. Modele te mogą również być wykorzystane w systemach automatycznego sortowania i pakowania. Wyniki niniejszych badań można zastosować do projektowania systemów sortowania opartych na dokładnych modelach 3D nasion.

Bibliografia

- Anders A., Markowski P., Kaliniewicz Z.: Numerical modelling of agricultural products on the example of bean and yellow lupine seeds. *International Agrophysics*, 29(4), s. 397–403, 2015
- Balcerzak K., Weres J., Górna K., Idziaszek P., Modeling of agri-food products on the basis of solid geometry with examples in Autodesk 3ds Max and finite element mesh generation. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 60(2), s. 5–8, 2015
- Binelo M.O., de Lima R.F., Khatchatourian O.A., Stransky J., Modelling of the drag force of agricultural seeds applied to the discrete element method. *Biosystems Engineering*, 178, s. 168–175, 2019
- Boryga M., Kołodziej P., Reverse engineering in modeling agricultural products. *Agricultural Engineering*, 26(1), s. 105–117, 2022
- Bronsztejn I.N., Siemiendajew K.A., Musiol G., Muhling H., Nowoczesne kompendium matematyki. PWN, Warszawa, 2009
- Dongxu Y. i in., A general modelling method for soybean seeds based on the discrete element method. *Powder Technology*, 372, s. 212–226, 2020
- Entem E. i in., Modeling 3D animals from a side-view sketch. *Computers & Graphics*, 46, s. 221–230, 2015
- FreeCAD: Version 0.20.2. <https://www.freecadweb.org> [dostęp: 2.06.2025]
- GOM Inspect. <https://www.gom.com> [dostęp: 2.06.2025]
- Goni S.M., Purlis E., Salvadori V.O., Geometry modeling of food materials from magnetic resonance imaging. *Journal of Food Engineering*, 88, s. 561–567, 2008
- Igarashi T. i in.: Teddy, A sketching interface for 3D freeform design. *Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH '99)*, s. 409–416, 1999
- Jian X. i in.: Discrete element modeling and simulation of soybean seed using multi-spheres and super-ellipsoids. *IEEE Access*, 8, s. 222672–222683, 2020
- Long Z. i in., Study on key issues in the modelling of maize seeds based on the multi-sphere method. *Powder Technology*, 394, s. 791–812, 2021
- Ma J. i in., Real-time skeletonization for sketch-based modeling. *Computers & Graphics*, 102, s. 56–66, 2022
- MeshLab Visual Computing Lab – ISTI – CNR. <http://meshlab.sourceforge.net> [dostęp: 2.06.2025]
- NextEngine: NextEngine User Manual. <http://www.nextengine.com> [dostęp: 2.06.2025]
- Pasha M. i in., Effect of particle shape on flow in discrete element method simulation of a rotary batch seed coater. *Powder Technology*, 296, s. 29–36, 2016
- Rahmi U., Ferruh E., Potential use of 3-dimensional scanners for food process modeling. *Journal of Food Engineering*, 93, s. 337–343, 2009
- Shuai W. i in., Study on the modeling method of sunflower seed particles based on the discrete element method. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, s. 1–16, 2022
- Wiącek J. i in., Experimental analysis of wheat-wall friction and grain flow in a steel silo with corrugated walls. *Biosystems Engineering*, 209, s. 216–231, 2021
- Xiaolong L., Yitao L., Qingxi L., Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat. *Computers and Electronics in Agriculture*, 131, s. 29–39, 2016
- Zubko V. i in., Modelling wheat grain flow during sowing based on the model of grain with shifted center of gravity. *Agricultural Engineering*, 26(1), s. 25–37, 2022

Adres do korespondencji: andrzej.anders@uwm.edu.pl

ORCID: Andrzej Anders 0000-0001-6950-4141

ORCID: Dariusz J. Choszcz 0000-0002-3119-9038

ORCID: Piotr Markowski 0000-0002-4390-788X

OPTIMALIZACJA SPRZĘGŁA NAPĘDU ŚLIMAKA KORKUJĄCEGO W ASPEKCIE INŻYNIERII PRODUKCJI

Grzegorz Dzieniszewski^{1,2}, Wiktoria Sasiela¹, Jakub Babuła¹

¹ Instytut Nauk Technicznych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

² Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Politechnika Rzeszowska

Wstęp

W układach przeniesienia napędu maszyn kluczową rolę pełnią sprzęgła jako łącznik wałów napędowych maszyn a także bezpieczne przenoszenie momentu obrotowego¹. Ich rola jest szczególnie ważna w przypadku maszyn działających w trybie ciągłym, na przykład linii produkcyjnych, gdzie niezawodność i żywotność są decydujące².

Sprzęgło zębate to uniwersalne sprzęgło samonastawne zezwalające na przemieszczenie osiowe promieniowe i kątowe. Składa się ono z tulei z uzębieniem zewnętrznym, mocowanej najczęściej na wpust oraz kołnierзовego łącznika mocowanego na owym członie posiadającego zęby umieszczone wewnątrz. Zęby zaprojektowane są do pracy z pewnym luzem, a ich specjalny profil jest przystosowany do kompensacji błędów osiowości. Powierzchnie robocze zębów hartuje się powierzchniowo, z zasady wyższa twardość jest zalecana dla zębów zewnętrznych³. Wyróżnia się sprzęgła pojedyncze i podwójne. W pojedynczym występuje tylko jeden człon zębaty, drugi natomiast jest typowym członem kołnierзовym, w typie podwójnym oba półsprzęgła są wykonane zgodnie z powyższym opisem⁴.

Sprzęgło oponowe to typ sprzęgła elastycznego z oponą z kauczuku lub neoprenu jako elementem łączącym piasty na wałach, zdolne do kompensacji dużych odchyłek rozosiowań zarówno kątowych, jak i promieniowych, łagodzi również drgania i wstrząsy⁵. Zawiera ono w sobie szereg cech i charakterystyk, przez które może być uważane za idealne rozwiązanie.

¹ Markusik S., Opasiak T., Filipowicz K.: Budowa i charakterystyki dynamiczne sprzęgła metalowego o wysokiej podatności skrętniej, Zeszyty Naukowe. Transport, 2006

² Zwolak J., Kozik D. Kruczek B.: Badania procesów zachodzących w sprzęgłach stosowanych w przekładniach zębatych power shift podczas sprzężenia ciernego, Stalowa Wola, 2015

³ Fundowicz P., Radzimiński M., Wieczorek M.: Konstrukcja pojazdów samochodowych, WSPiP, Warszawa, 2010

⁴ Osiński Z.: Sprzęgła i hamulce, Warszawa, 1996

⁵ Opasiak T.: Badania podstawowych parametrów sprzęgieł podatnych, Postępy nauki i techniki, 2012

Należą do nich: brak luzu powodujący stabilne działanie napędu, ułatwiony montaż i demontaż elastycznego łącznika bez konieczności przemieszczania układu⁶. Do wad tego rozwiązania zaliczyć należy jednak dość niskie przenoszone momenty obrotowe, brak odporności na oleje, smary i inne pochodne ropy naftowej, oraz wąski zakres temperaturowy pracy⁷. Rysunek 1 obrazuje elastyczny łącznik sprzęgła oponowego.



Rysunek 1. Elastyczny łącznik sprzęgła oponowego

Źródło: opracowanie własne

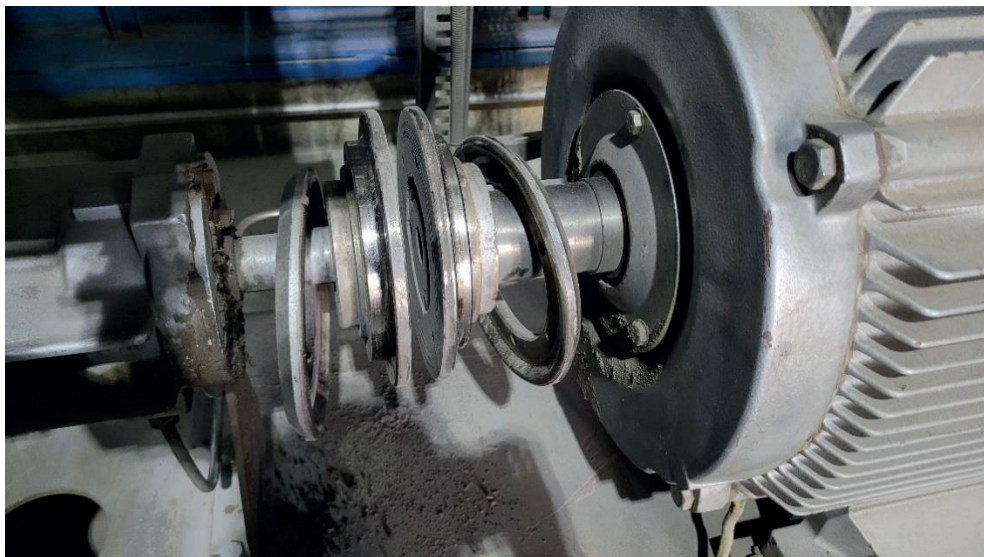
Na rysunku 2 przedstawiono piasty sprzęgła oponowego przed montażem elastycznego łącznika.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają sprzęgło łubkowe. Jest to sztywne sprzęgło przekazujące moment obrotowy bez luzu i kompensacji odchyłek. Zbudowane jest z tak zwanych łubek, czyli połówek dzielonych w sposób równoległy do osi wałów⁸. Niewątpliwą zaletą tego rozwiązania jest łatwy montaż i demontaż do którego nie trzeba rozsuwać czy luzować części maszyn, jak to ma miejsce w sprzęgłach montowanych osiowo.

⁶ Markusik S., Opasiak T.: Badania charakterystyk statycznych i dynamicznych nierozłącznych sprzęgieł podatnych oponowych, Zeszyty Naukowe. Transport, 2004

⁷ Sprzęgło FLEX - katalog PL, <https://radius-radpol.pl/produkt/sprzegla-oponowe-flex/>, 2025

⁸ Pilch Z., Kowol P., Kielan P.: Wielotarczowe sprzęgło magnetoreologiczne o płynnej regulowanej wartości przenoszonego momentu, Politechnika Śląska, 2011



Rysunek 2. Piasty sprzęgła oponowego przed montażem elastycznego łącznika

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 3. Sprzęgło łożkowe

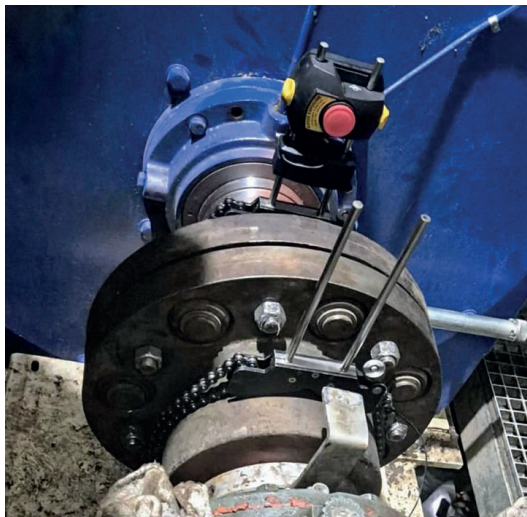
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 4. Sprzęgło łukkowe

Źródło: opracowanie własne

Innym rodzajem sprzęgła jest sprzęgło elastyczne palcowe (przedstawione na rysunku 5). Jest to rodzaj sprzęgieł podatnych w którym rolę elementu elastycznego pełnią tuleje mocowane na palcach jednej z piast, druga piasta natomiast posiada otwory w które trafiają palce⁹. Do zalet tego rozwiązania należą: tłumienie drgań, kompensacja stosunkowo wysokich odchylek oraz izolowanie strony napędzanej i napędzającej¹⁰.



Rysunek 5. Przygotowanie do osiowania sprzęgła podatnego palcowego

Źródło: opracowanie własne

⁹ Garbacz T.: Sprzęgło hydrokinetyczne, Agromechanika. Technika w Gospodarstwie, 2006

¹⁰ Dane techniczne firmy Technical na temat sprzęgieł palcowych elastycznych, <https://www.technical.pl/oferta/sprzegla-przemyslowe-sprzegla-maszynowe/sprzegla-elastyczne-palcowe> [28.04.2025]

Awaria sprzęgła ślimaka

Awaria, do której doszło 20.09.2024 objawiła się brakiem przekazania napędu przez sprzęgło zębate pomiędzy łożyskowaniem a przekładnią. Sprzęgło to stanowi element linii technologicznej w zakładzie produkującym płyty pilśniowe średniej gęstości (MDF), a jego uszkodzenie spowodowało zakłócenia w ciągłości procesu technologicznego¹¹.

W pierwszej kolejności dokonano demontażu sprzęgła, po uprzednim zdjęciu przekładni walcowej (było to konieczne z uwagi na osiowy sposób montażu piast). Po demontażu okazało się, że winne braku transmisji jest wyrobienie zębów na jednym z półsprzęgieł. Zniszczeniu uległy zarówno zęby wewnętrzne jak i zewnętrzne. Okazało się, że nie ma dostępnych na magazynie części zamiennych w odpowiedniej ilości dla elementów możliwych do zamiany - problemem był brak członu łączącego z uzębieniem wewnętrznym.

Po analizie, zęby wewnętrzne zdemontowanej tulei w miejscu do tego czasu niewspółpracującym z piastą można było uznać za nieuszkodzone. W tej sytuacji w obliczu zagrożenia ruchu całego ciągu została podjęta decyzja o ekspresowym dostosowaniu dostępnych części do tymczasowej aplikacji. Obrano za cel wstawienie pierścienia dystansowego na wysokości zębów zużytych oraz stoczeniu dystansu od strony połączenia z drugim półsprzęgłem. Rysunek 6 przedstawia zniszczone zęby piasty sprzęgła zębatego oraz porównanie do nieuszkodzonych.

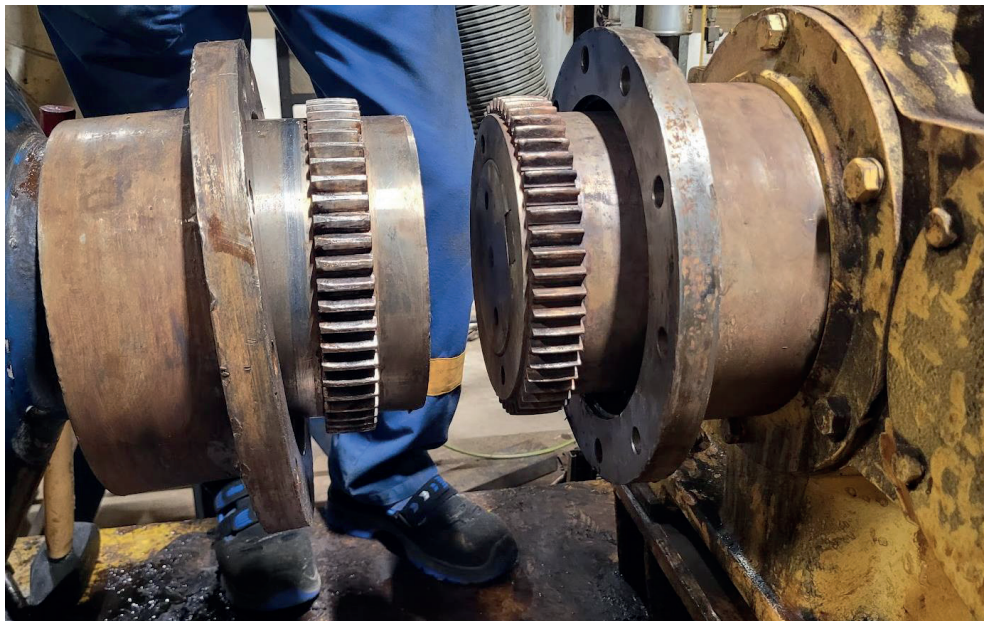


Rysunek 6. Zniszczone zęby piasty sprzęgła zębatego w porównaniu do nieuszkodzonych

Źródło: opracowanie własne

¹¹ Wilkowski J., Borysiuk P., Gorski J., Laszewicz K., Szymanowski K., Auriga R.: Wybrane aspekty jakości obróbki skrawaniem płyt MDF, Biuletyn Informacyjny Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Przemysłu Płyt Drewnopochodnych w Czarnej Wodzie, 2014

Rysunek 7 obrazuje sprzęgło zębate przed założeniem. Widoczne są niesymetryczne odległości między czołami wałów, a czołami wieńców zębatych na tulejach.



Rysunek 7. Sprzęgło zębate przed złożeniem z widocznymi niesymetrycznymi odległościami między czołami wałów, a czołami wieńców zębatych na tulejach

Źródło: opracowanie własne

W kolejnym kroku dokonano obliczenia ślimaka korygującego. Obliczono: moment obrotowy silnika przed przekładnią, obroty silnika za przekładnią oraz moment obrotowy za przekładnią. Następnie na podstawie współczynnika pracy dobrano sprzęgło z katalogów.

Porównanie dobranych rozwiązań

Pierwszym zaproponowanym rozwiązaniem jest elastyczne bezobsługowe sprzęgło palcowe: REVOLEX® KX-D 215 materiał stal $\phi 150$ $\phi 150$. Jego charakterystyka to:

- zdolne do kompensacji osiowej, kątowej i promieniowej,
- tłumiące drgania skrętne,
- izolujące elektrycznie,
- bezobsługowe.

Rysunek 8 przedstawia zaproponowane sprzęgło.



Rysunek 8. Sprzęgło REVOLUX® KX-D. Materiał stal

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Rysunek 9 to tabela przedstawiająca wymiary i parametry obsługowe sprzęgła KTR REVOLUX.

REVOLUX [®] wykonanie KX-D													
rozmiar	moment obr. ¹⁾ [Nm]		maks. prędkość ²⁾ [obr./min.]	średnica otworu (min. - maks.)	wymiary [mm]							moment bezładności ³⁾ [kgm ²]	masa ³⁾ [kg]
	T _{KN}	T _{K maks.}			d ₁ , d ₂	L	I ₁ , I ₂	E	D _H	D ₁ , D ₂	N ₁ , N ₂		
KX-D 105	9400	18800	2000	38-110	237	117	3	330	180	56	76	0,907	68
KX-D 120	15200	30400	1800	45-125	270	132	6	370	206	76	100	1,867	108
KX-D 135	20000	40000	1600	75-140	300	147	6	419	230	76	100	3,144	145
KX-D 150	25000	50000	1450	85-160	336	165	6	457	256	76	100	4,573	180
KX-D 170	41000	82000	1250	95-180	382	188	6	533	292	92	130	10,259	291
KX-D 190	54000	108000	1100	110-205	428	211	6	597	330	92	130	16,601	385
KX-D 215	67500	135000	1000	125-230	480	237	6	660	368	92	130	25,495	498
KX-D 240	98000	196000	900	140-250	534	264	6	737	407	122	170	50,147	760
KX-D 265	134000	268000	800	160-285	590	292	6	826	457	122	170	80,796	997
KX-D 280	170000	340000	720	180-315	628	311	6	927	508	122	170	129,979	1301
KX-D 305	205000	410000	675	180-330	654	324	6	991	533	122	170	170,016	1509
KX-D 330	265000	530000	625	200-355	666	330	6	1067	572	122	170	227,451	1755
KX-D 355	350000	700000	575	225-380	721	356	9	1156	610	164	220	415,259	2263
KX-D 370	430000	860000	535	225-450	773	382	9	1250	720	164	220	586,686	2701

Rysunek 9. Tabela wymiarów i parametrów obsługowych sprzęgła KTR REVOLUX

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Na rysunku 10 przedstawiono zestawienie kompensowanych odchyłek sprzęgła KTR REVOLUX. Charakterystyka wybranego sprzęgła to :

- maksymalna odchyłka osiowa $\Delta K_a = \pm 2,5$ mm,
- maksymalna odchyłka promieniowa ΔK_r [mm] lub maksymalna odchyłka kątowa ΔK_w [mm] dla $n = 250$ obr./min = 2,0 mm.

¹² Katalog firmy KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25

Odchyłki																							
rozmiar (KX oraz KX-D)		75	85	95	105	120	135	150	170	190	215	240	265	280	305	330	355	370	470	520	590	650	
maks. odchyłka osiowa ΔK_a [mm]		$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	$\pm 1,5$	± 2	± 2	± 2	± 2	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	± 4	± 4	± 4	± 4	± 4	± 4	± 4	
maks. odchyłka promieniowa ΔK_r [mm] lub maks. odchyłka kątowa ΔK_w [mm] dla n [obr./min.]	250 obr./min.	0,95	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,8	4,4	4,9	5,4	
	500 obr./min.	0,70	0,80	0,80	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,9	2,0	2,2	2,3	2,5	2,8	3,1	3,5	3,8	
	750 obr./min.	0,60	0,65	0,65	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,2	2,4	-	-	
	1000 obr./min.	0,50	0,55	0,55	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1	1,2	1,4	1,4	1,5	1,7	1,8	-	-	-	-	
	1500 obr./min.	0,40	0,45	0,45	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2000 obr./min.	0,35	0,40	0,40	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	3000 obr./min.	0,30	0,35	0,35	0,4	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Rysunek 10. Tabela kompensowanych odchyłek sprzęgła KTR REVOLEX

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Kolejno, zaproponowano sprzęgło zębate odporne na skręcanie: GEARex® FA 50 ϕ f150 d2 ϕ 150. Jego charakterystyka to:

- zdolne do kompensacji osiowej, kątowej i promieniowej,
- przy względnie krótkim odstępie wałów,
- maksymalna odchyłka osiowa, $\Delta K_a = \pm 1,5$ mm,
- maksymalna odchyłka promieniowa, $\Delta K_r = 1,6$ mm,
- maksymalna odchyłka kątowa, $\Delta K_w = 0,5^\circ$.

Widok sprzęgła oraz tabelę odchyłek przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rysunek 11. Sprzęgło KTR GEARex®

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Odchyłki			
rozmiar	maks. odchyłka osiowa ΔK_a [mm]	maksymalne dopuszczalne odchyłki ¹⁾	
		ΔK_r [mm]	ΔK_w [°]
10		$\pm 0,4$	
15		$\pm 0,5$	
20		$\pm 0,6$	
25	$\pm 1,0$	$\pm 0,8$	
30		$\pm 1,0$	
35		$\pm 1,0$	
40		$\pm 1,2$	
45		$\pm 1,4$	
50		$\pm 1,6$	
55	$\pm 1,5$	$\pm 1,8$	
60		$\pm 2,0$	0,5° każda piaśta
70		$\pm 2,2$	
80		$\pm 2,5$	
85		$\pm 2,8$	
90	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$	
100		$\pm 3,2$	
110		$\pm 4,4$	
120		$\pm 5,5$	
130		$\pm 5,7$	
140	$\pm 2,5$	$\pm 6,0$	
150		$\pm 6,6$	

Rysunek 12. Tabela kompensowanych odchyłek sprzęgieł KTR GEARex®

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Kolejne zaproponowane sprzęgło to POLY-NORM®-M 202 AFN $\phi f150$ d2 $\phi 150$ (skrętne elastyczne sprzęgło kłowe, ścinane w przypadku awarii). Charakterystyka sprzęgła:

- montowane poosiowo,
- zdolne do kompensacji osiowej, kątowej i promieniowej,
- tłumiące drgania skrętne,
- bezobsługowe,
- izolujące elektrycznie.

Rysunek 13 przedstawia widok dobraneo sprzęgła.



Rysunek 13. Sprzęgło POLY-NORM®-M

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Rysunek 14 to tabela wymiarów i parametrów obsługowych sprzęgieł POLY-NORM®-M.

POLY-NORM® M wykonanie AFN																													
rozmiar	moment obr. ¹⁾ [kNm]		wymiar (mm)																		śruba z łbem sześciokątnym (10.9)			śruby wg DIN EN ISO 4762			przybliżo- na masa ²⁾ (kg)		
			ogólne																										
	T _{KN}	T _{Kmaks}	d ₁ ³⁾	d ₂	L ³⁾	I ₁ ³⁾	I ₂	I ₃ ³⁾	I ₄	D _H	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	d ₃	E ³⁾	W	z	M ₁	T _{A1} [Nm]	z	M ₂	T _{A2} [Nm]				
202	100	200	350	200	425	195	215	200	218	640	500	552	530	600	360	480	300	12	150	24	M24	970	16	M16	290	430			
252	140	280	355	250	438	208	215	213	218	720	550	635	610	680	460	570	360	12	150	30	M24	970	18	M16	290	590			
302	200	400	380	300	464	203	247	209	255	770	600	682	660	730	510	625	430	13	175	20	M24	970	24	M16	290	730			
402	400	800	480	400	580	224	335	230	350	1000	760	885	860	945	650	800	530	14	250	18	M30	1950	20	M16	290	1750			
502	650	1300	650	500	654	228	407	234	360	1200	1000	1080	1050	1140	830	990	700	19	250	24	M30	1950	24	M16	290	2240			
503	950	1900	650	500	777	228	530	234	505	1200	1000	1075	1340	1140	830	990	700	19	415	24	M30	1950	24	M16	290	3090			
703	1500	3000	700	700	845	309	507	315	500	1560	1100	1395	1340	1480	1110	1280	950	19	360	20	M42	3600	28	M16	290	5150			
803	2400	4800	1000	800	1030	406	600	416	530	1800	1600	1630	1550	1720	1250	1450	110	24	390	24	M48	5450	28	M24	970	9300			
903	3300	6600	1000	900	982	406	541	412	550	2060	1400	1865	1800	1975	1500	1730	1300	25	390	24	M48	5450	32	M24	970	9800			
905	5500	11000	1000	900	1377	406	857	417	920	2060	1650	1865	1800	1975	1500	1730	1300	114	715	40	M48	5450	32	M24	970	14800			

Rysunek 14. Tabela wymiarów i parametrów obsługowych sprzęgieł POLY-NORM®-M

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Ostatnim zaproponowanym sprzęgłem jest stalowe sprzęgło płytkowe jednokardanowe (bezluzowe, zdolne do kompensacji odchyłek kątowych i osiowych): RADEX®-N 248 NN d1 φ150 d2 φ150. Rysunek 15 i 16 przedstawiają omawiane sprzęgło oraz dane dotyczące odchyłek.



Rysunek 15. Sprzęgło płytkowe KTR RADEX®-N 85 NN+

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Momenty obrotowe, odchyłki									
rozmiar	typ łącznika płytkowego (laminy)	moment obr. [Nm] ¹⁾			kątowna [°] pojed. łącznik	dopuszczalne odchyłki ²⁾			
		TKN	TK maks.	TKW		osiowa [mm]		promieniowa [mm]	
						NN	NANA 1/ NANA 2/NNZ	NANA 1	NANA 2
20	4 otwory	30	60	15	1,0	0,60	1,2	1,0	0,2
25		60	120	30	1,0	0,80	1,6	1,0	0,2
35		120	240	60	1,0	1,00	2,0	1,1	0,3
38		240	480	120	1,0	1,20	2,4	1,2	0,3
42		320	640	160	1,0	1,40	2,8	1,2	0,4
50		470	940	235	1,0	1,60	3,2	1,5	0,4
60	6 otworów	900	1800	450	1,0	1,00	2,0	1,5	0,8
70		1300	2600	650	1,0	1,10	2,2	1,8	1,0
80		1800	3600	900	1,0	1,30	2,6	2,1	1,2
85		2600	5200	1300	1,0	1,30	2,6	2,2	1,2
90		4600	9200	2300	1,0	1,00	2,0	2,2	1,1
105		5600	11200	2800	1,0	1,20	2,4	2,4	1,4
115	8 otworów	9900	19800	4950	1,0	1,40	2,8	2,5	1,5
135		13500	27000	6750	1,0	1,75	3,5	3,8	–
136		17500	35000	8750	0,7	1,85	3,7		
156		25000	50000	12500	0,7	2,10	4,2		
166		35000	70000	17500	0,7	2,25	4,5		
186		42000	84000	21000	0,7	2,40	4,8		
206	w zamówieniu należy podać wymiar E	52500	105000	26250	0,7	2,60	5,2		
246		90000	180000	45000	0,7	3,00	6,0		
286		150000	300000	75000	0,7	3,35	6,7		
336		210000	420000	105000	0,7	3,75	7,5		
138		23000	46000	11500	0,5	1,30	2,6		
158		33000	66000	16500	0,5	1,40	2,8		
168	8 otworów	45000	90000	22500	0,5	1,50	3,0		
188		56000	112000	28000	0,5	1,60	3,2		
208		70000	140000	35000	0,5	1,75	3,5		
248		120000	240000	60000	0,5	2,00	4,0		
288		200000	400000	100000	0,5	2,40	4,5		
338		280000	560000	140000	0,5	2,50	5,0		

Rysunek 16. Tabela wymiarów i parametrów obsługowych sprzęgieł RADEX®-N 248 NN

Źródło: Katalog KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25 ¹²

Podsumowanie

Otrzymane wyniki wskazują zalety oraz wady poszczególnych rodzajów sprzęgieł, mimo znacząco większych gabarytów (wynikających po części z większych momentów obrotowych wymaganych dla zastosowania sprzęgieł z łącznikami elastycznymi w podwyższonej temperaturze). Wszystkie powyższe sprzęgła z łącznikami elastycznymi nie wymagają obsługi (smarowania), co jest konieczne do prawidłowego funkcjonowania sprzęgła zębatego, poza tym kompensują znacząco większe możliwe odchyłki osiowości.

Sprzęgło GEARex® FA zębate będzie najlepszym wyborem z punktu widzenia najmniejszej masy oraz wymiarów, pomimo wymaganego okresowego smarowania oraz braku możliwości tłumienia drgań. Budowa sprzęgła RADEX®-N powoduje najlepszą sztywność skrętną oraz stosunkowo najmniejsze gabaryty spośród sprzęgieł podatnych ujętych w zestawieniu, wadą jest natomiast słabe tłumienie drgań oraz wspomniany brak kompensacji na kierunku promieniowym. Sprzęgło RADEX®-N ma także najwyższą możliwą temperaturę pracy spośród wszystkich ujętych w zestawieniu (280°C). Sprzęgło REVOLEx® KX-D najlepiej tłumie drgania oraz kompensuje luzy, pomimo największych wymiarów i masy. POLY-NORM®-M łączy w sobie największe z zestawienia kompensowane odchyłki z możliwością pracy nawet w przypadku uszkodzenia wkładek elastycznych.

Rysunek 17 przedstawia porównanie wybranych charakterystyk dobranych sprzęgieł KTR.

	T_{KN} [Nm]	T_{Kmax} [Nm]	$\varnothing_{zewn}$ [mm]	M [kg]	ΔK_a [mm]	ΔK_r [mm]	ΔK_w
REVOLEX® KX-D 215	67 500	135 000	660	559	$\pm 2,5$	2,0	2,0 mm
RADEX®-N 248 NN	90 000	180 000	500	203,1	$\pm 3,0$	-	0,7°
GEARex® FA 50	51 000	86 000	390	113,5	$\pm 1,5$	1,6	0,5°
POLY-NORM®-M 202 AFN	100 000	200 000	640	430	$\pm 3,0$	2,0	0,5°

Rysunek 17. Porównanie wybranych charakterystyk dobranych sprzęgieł KTR

Źródło: opracowanie własne

Bibliografia

- Fundowicz P., Radzimierski M., Wieczorek M.: Konstrukcja pojazdów samochodowych, WSPiP, Warszawa, 2010
- Garbacz T.: Sprzęgło hydrokinetyczne, Agromechanika. Technika w Gospodarstwie, 2006
- Markusik S., Opasiak T., Filipowicz K.: Budowa i charakterystyki dynamiczne sprzęgła metalowego o wysokiej podatności skrętnej, Zeszyty Naukowe. Transport, 2006
- Markusik S., Opasiak T.: Badania charakterystyk statycznych i dynamicznych nierozłącznych sprzęgieł podatnych oponowych, Zeszyty Naukowe. Transport, 2004
- Opasiak T.: Badania podstawowych parametrów sprzęgieł podatnych, Postępy nauki i techniki, 2012
- Osiński Z.: Sprzęgła i hamulce, Warszawa, 1996
- Pilch Z., Kowol P., Kielan P.: Wielotarczowe sprzęgło magnetoreologiczne o płynnej regulowanej wartości przenieszonego momentu, Politechnika Śląska, 2011
- Wilkowski J., Borysiuk P., Gorski J., Laszewicz K., Szymanowski K., Auriga R.: Wybrane aspekty jakości obróbki skrawaniem płyt MDF, Biuletyn Informacyjny Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Przemysłu Płyt Drewnopochodnych w Czarnej Wodzie, 2014
- Zwolak J., Kozik D., Kruczek B.: Badania procesów zachodzących w sprzęgłach stosowanych w przekładniach zębatych power shift podczas sprzężenia ciernego, Stalowa Wola, 2015
- Katalog firmy KTR Technika przeniesienia napędu 2024/25
- Sprzęgło FLEX - katalog PL, <https://radius-radpol.pl/produkt/sprzegla-oponowe-flex/>, 2025
- Dane techniczne firmy Technical na temat sprzęgieł palcowych elastycznych, <https://www.technical.pl/oferta/sprzegla-przemyslowe-sprzegla-maszynowe/sprzegla-elastyczne-palcowe>, 2025

Adres do korespondencji: g.dzieniszewski@pansp.pl

ORCID: Grzegorz Dzieniszewski 0000-0002-2712-1131

ORCID: Wiktoria Sasiela 0009-0002-2915-8314

ANALIZA PROCEDUR SERWISOWYCH W ASPEKCIE INŻYNIERYJNYM I EKONOMICZNYM

Grzegorz Dzieniszewski^{1,2}, Wiktoria Sasiela¹, Kacper Jankos¹

¹ Instytut Nauk Technicznych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

² Wydział Mechaniczno-Technologiczny, Politechnika Rzeszowska

Wstęp

Prawidłowa diagnostyka oraz naprawa pojazdów zapewniają bezpieczeństwo i wpływają na koszty eksploatacji¹. Współczesne technologie napraw pozwalają określić stan techniczny pojazdu za pomocą pomiarów diagnostycznych bez konieczności demontażu układów².

Analiza techniczno-ekonomiczna technologii napraw pojazdów ma duże znaczenie dla mechaników i właścicieli samochodów. Wydajność i koszty zastosowanych napraw mają kluczową rolę dla całkowitego kosztu użytkowania³. Usprawnione procesy napraw umożliwiają skrócenie czasu realizacji, obniżenie kosztów części zamiennych oraz poprawę wydajności pracy serwisu samochodowego⁴.

Zastosowanie nowoczesnych technologii systemu OBD II/EOBD do diagnostyki komputerowej pozwala na zmniejszenie kosztów eksploatacji oraz na wyeliminowanie niesprawnych pojazdów⁵. Warsztaty pomimo dostępu do nowoczesnych technologii nadal stosują tradycyjne metody pracy. Tradycyjne metody napraw mogą być mniej efektywne ekonomicznie i czasochłonne. Wybór technologii napraw powinien być skuteczny, opłacalny i mieć łatwy dostęp do części zamiennych⁶.

¹ Orzełowski S.: Naprawa i obsługa pojazdów samochodowych, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 2010

² Bogdański J.: Badanie hamulców w SKP – możliwości i ograniczenia, Politechnika Warszawska, 2015

³ Radomski S., Muc A., Szeleziński A.: Możliwości diagnostyki pojazdów samochodowych z wykorzystaniem oprogramowania open source, Autobusy, Radom, 2017

⁴ Gardulski J.: Metody badań amortyzatorów samochodów osobowych. Diagnostyka, Katowice, 2009

⁵ Kruczyński S., Wojs M.: Procedura badania uszkodzeń przy pomocy systemu OBD II/EOBD. Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Politechnika Warszawska, nr 2(78), 2010

⁶ Lewicki W.: Wpływ poszczególnych kategorii części zamiennych na koszty napraw eksploatacyjnych samochodów osobowych w Polsce, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Problemy Transportu i Logistyki, 2014

Istotne jest zbadanie różnych metod napraw pod kątem kosztów, trwałości i wpływu na działanie pojazdu⁷. Wykorzystanie danych uzyskanych w oparciu o funkcję niezawodności, wpływa na wydłużenie okresów eksploatacyjnych pojazdów, a dokładne określenie występowania usterek, oprócz oszczędności pozwala na planowanie koncentracji i rozlokowanie środków finansowych przeznaczonych dla pojazdu⁸.

Specyfikacja modeli pojazdów i analiza kosztów serwisowych

Metodyka pracy polega na analizie przypadków napraw pojazdów marki BMW na podstawie trzech różnych modeli w podobnych latach produkcji z uwzględnieniem technologii napraw z użyciem części zamiennych różnych klas jakościowych.

Do modeli zawartych w pracy zalicza się: BMW 3 (E90), BMW 5 (E61) oraz BMW 7 (E65).

Dane na temat kosztów części zebrano ze strony bmwstore.pl oraz katalogu firmy Inter Cars, a koszty napraw porównano na podstawie lokalnego serwisu EL CARS SERVICE oraz autoryzowanego serwisu marki BMW.

W tabeli 1 przedstawiono specyfikację pojazdu BMW 3 (E90).

Tabela 1. Specyfikacja pojazdu BMW 3 (E90)

Marka	BMW
Model	3 (E90)
Numer VIN	WBAVB11070PS47394
Moc silnika (km)	218
Rok produkcji	2007
Pojemność techniczna (ccm)	2497
Skrzynia biegów	Manualna
Paliwo	Benzyna
Rodzaj napędu	RWD

Źródło: opracowanie własne

W tabeli 2 przedstawiono koszty części oryginalnych dla BMW 3 (E90).

⁷ Wrona J., Wrona R., Wybrane zagadnienia wpływu napraw powypadkowych nadwozi na bezpieczeństwo drogowe, Eksploatacja i Niezawodność, nr 4, Lublin, 2008

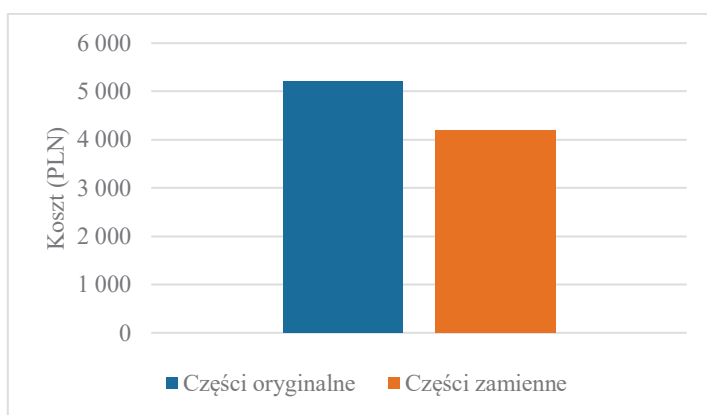
⁸ Zdziennicki Z., Maciejczyk A., Niekonwencjonalne wyznaczenie funkcji niezawodności pojazdów samochodowych, Logistyka–Nauka, nr 3, Łódź, 2011

Tabela 2. Koszty części oryginalnych BMW 3 (E90)

Nr	Nazwa części	Numer katalogowy ze- stawu	Liczba sztuk	Cena za sztukę (PLN)	Cena za komplet (PLN)
1	Kpl. wkład filtra oleju	11 42 7 953 129	1	97,53	97,53
2	Mikrofiltr z węglem aktywnym	64 31 9 313 519	1	349,30	349,30
3	Wkład filtra powietrza	13 71 7 536 006	1	187,22	187,22
4	Olej silnikowy SAE 5W-30 Longlife-04	83 21 0 398 511	1L	90,59	634,13
5	Tarcza hamulcowa, wentylowana	34 11 6 854 998	2	565,56	1131,12
6	Klocki hamulcowe, bezzabestowe	34 11 6 771 868	1	852,10	852,10
7	Kpl. części sprzęgła	21 20 7 587 368	1	1952,52	1952,52
				Razem	5203,92

Źródło: opracowanie własne na podstawie cen części dostępnych w bmwstore.pl (stan na: 4 maja 2025 r.)

Rysunek 1 przedstawia wykres porównawczy kosztów części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 3 (E90).



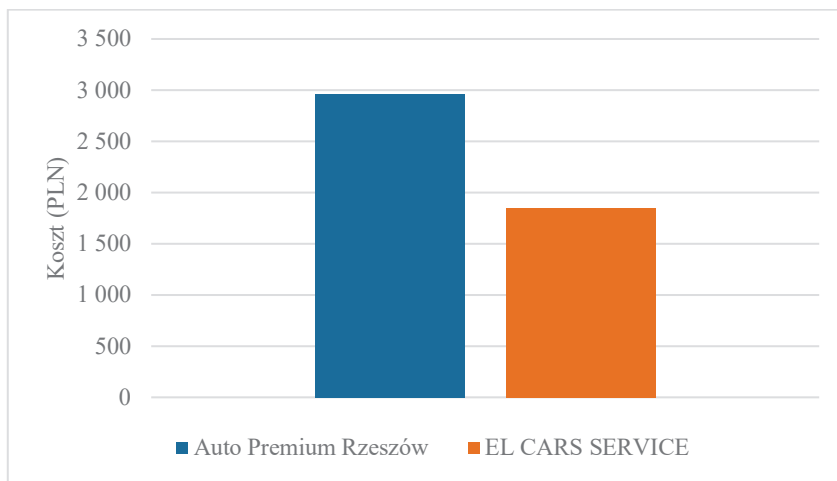
Rysunek 1. Wykres porównawczy kosztów (PLN) części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 3 (E90)

Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 1 widać niewielką różnicę pomiędzy kosztami części oryginalnych a ich zamiennikami. Różnica w cenie wynika z niższej klasy pojazdu.

W oparciu o dane na rysunku 1 można stwierdzić, że bardziej opłacalną opcją będzie zastosowanie oryginalnych części w pojeździe ze względu na lepszą klasę oraz jakość.

Rysunek 2 przedstawia wykres porównawczy kosztów serwisu dla BMW 3 (E90).



Rysunek 2. Wykres porównawczy kosztów (PLN) serwisu dla BMW 3 (E90)

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie rysunku 2 można zauważyć wyższą cenę kosztów w autoryzowanym serwisie w porównaniu z lokalnym warsztatem. Różnica wynika z jakości usług oraz z otrzymanej gwarancji na przeprowadzone prace.

Kolejnym analizowanym pojazdem jest BMW 5 (E61) 535d. Jest to luksusowe kombi (Touring) produkowane w latach 2004-2010. Wersja 535d napędzana silnikiem 6-cylindrowym 3.0 R6 BiTurbo Diesel o mocy 272 KM. Model został wyprodukowany w 2005 roku z silnikiem o oznaczeniu M57D30, charakteryzujący się mocą 272 KM.

W tabeli 3 przedstawiono specyfikację omawianego pojazdu.

Tabela 3. Specyfikacja pojazdu BMW 5 (E61)

Marka	BMW
Model	5 (E61)
Numer VIN	WBAJ91030CR68644
Moc silnika (km)	272
Rok produkcji	2005
Pojemność techniczna (ccm)	2993
Skrzynia biegów	Automatyczna
Paliwo	Olej napędowy
Rodzaj napędu	RWD

Źródło: opracowanie własne

Tabela 4 przedstawia koszty części oryginalnych dla BMW 5 (E61).

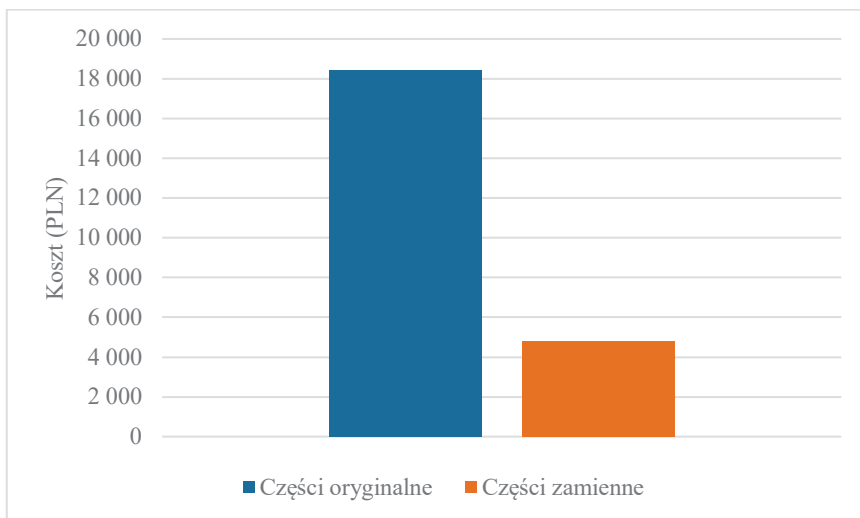
Tabela 4. Koszty części oryginalnych BMW 5 (E61)

Nr	Nazwa części	Numer katalogowy ze- stawu	Liczba sztuk	Cena za sztukę (PLN)	Cena za komplet (PLN)
1	Kpl. wkład filtra oleju	11 42 8 513 377	1	107,77	107,77
2	Mikrofiltr z węglem aktywnym	64 31 9 171 858	1	355,12	355,12
3	Wkład filtra powietrza	13 71 7 793 647	1	319,37	319,37
4	Wkład filtra paliwa	13 32 7 811 227	1	274,75	274,75
5	Olej silnikowy SAE 5W-30 Longlife-04	83 21 0 398 511	7 x 1L	90,59	815,31
6	Tarcza hamulcowa o konstrukcji lekkiej, wentylowana	34 11 6 779 467	2	1419,39	2838,78
7	Klocki hamulcowe, bezazbestowe	34 11 6 774 258	1	1855,36	1855,36
8	Przekładnia hydrokinetyczna	24 40 7 557 757	1	11863,78	11863,78
				Razem	18430,24

Źródło: opracowanie własne na podstawie cen części dostępnych w bmwstore.pl (stan na: 4 maja 2025 r.)

Rysunek 3 przedstawia wykres porównawczy kosztów części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 5 (E61).

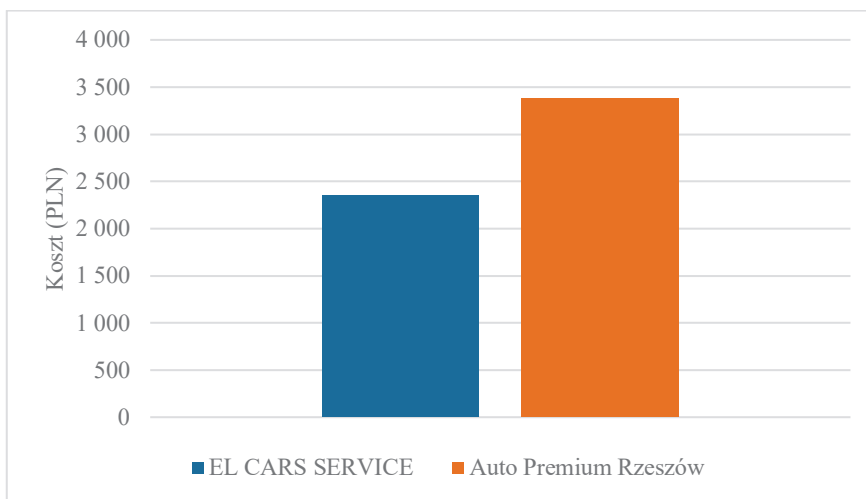
Na podstawie rysunku 3, można zauważyć znaczną różnicę pomiędzy kosztami części. Różnica wynika z zastosowania oryginalnych części, które są lepiej wykonane jakościowo pod nadzorem producenta. Części zamienne spełniające te same normy są znacząco tańsze poprzez użycie tańszych materiałów o niższej jakości.



Rysunek 3. Wykres porównawczy kosztów (PLN) części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 5 (E61)

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 4 przedstawia wykres porównawczy kosztów serwisu dla BMW 5 (E61).



Rysunek 4. Wykres porównawczy kosztów (PLN) serwisu dla BMW 5 (E61)

Źródło: opracowanie własne

Według wyników przedstawionych na rysunku 4 należy rozważyć naprawę pojazdu w Auto Premium Rzeszów ze względu na niewielką różnicę w cenie i lepsze świadczenie usług.

Ostatnim analizowanym pojazdem jest BMW Serii 7 (E65). To luksusowa limuzyna klasy wyższej produkowana w latach 2001–2008. Wersja 750i jest napędzana silnikiem 8-cylindrowym o mocy 367 KM z silnikiem o oznaczeniu N62B48. Przedstawiony egzemplarz został wyprodukowany w 2006 roku.

Tabela 5 przedstawia specyfikację pojazdu BMW 7 (E65).

Tabela 5. Specyfikacja pojazdu BMW 7 (E65)

Marka	BMW
Model	7 (E65)
Numer VIN	WBAHL81080DH78028
Moc silnika (km)	367
Rok produkcji	2006
Pojemność techniczna (ccm)	4799
Skrzynia biegów	Automatyczna
Paliwo	Benzyna
Rodzaj napędu	RWD

Źródło: opracowanie własne

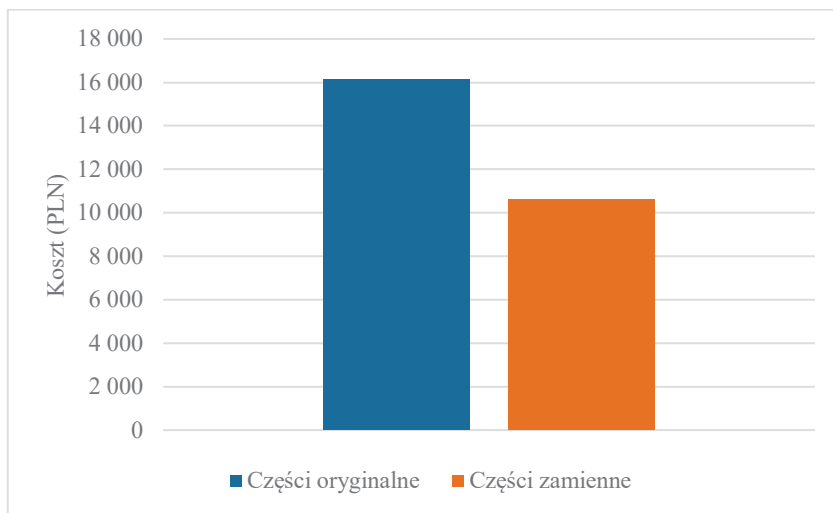
Tabela 6 przedstawia koszty części oryginalnych dla BMW 7 (E65).

Tabela 6. Koszty części oryginalnych BMW 7 (E65)

Nr	Nazwa części	Numer katalogowy zestawu	Liczba sztuk	Cena za sztukę (PLN)	Cena za komplet (PLN)
1	Kpl. wkład filtra oleju	11 42 7 542 021	1	117,04	117,04
2	Zestaw mikrofiltrów z węglem aktywnym	64 11 9 272 643	1	431,48	431,48
3	Wkład filtra powietrza	13 71 7 526 008	1	205,96	205,96
4	Olej silnikowy SAE 5W-30 Longlife-04	83 21 0 398 511	1L x 8	90,59	724,72
5	Tarcza hamulcowa, wentylowana	34 11 6 864 904	2	1397,35	2794,7
6	Klocki hamulcowe, bezazbestowe	34 11 6 770 575	1	1320,76	1320,76
7	Przekładnia hydrokinetyczna	24 40 7 585 834	1	10551,14	10551,14
				Razem	16145,8

Źródło: opracowanie własne na podstawie cen części dostępnych w bmwstore.pl (stan na: 4 maja 2025 r.)

Rysunek 5 przedstawia wykres porównawczy kosztów części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 7 (E65).

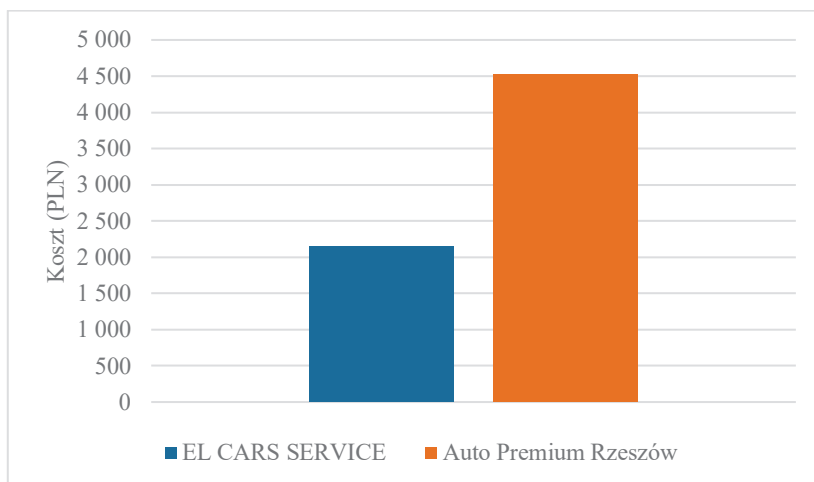


Rysunek 5. Wykres porównawczy kosztów (PLN) części oryginalnych z ich zamiennikami dla BMW 7 (E65)

Źródło: opracowanie własne

Ze względu na dużą różnicę w cenie klient powinien rozważyć, która opcja będzie dla niego lepsza, zastosowanie droższych oryginalnych części, które posłużą dłużej czy tańsze bardziej opłacalne (wynika to z wyników na rysunku 5).

Rysunek 6 przedstawia wykres porównawczy kosztów serwisu dla BMW 7 (E65).



Rysunek 6. Wykres porównawczy kosztów (PLN) serwisu dla BMW 7 (E65)

Źródło: opracowanie własne

Ze względu na znaczną różnicę w cenie (co pokazuje rysunek 6) - klient powinien rozważyć, która opcja będzie dla niego lepsza i bardziej opłacalna pod względem jakości przeprowadzonych usług.

Analiza wyników i wnioski

Analiza porównawcza kosztów napraw pozwala zobrazować jaka różnica występuje pomiędzy serwisem BMW a lokalnym warsztatem.

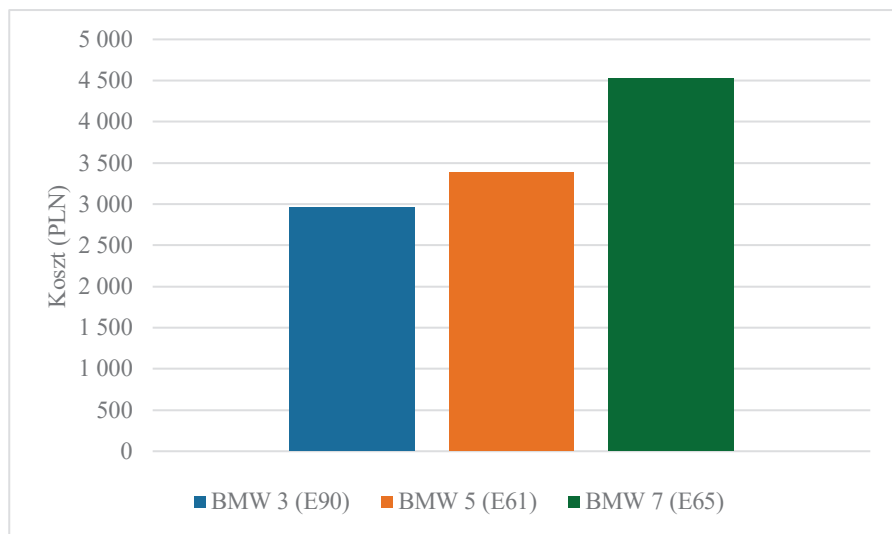
Tabela 7 przedstawia analizę porównawczą kosztów napraw.

Tabela 7. Analiza porównawcza kosztów napraw

Model	AUTO PREMIUM RZESZÓW	EL CARS SERVICE
BMW 3 (E90)	2964	1850
BMW 5 (E61)	3379,99	2350
BMW 7 (E65)	4524	2150

Źródło: opracowanie własne

Rysunek 7 przedstawia analizę porównawczą kosztów napraw w autoryzowanym serwisie dla trzech pojazdów marki BMW.



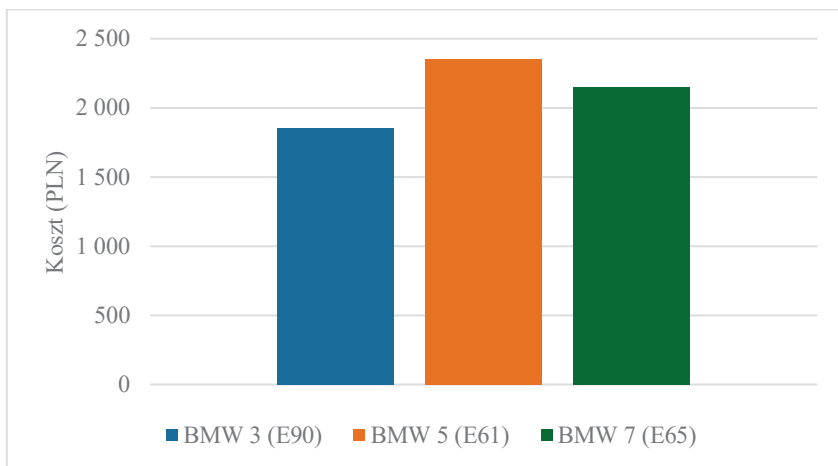
Rysunek 7. Analiza porównawcza kosztów (PLN) napraw w autoryzowanym serwisie dla trzech pojazdów marki BMW

Źródło: opracowanie własne

Z przeprowadzonej analizy, wynika, że:

- BMW 3 (E90) – najtańszy koszt serwisu ze względu na najmniej skomplikowaną konstrukcję pojazdu,
- BMW 5 (E61) – koszt serwisu wynika z posiadania silnika diesla na dwóch turbinach ze sprzęgłem automatycznym wpływającym na wzrost kosztów serwisu,
- BMW 7 (E65) – najwyższy koszt serwisu wynika z posiadania silnika V8 z automatyczną skrzynią biegów.

Rysunek 8 przedstawia analizę porównawczą kosztów napraw w lokalnym warsztacie dla trzech pojazdów marki BMW.



Rysunek 8. Analiza porównawcza kosztów napraw (PLN) w lokalnym warsztacie dla trzech pojazdów marki BMW

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie rysunku 8 można wysunąć następujące wnioski:

- BMW 3 (E90) – najniższy koszt serwisu, korzystanie z lokalnego warsztatu jest tańsze w tym przypadku o 1114 PLN w porównaniu z ASO,
- BMW 5 (E61) – najwyższy koszt serwisu w lokalnym warsztacie ze względu na skomplikowaną konstrukcję pojazdu, tańszy o 1029,99 PLN w porównaniu z ASO,
- BMW 7 (E65) – wysoki koszt serwisu, tańszy o 2374 PLN od serwisu autoryzowanym serwisem.

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że koszty napraw w autoryzowanym serwisie są średnio dwukrotnie wyższe w porównaniu z lokalnym warsztatem.

Różnica w kosztach wynika z wysokiej jakości świadczonych usług w autoryzowanym warsztacie, dostępie do wysokiej jakości systemów dedykowanych do konkretnej marki oraz udzielanej gwarancji na przeprowadzone prace. Autoryzowany warsztat czasem wykonuje w czasie naprawy dodatkowe kontrole w celu osiągnięcia jak najwyższej jakości napraw⁹.

⁹ Szada-Borzyszkowski W.: Wpływ technologii odbudowy powypadkowej karoserii samochodowej na bezpieczeństwo użytkowania pojazdu, Autobusy, nr 6, Koszalin, 2014

Serwis ASO daje dostęp do pełnej dokumentacji historii przeglądów, istotne przy sprzedaży kilkuletnich samochodów¹⁰.

Lokalny warsztat pozwala na obniżenie kosztów napraw ze względu na brak rekomendacji przez producenta oraz ogólnodostępność na rynku.

Taki warsztat to zazwyczaj mniejsza firma bez dużych inwestycji w systemy czy narzędzia. Stąd stawki przeprowadzonych napraw są znacząco niższe w porównaniu z autoryzowanym warsztatem¹¹. Korzystanie z tego typu serwisu jest korzystne w leciwych pojazdach, które nie wymagają użycia specjalistycznych narzędzi i znacząco obniżają koszty świadczonych usług co wpływa na zadowolenie klienta.

Nieautoryzowany serwis to również dobrej jakości świadczone usługi, w zależności od kompetencji mechaników w nich pracujących¹².

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Koszty serwisowania pojazdów rosną wraz z klasą i stopniem skomplikowania konstrukcji pojazdu, co szczególnie widoczne jest w modelach BMW 5 (E61) oraz BMW 7 (E65).
2. Części oryginalne charakteryzują się wyższą ceną, lecz oferują lepszą jakość i trwałość, co w dłuższej perspektywie może ograniczyć częstotliwość napraw i zwiększyć niezawodność pojazdu.
3. Zastosowanie części zamiennych jest rozwiązaniem bardziej ekonomicznym, zwłaszcza w starszych pojazdach, jednak może wiązać się z krótszą żywotnością komponentów i potencjalnie wyższymi kosztami eksploatacyjnymi w przyszłości.
4. Autoryzowane serwisy oferują najwyższy standard usług, obejmujący zaawansowaną diagnostykę, gwarancję na wykonane prace oraz pełną historię serwisową pojazdu, co jest istotne m.in. przy późniejszej odsprzedaży samochodu.
5. Lokalne warsztaty stanowią korzystną alternatywę ekonomiczną, szczególnie w przypadku pojazdów starszych lub mniej zaawansowanych technicznie, gdzie brak konieczności stosowania specjalistycznych narzędzi producenta pozwala znacząco obniżyć koszty napraw.
6. Wybór technologii naprawy oraz rodzaju serwisu powinien być uzależniony od wieku pojazdu, jego klasy, stanu technicznego oraz oczekiwań właściciela, zarówno pod względem kosztów, jak i jakości wykonanych usług.

¹⁰ Foltynowicz L., Ślaski G., Kupiec J.: Układy przeciwblokujące a diagnostyka układów hamulcowych, Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, 2001

¹¹ Wierzbicki S.: Procedury diagnozowania pojazdów samochodowych zgodnych z normą OBD II. Diagnostyka'28 – Artykuły Głównie, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 2003

¹² Mozga Ł., Stoeck T.: Zagadnienia ochrony środowiska we współczesnych serwisach samochodowych, Autobusy, nr 6, Szczecin, 2018

Bibliografia

- Bogdański J.: Badanie hamulców w SKP – możliwości i ograniczenia, Politechnika Warszawska, 2015
- Foltynowicz L., Ślaski G., Kupiec J.: Układy przeciwblokujące a diagnostyka układów hamulcowych, Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, 2001
- Gardulski J.: Metody badań amortyzatorów samochodów osobowych, Diagnostyka, 3(51)/2009, Katowice, 2009
- Kruczyński S., Wojs M.: Procedura badania uszkodzeń przy pomocy systemu OBD II/EOBD, Zeszyty Naukowe Instytutu Pojazdów, Politechnika Warszawska, nr 2(78), 2010
- Lewicki W.: Wpływ poszczególnych kategorii części zamiennych na koszty napraw eksploatacyjnych samochodów osobowych w Polsce, Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Problemy Transportu i Logistyki, 2014
- Mozga Ł., Stoeck T.: Zagadnienia ochrony środowiska we współczesnych serwisach samochodowych, Autobusy, nr 6, Szczecin, 2018
- Orzełowski S.: Naprawa i obsługa pojazdów samochodowych, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa, 2010
- Radomski S., Muc A., Szeleziński A.: Możliwości diagnostyki pojazdów samochodowych z wykorzystaniem oprogramowania open source, Autobusy, Radom, 2017
- Szada-Borzyszkowski W.: Wpływ technologii odbudowy powypadkowej karoserii samochodowej na bezpieczeństwo użytkowania pojazdu, Autobusy, nr 6, Koszalin, 2014
- Wierzbiński S.: Procedury diagnozowania pojazdów samochodowych zgodnych z normą OBD II. Diagnostyka'28, Artykuły Główne, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, 2003
- Wrona J., Wrona R.: Wybrane zagadnienia wpływu napraw powypadkowych nadwozi na bezpieczeństwo drogowe, Eksploatacja i Niezawodność, nr 4, Lublin, 2008
- Wróblewski P.: Naprawa podzespołów i zespołów pojazdów samochodowych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2017
- Zdziennicki Z., Maciejczyk A.: Niekonwencjonalne wyznaczenie funkcji niezawodności pojazdów samochodowych, Logistyka–Nauka, nr 3, Łódź, 2011

Adres do korespondencji: g.dzieniszewski@pansp.pl

ORCID: Grzegorz Dzieniszewski 0000-0002-2712-1131

ORCID: Wiktoria Sasiela 0009-0002-2915-8314

UJĘCIE TRACEABILITY PRÓB PRODUKCYJNYCH W SYSTEMACH KLASY ERP

Julia Giera¹, Dariusz Masłowski¹, Małgorzata Dendera-Gruszka¹

¹ Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska

Wprowadzenie

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne funkcjonują w warunkach rosnącej konkurencyjności oraz zaostrzających się wymagań jakościowych, w których precyzyjna kontrola procesów oraz pełna identyfikowalność przepływu materiałów stanowią kluczowe elementy zapewnienia bezpieczeństwa i wiarygodności produktu. Jednym z istotnych obszarów tych działań jest identyfikowalność prób produkcyjnych (*traceability*), umożliwiająca powiązanie wyników badań laboratoryjnych z konkretną partią wyrobów przekazywaną odbiorcy końcowemu. W ujęciu operacyjnym oznacza to konieczność rejestrowania i monitorowania każdej próby w kontekście całego łańcucha procesów: od momentu wytworzenia, poprzez czynności manipulacyjne i załadunkowe, aż po przekazanie poza przedsiębiorstwo produkcyjne oraz analizę w laboratorium zewnętrznym.

W analizowanym przypadku kluczowym momentem procesu jest etap załadunku wyrobów gotowych na środek transportu zewnętrznego, podczas którego próba produkcyjna zostaje fizycznie wydzielona z partii wysyłkowej i umieszczona w wyznaczonej lokalizacji. W środowisku informatycznym etap ten może zostać w pełni odwzorowany poprzez wykorzystanie systemów klasy ERP, rejestrujących zdarzenia związane z pobraniem, przekazaniem, magazynowaniem i późniejszą analizą prób. Powiązanie prób produkcyjnych z numerem partii oraz dokumentacją systemową umożliwia automatyczne śledzenie jej historii od produkcji, poprzez wydanie z magazynu, aż po wyniki badań końcowych. Takie rozwiązanie zwiększa przejrzystość procesów, ułatwia identyfikację ewentualnych przyczyn niezgodności oraz pozwala na szybkie odtworzenie pełnej dokumentacji na potrzeby audytów, reklamacji lub certyfikacji.

Celem pracy jest przedstawienie koncepcji traceability prób produkcyjnych w strukturze systemów klasy ERP oraz ukazanie praktycznej realizacji tego procesu na przykładzie wdrożenia w środowisku SAP Business One. W pracy omówiono podstawy teoretyczne identyfikowalności, analizę funkcjonalności systemów ERP wspierających śledzenie partii i prób produkcyjnych, porównanie wybranych rozwiązań dostępnych na rynku oraz studium przypadku przedstawiające realizację kompletnego procesu rejestracji i monitorowania prób w systemie wykorzystywanym przez przedsiębiorstwa produkcyjne.

Traceability w systemach produkcyjnych

Identyfikowalność (*traceability*) stanowi kluczowy element systemów zapewnienia jakości, pozwalający na odtworzenie historii i pochodzenia produktu na każdym etapie łańcucha dostaw¹. W literaturze naukowej oraz dokumentach normalizacyjnych istnieje wiele ujęć tego pojęcia, różniących się zakresem i poziomem szczegółowości.

Możliwość śledzenia i dokumentowania historii produktów w całym łańcuchu dostaw od surowców po wyroby gotowe stanowi istotę identyfikowalności prób produkcyjnych². Koncepcja ta zyskała na znaczeniu w różnych branżach. Rosnące wymagania regulacyjne, zapotrzebowanie konsumentów na przejrzystość łańcuchów dostaw oraz potrzeba efektywności operacyjnej spowodowały, że traceability stała się nieodłącznym elementem przedsiębiorstw produkcyjnych. Systemy identyfikowalności nie tylko zapewniają zgodność z przepisami, ale także wzmacniają kontrolę jakości, dostarczając weryfikowalne informacje o pochodzeniu i sposobie postępowania z produktami.

Tabela 1. Definicja traceability wg norm

Norma	Definicja traceability
ISO 9001:2015	Traceability (<i>identyfikowalność</i>) to możliwość śledzenia historii, zastosowania lub lokalizacji obiektu, pozwalająca na odtworzenie kolejnych etapów jego wytwarzania i dystrybucji w łańcuchu dostaw.
ISO 22005	Traceability definiowana jest jako zdolność do identyfikowania pochodzenia i lokalizacji produktu lub jego składników poprzez wszystkie etapy produkcji, przetwarzania i dystrybucji, zapewniająca przejrzystość i bezpieczeństwo w łańcuchu żywnościowym.
ISO/TS 16949	Traceability oznacza możliwość odtworzenia historii wyrobu, procesu lub partii produkcyjnej w odniesieniu do materiałów, parametrów procesu, operatorów i urządzeń, w celu zapewnienia jakości i zgodności z wymaganiami klienta.
ISO 28000:2007	Traceability jako element zarządzania ryzykiem i identyfikacji przepływu ładunków.
Regattieri et al. (2007)	Traceability jako zdolność do identyfikacji położenia i historii produktu.
Alfaro et al. (2019)	Traceability jako narzędzie zapewnienia zgodności i przejrzystości w łańcuchu dostaw.
Freitas & Costa (2020)	Zrównoważone traceability z wykorzystaniem technologii cyfrowych.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: ISO 9001:2015: *Quality management systems - Requirements*. International Organization for Standardization, Geneva, 2015; ISO/TS 16949:2009: *Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001 for automotive production and relevant service part organizations*. International Auto-motive Task Force / International Organization for Standardization, 2009; ISO 28000:2007: *Specification for security management systems for the supply chain*. International Organization for Standardization, Geneva, 2007; Alfaro J. A., Rabade L. A.: *Traceability as a strategic tool to improve inventory management: A case study in the food industry*. *International Journal of Production Economics*, 118(1), s. 104–110, 2009; Bechini A., Cimino M. G. C. A., Marcelloni F., Tomasi A.: *Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business*. *Information and Software Technology*, 50(4), 342–359, 2008; Regattieri A., Gamberi M., Manzini R.: *Traceability of food products: General framework and experimental evidence*. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 347–356, 2007.

¹ Regattieri A., Gamberi M., Manzini R., Traceability of food products: General framework and experimental evidence. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 347–356, 2007

² Lv G., Song C., Xu P., Qi Z., Song H., Liu Y., Blockchain-based traceability for agricultural products: A systematic literature review. *Agriculture*, 13(9), 1757, 2023

Z biegiem czasu znaczenie identyfikowalności wykroczyło poza ramy wyłącznie zgodności z przepisami. Obecnie jest ona postrzegana jako kluczowy element doskonałości operacyjnej, umożliwiający przedsiębiorstwom zwiększenie wydajności, odporności i zrównoważonego rozwoju w łańcuchach dostaw³. Normy prawne dotyczące identyfikowalności próbek produkcyjnych w Europie obejmują kompleksowe ramy mające na celu zapewnienie transparentności, bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju w różnych sektorach, w tym w sektorze spożywczym, tekstylnym i farmaceutycznym.

Zostały one w dużej mierze ukształtowane przez proaktywne podejście Komisja Europejska (*European Commission*), którego celem jest wzrost odpowiedzialności w łańcuchach dostaw oraz zaspokojenie rosnących oczekiwań konsumentów w zakresie etycznego i przyjaznego dla środowiska pochodzenia produktów⁴.

Systemy klasy ERP jako narzędzie identyfikowalności prób produkcyjnych

Od wielu lat systemy ERP stanowią integralny element funkcjonowania przedsiębiorstw, przynosząc wymierne korzyści w postaci automatyzacji złożonych procesów logistycznych i magazynowych oraz usprawnienia zarządzania strukturą organizacyjną. Jednocześnie ich rozwój przyczynił się do wdrożenia zaawansowanych mechanizmów, umożliwiających pełną identyfikowalność przepływu materiałów, półproduktów i prób produkcyjnych w całym łańcuchu dostaw^{5,6}.

Systemy klasy Enterprise Resource Planning (ERP) odgrywają kluczową rolę we współczesnej logistyce, integrując dane, usprawniając procesy operacyjne oraz umożliwiając śledzenie przepływu informacji w czasie rzeczywistym w całym łańcuchu dostaw. System ERP to zestaw powiązanych ze sobą modułów informatycznych, które wspomagają zarządzanie przedsiębiorstwem, korzystając ze wspólnego źródła danych^{7,8}. Najnowsze osiągnięcia technologiczne, w szczególności integracja rozwiązań cyfrowych i technologii blockchain⁹, dodatkowo wzmocniły poziom identyfikowalności, transparentności oraz zgodności procesów w zarządzaniu logistycznym.

³ Zhou B., Siddik A. B., Zheng G.-W., Masukujjaman M.: Unveiling the role of green logistics management in improving SMEs' sustainability performance: Do circular economy practices and supply chain traceability matter? *Systems*, 11(4), 198, 2023

⁴ European Commission: Environment – European Commission. Dostęp w dniu 22.10.2025. <https://environment.ec.europa.eu>

⁵ Bartoszewicz G.: Projektowanie wdrożenia modułów logistycznych zintegrowanych systemów klasy ERP. *Podejście procesowe*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, s. 23, 2007.

⁶ Golarz M.: The usage of ERP class system in logistics area of companies. *Journal of Modern Management Process*, 2(1), s. 18–29, 2017

⁷ Chomuszek M.: System ERP. *Dobre praktyki wdrożeń*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, s. 6, 2016

⁸ Parys T.: System ERP III przykładem zintegrowanego systemu informatycznego ery mobilnej komunikacji. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, Nr 24, s. 666, 2018

⁹ Ayan B., Güner E., Son-Turan S.: Blockchain technology and sustainability in supply chains and a closer look at different industries: A mixed method approach. *Logistics*, 6(4), 85, 2022

Zintegrowane środowiska informatyczne klasy ERP wspierają zarządzanie przedsiębiorstwem w ujęciu procesowym, umożliwiając koordynację działań w różnych obszarach funkcjonalnych organizacji¹⁰. Systemy klasy ERP powstały w celu wspierania koordynacji procesów biznesowych, a ich rozwój stanowi odzwierciedlenie kolejnych etapów ewolucji zarządzania przedsiębiorstwem.

Na przestrzeni dekad architektura tych systemów ulegała ciągłym udoskonaleniom wraz z postępem technologicznym, co umożliwiło nie tylko integrację danych w czasie rzeczywistym, lecz także rozwój funkcji identyfikowalności, pozwalających na precyzyjne śledzenie przepływu surowców, komponentów i prób produkcyjnych w ramach całego łańcucha dostaw¹¹.

Do głównych funkcji systemów ERP należą¹²:

- planistyczna – prognozowanie zapotrzebowania i planowanie zasobów,
- kontrolna – porównywanie wyników z założonymi normami,
- logistyczna – zarządzanie łańcuchem dostaw i zapasami,
- finansowa i raportowa – analiza kosztów, kontroling i raportowanie wydajności.

Systemy ERP obejmują kluczowe obszary funkcjonowania przedsiębiorstwa, takie jak zaopatrzenie, gospodarka magazynowa, produkcja, sprzedaż, finanse oraz kadry i płace. Integracja modułów umożliwia spójny przepływ informacji o materiałach, zleceniach i produktach, zapewniając jednocześnie pełną identyfikowalność procesów w całym łańcuchu dostaw. Moduły produkcyjne łączą dane dotyczące struktur materiałowych (BOM), marszrut technologicznych, numerów partii oraz wyników kontroli jakości, co pozwala na wierne odwzorowanie cyklu życia produktu w systemie ERP i wspiera realizację koncepcji traceability prób produkcyjnych¹³.

W kontekście traceability prób produkcyjnych systemy klasy ERP odgrywają kluczową rolę w rejestrowaniu zdarzeń procesowych oraz ich powiązaniu z określonymi partiami wytwórczymi. Integracja modułów produkcyjnych i jakościowych umożliwia automatyczne przypisanie próbki do konkretnego zlecenia produkcyjnego, a informacje dotyczące jej pobrania, lokalizacji oraz wyników badań stają się częścią cyfrowego zapisu historii produktu. W rezultacie system ERP pełni nie tylko funkcję narzędzia informatycznego, lecz stanowi również integralny element systemowego podejścia do zarządzania jakością, gwarantującego pełną identyfikowalność i transparentność procesów produkcyjnych.

Porównanie wybranych systemów ERP pod kątem traceability

Współczesne systemy klasy ERP stanowią zintegrowane narzędzie zarządzania informacją, umożliwiające kompleksowe odwzorowanie procesów produkcyjnych, logistycznych

¹⁰ Bartoszewicz G.: Projektowanie wdrożenia modułów logistycznych zintegrowanych systemów klasy ERP. Podejście procesowe. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, s. 23, 2007

¹¹ Golarz M.: The usage of ERP class system in logistics area of companies. Journal of Modern Management Process, 2(1), 18–29, 2017

¹² Łazicki A., Króżycka L.: Zarządzanie magazynem. Zapasy, WMS, Lean, bezpieczeństwo. Wiedza i Praktyka, Warszawa, s. 119, 2019

¹³ Trzaskalik T.: Harmonogramowanie produkcji w systemach klasy ERP na przykładzie systemu Impuls 5. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 32, 2011

i jakościowych w jednym środowisku danych. W kontekście traceability prób produkcyjnych istotne znaczenie ma stopień integracji modułów odpowiedzialnych za planowanie produkcji (PP), zarządzanie jakością (QM) oraz logistykę magazynową (WMS)¹⁴. Systemy te różnią się zakresem funkcjonalnym, architekturą danych oraz możliwościami raportowania, co przekłada się na ich zdolność do zapewnienia pełnej identyfikowalności prób i partii produkcyjnych w cyklu życia produktu.

W tabeli 2 ukazano zestawienie wybranych systemów klasy ERP w kontekście implementacji mechanizmów identyfikowalności prób produkcyjnych w łańcuchu dostaw, ze szczególnym uwzględnieniem funkcjonalności umożliwiających rejestrację, monitorowanie oraz analizę danych dotyczących prób produkcyjnych w ujęciu procesowym i jakościowym.

Tabela 2. Identyfikowalność prób produkcyjnych w systemach klasy ERP

System klasy ERP	Moduły	Ujęcie traceability prób produkcyjnych
Comarch	– Comarch ERP XL, – Comarch ERP Optima, – Comarch ERP Enterprise.	System wspiera traceability poprzez obsługę numerów partii i pozycji seryjnych, integrację danych produkcyjnych z modułem jakości oraz powiązanie ich z procesami logistycznymi. Moduł QMS umożliwia analizę prób produkcyjnych w powiązaniu z parametrami zleceń, a pełna integracja z Power BI pozwala na raportowanie jakości w czasie rzeczywistym.
Microsoft Dynamics 365	– Dynamics 365, – Supply Chain Management.	Traceability realizowane jest przez zintegrowane moduły Production Control i Quality Management, które wspierają identyfikację prób produkcyjnych, kontrolę jakości oraz automatyczne generowanie certyfikatów analizy. Możliwa jest integracja z IoT do rejestrowania danych pomiarowych.
Streamsoft	– Streamsoft Prestiż, – Streamsoft Verto.	System oferuje śledzenie cyklu życia partii produkcyjnych, w tym pobieranie i rejestrowanie próbek kontrolnych w kontekście zleceń. Funkcjonalność traceability jest rozszerzona o moduły jakości i magazynowania, umożliwiające analizę porównawczą wyników prób.
SAP Business One	– SAP MM (Materials Management), – SAP WM / SAP EWM (Warehouse Management), – SAP QM (Quality Management) – SAP LO (Logistics General), – SAP LE (Logistics Execution).	System umożliwia pełne śledzenie partii produkcyjnych oraz przypisywanie próbek kontrolnych do konkretnego zlecenia w modułach PP (Production Planning) i QM (Quality Management). Dane o pobraniu, lokalizacji i wynikach badań laboratoryjnych są rejestrowane w ramach jednego przepływu danych. Integracja z modułem EWM zapewnia identyfikowalność w procesach magazynowych i transportowych.

¹⁴ Badia-Melis R., Garcia-Hierro J., Ruiz-Garcia L.: Food traceability: New trends and recent advances. *Sensors*, 15(8), 2015

System klasy ERP	Moduły	Ujęcie traceability prób produkcyjnych
SAP ERP SAP S/4HANA	– SAP QM (Quality Management), – SAP WMS, – SAP EWM.	System SAP ERP integruje dane dotyczące traceability prób produkcyjnych w sposób kompleksowy, łącząc moduły PP (Production Planning), QM (Quality Management) i EWM (Extended Warehouse Management). Umożliwia to rejestrację pobranych próbek, przypisanie ich do zleceń oraz monitorowanie wyników badań i lokalizacji w czasie rzeczywistym. Takie rozwiązanie wspiera zgodność z normami ISO 9001 i ISO 22005, zapewniając pełną identyfikowalność procesów produkcyjnych i logistycznych.
proALPHA ERP	– proALPHA WMS	System zapewnia kompleksowe zarządzanie traceability prób poprzez moduły WMS i QM, umożliwiające rejestrację parametrów produkcyjnych, kontroli jakości i testów laboratoryjnych, z pełnym powiązaniem danych z numerem zlecenia i partii.
Blue Yonder Luminate Platform	– Blue Yonder Warehouse Management System	Systemy klasy APS (Advanced Planning and Scheduling) i SCM (Supply Chain Management) rozszerzają traceability na poziom globalny, umożliwiając śledzenie próbek, komponentów i półproduktów w łańcuchach dostaw międzynarodowych.
BPSC	– Moduł SCM – Moduł WMS	System posiada funkcję śledzenia partii i próbek poprzez integrację modułów produkcji i magazynu. Zapewnia odwzorowanie przebiegu prób od momentu pobrania do analizy, a dane są wykorzystywane w raportach jakościowych i planowaniu produkcji.
Infor LN	– Infor WMS	Umożliwia pełną identyfikowalność próbek w cyklu produkcyjnym i logistycznym dzięki powiązaniu informacji zleceń, dokumentów magazynowych i wyników kontroli jakości. Integracja z modułami MES pozwala na analizę śladów materiałowych i czasowych.
Oracle Cloud	– Oracle Warehouse Management Cloud	Wspiera traceability w czasie rzeczywistym dzięki modułom Quality Management Cloud oraz Warehouse Management Cloud, zapewniając zapis danych o próbach, testach i wynikach w jednolitym rejestrze danych. System umożliwia zgodność z wymogami ISO 9001 i 22005 w zakresie rejestrowania danych partii.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Akkermans H. A., Bogerd P., Yücesan E., Van Wassenhove L. N.: *The impact of ERP on supply chain management: Exploratory findings from a European Delphi study*. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 284–301, 2003, Bulkova Z., Gasparik J., Camaj J.: *Implementation of automated systems in logistics: The key to efficiency and environmental sustainability*. *Transportation Research Procedia*, Vol. 87, s. 1-10, 2025, Chomuszek M.: *System ERP. Dobre praktyki wdrożeń*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, s. 6, 2016, Li Q., Wu G.: *ERP System in the Logistics Information Management System of Supply Chain Enterprises*. *Mobile Information Systems*, Vol. 2021, s. 11, 2021, Dyczkowska J. A., Chamier-Gliszczyński N., Olkiewicz M., Królikowski T.: *Evaluation of IT systems in logistics*. *Procedia Computer Science*, 246, s. 4297- 4306, 2024, Liao Y., Kwaramba C. S., Kros J. F.: *Supply chain traceability: An institutional theory perspective*. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 8(3), 193–223, 2020, Regattieri A., Gamberi M., Manzini R.: *Traceability of food products: General framework and experimental evidence*. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 347–356, 2007.

Analiza porównawcza wybranych systemów klasy ERP wykazała zróżnicowany poziom dojrzałości funkcji traceability w zakresie obsługi prób produkcyjnych. Systemy o rozbudowanej architekturze modułowej, takie jak SAP ERP, Oracle Cloud ERP czy Microsoft Dynamics 365, zapewniają kompleksową integrację danych produkcyjnych, jakościowych i logistycznych, umożliwiając pełną identyfikowalność prób od momentu pobrania do analizy laboratoryjnej. Wysoki stopień automatyzacji i interoperacyjność tych systemów pozwalają na bieżące monitorowanie wyników oraz generowanie raportów zgodnych z normami ISO 9001 i ISO 22005.

Rozwiązania dedykowane dla sektora małych i średnich przedsiębiorstw produkcyjnych, m.in. Comarch ERP, Streamsoft, czy BPSC, oferują funkcjonalność traceability w ograniczonym zakresie, koncentrując się głównie na rejestracji partii, integracji z modułami magazynowymi (WMS) i jakościowymi (QMS) oraz podstawowej analizie danych. Mimo mniejszej złożoności architektonicznej, systemy te skutecznie wspierają identyfikowalność w ramach procesów wewnętrznych, co czyni je adekwatnymi dla przedsiębiorstw o mniejszej skali produkcji.

Model traceability prób produkcyjnych w środowisku ERP

W celu usystematyzowania przepływu informacji dotyczących próbek produkcyjnych w środowisku systemowym opracowano szczegółowy opis etapów traceability realizowanych w SAP Business One. Rozwiązanie to umożliwia zachowanie ciągłości identyfikowalności w transporcie międzynarodowym oraz zapewnienie zgodności z protokołem badań. Ujęcie tabelaryczne pozwala na jednoznaczne powiązanie czynności fizycznych wykonywanych na próbach z odpowiadającymi im zapisami systemowymi, które tworzą cyfrowy ślad kontroli jakości. Badana próba produkcyjna obejmuje zarówno etap pobrania i rejestracji w miejscu wytwarzania, jak i moment załadunku towaru na środek transportu zewnętrznego, gdzie próba jest fizycznie odkładana wraz z partią wysyłkową i ewidencjonowana w systemie. Kolejnym elementem procesu jest analiza próbki w państwie docelowym, której wyniki odnotowywane są w module kontroli jakości, co umożliwia pełne odtworzenie historii produktu również po opuszczeniu zakładu produkcyjnego. Każdy etap generuje zapis w modułach produkcyjnych, magazynowych lub jakościowych, co zapewnia kompletną identyfikowalność w całym cyklu logistycznym. Szczegółowe zestawienie etapów traceability w systemie SAP Business One przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Etapy traceability w systemie SAP Business One

Etap procesu	Moduł / funkcja SAP Business One	Rodzaj zapisywanych danych systemowych	Cel traceability
Pobranie próby towaru przed przekazaniem do magazynu	Produkcja → Zlecenie produkcyjne	ID próbki, numer partii, kod materiału, data i czas pobrania, identyfikacja operatora	Powiązanie próbki z konkretną partią produkcyjną i zapewnienie możliwości jej odtworzenia w systemie
Rejestracja próby w dokumentacji produkcyjnej	Produkcja → Rejestracja produkcji	Dokument RW/PR, numer partii lub nu-	Wprowadzenie próbki do systemowej doku-

Etap procesu	Moduł / funkcja SAP Business One	Rodzaj zapisywanych danych systemowych	Cel traceability
		numer seryjny, identyfikacja użytkownika, data operacji	mentacji oraz potwierdzenie zgodności z rejestrem produkcyjnym
Rejestracja zlecenia wydania partii towaru z magazynu	WMS → Lokalizacja magazynowe	Numer dokumentu WZ (wydanie zewnętrzne), lokalizacja magazynowa, status jakościowy, identyfikacja odbiorcy	Potwierdzenie wydania partii zgodnie z dokumentacją systemową oraz utrzymanie ciągłości traceability poza zakładem
Załadunek towaru na środek transportu ze wewnętrznego	Produkcja → Kontrola jakości	Numer etykiety, kod kreskowy/QR, powiązanie z dokumentem	Automatyzacja identyfikacji próbki i eliminacja błędów manualnych
Załadunek towaru na środek transportu ze wewnętrznego	Magazyn → Wydanie towaru	Dokument WZ/PW, numer partii, ID próbki, odbiorca, data załadunku	Rejestracja przekazania partii i próbki poza magazyn produkcyjny oraz możliwość odtworzenia trasy transportowej
Odłożenie próby w wyznaczonym miejscu transportu ze wewnętrznego	Magazyn → Wydanie towaru	ID nośnika pobranej próby, czas operacji, rejestr użytkownika	Zapewnienie zgodności danych systemowych z dokumentacją oraz kontrola przepływu próby do kolejnego ogniwa łańcucha dostaw
Naklejenie etykiety identyfikującej próbkę w środku transportu zewnętrznego	Produkcja → Kontrola jakości	ID nośnika pobranej próby, kod kreskowy/QR, powiązanie z dokumentacją partii, identyfikacja operatora	Automatyzacja identyfikacji próbki
Pobranie próby jakościowej w miejscu docelowym i rejestracja w systemie	Kontrola jakości → Protokół badania	Protokół przekazania próby, lokalizacja laboratorium	Potwierdzenie fizycznego przyjęcia próbki do badania
Odbiór próby w państwie docelowym i rejestracja w systemie	QM → Protokół badania	Data przyjęcia, identyfikacja osoby odbierającej próbę, potwierdzenie integralności zabezpieczeń transportowych, lokalizacja laboratoryjna	Potwierdzenie fizycznego przyjęcia próbki do badań oraz utrzymanie ciągłości traceability po transporcie
Badania jakości i ocena zgodności	Kontrola jakości → Wyniki badań	Parametry fizykochemiczne, status zgodności, identyfikacja laboratorium, data analizy	Potwierdzenie, że partia spełnia wymagania jakościowe oraz dokumentacja wyników badań

Etap procesu	Moduł / funkcja SAP Business One	Rodzaj zapisywanych danych systemowych	Cel traceability
Magazynowanie próbki po analizie	Magazyn → Przesunięcie magazynowe	Dokument przesunięcia, status próbki, informacja o archiwizacji	Umożliwienie odtworzenia ruchów i lokalizacji próbki po badaniu
Raport końcowy i analiza historyczna	Produkcja → Kontrola jakości → Raporty	Pełna historia śladu partii, zestawienie wyników, dane operatorów	Odtworzenie historii próby na potrzeby np.: audytu, reklamacji lub certyfikacji

Źródło: Opracowanie własne

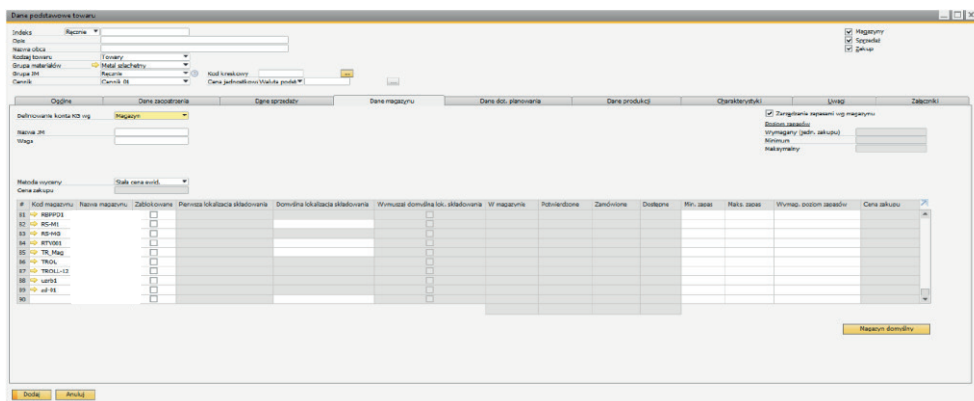
Zestawione etapy pokazują, że każdy ruch próby produkcyjnej generuje cyfrowy ślad w systemie ERP, a integracja modułów produkcyjnych, magazynowych i jakościowych zapewnia pełną odtwarzalność procesu. Oznacza to, że traceability obejmuje nie tylko etap wytwarzania, lecz również operacje logistyczne i transgraniczne, co ma kluczowe znaczenie w kontekście globalnych łańcuchów dostaw. System SAP Business One umożliwia rejestrowanie danych operacyjnych w czasie rzeczywistym, dzięki czemu historia próbki może zostać jednoznacznie odtworzona na potrzeby audytów jakościowych, certyfikacji eksportowej lub rozpatrywania reklamacji.

Szczególnie istotne jest przeniesienie identyfikowalności poza zakład produkcyjny: od momentu załadunku na środek transportu aż do analizy w państwie docelowym. Każda zmiana lokalizacji próbki zostaje odnotowana w systemie, co eliminuje ryzyko utraty informacji i umożliwia potwierdzenie integralności próby po zakończonym transporcie. Rozwiązanie to wpisuje się w wymagania norm ISO 9001:2015 i ISO 22005 dotyczących dokumentowania historii produktu i jego komponentów. W efekcie systemy klasy ERP w tym SAP Business One zapewniają nie tylko zgodność z wymogami jakościowymi, lecz także transparentność, bezpieczeństwo oraz wysoką wiarygodność procesów kontrolnych.

W celu zobrazowania praktycznego funkcjonowania traceability w środowisku SAP Business One przedstawiono wybrane moduły systemowe odpowiedzialne za rejestrację i obsługę danych produkcyjnych, magazynowych oraz logistycznych. Prezentowane zrzuty ekranu ilustrują kluczowe obszary interfejsu systemu, w których realizowane są operacje związane z identyfikacją próbki, jej powiązaniem z partią produkcyjną oraz ewidencją kolejnych etapów przepływu materiałowego.

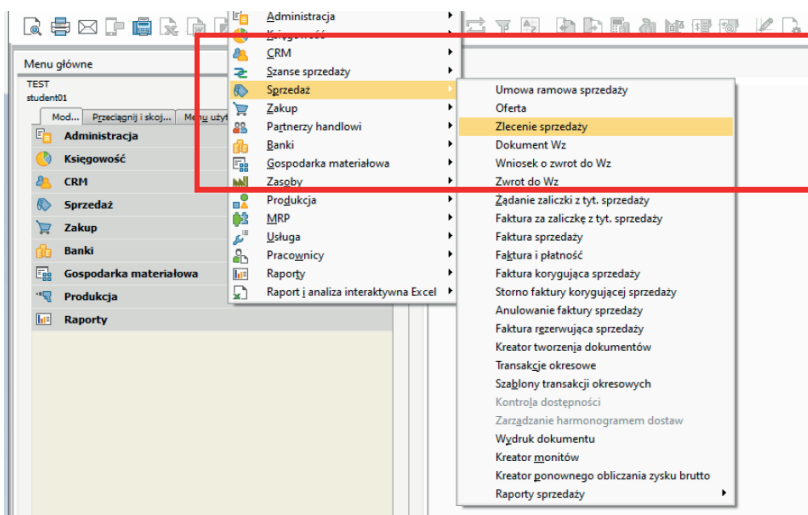
Jednym z kluczowych elementów traceability w systemie SAP Business One jest powiązanie próbki produkcyjnej z kartoteką towarową. Na rysunku 1 przedstawiono widok danych podstawowych produktu, zawierający m.in. kod indeksu, oznaczenie jednostki miary, przypisanie do grup asortymentowych oraz informacje o lokalizacjach magazynowych. W kartotece zapisywane są również parametry logistyczne i jakościowe, które umożliwiają jednoznaczną identyfikację partii oraz kontrolę przepływu materiałów.

W kontekście traceability szczególnie istotna jest sekcja dotycząca lokalizacji składowania, gdzie odnotowywane są miejsca przechowywania produktu, status zapasów oraz zasady kompletacji. To właśnie w tej części system rejestruje, w jakiej lokalizacji znajduje się partia powiązana z próbką, co umożliwia jej odtworzenie w każdym momencie procesu. Dane te są wykorzystywane zarówno w operacjach magazynowych, jak i podczas sporządzania raportów jakościowych.



Rysunek 1. Dane podstawowe towaru w SAP Business One

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 2. Menu modułu Sprzedaż w systemie SAP Business One

Źródło: Opracowanie własne

Kolejnym obszarem systemu SAP Business One istotnym z perspektywy traceability jest moduł sprzedaż, w którym realizowane są operacje związane z obsługą zamówień i wydaniem partii towaru poza zakład produkcyjny. Na rysunku 2 przedstawiono strukturę menu modułu, obejmującą m.in. tworzenie zleceń sprzedaży. To właśnie w tej części systemu inicjowana jest transakcja wysyłkowa, podczas której partia produkcyjna, wraz z przypisaną do niej próbką kontrolną, zostaje formalnie wydana odbiorcy.

Podsumowanie i wnioski

Systemy klasy ERP odgrywają istotną rolę w zapewnianiu przejrzystości procesów produkcyjnych oraz dokumentowania zdarzeń związanych z kontrolą jakości. Celem opracowania było przedstawienie koncepcji traceability prób produkcyjnych w systemach klasy ERP oraz ukazanie sposobu ich odwzorowania w środowisku informatycznym przedsiębiorstwa. Przeprowadzony przegląd literatury oraz zestawienie funkcjonalne wybranych systemów ERP umożliwiły uporządkowanie wiedzy dotyczącej narzędzi służących do rejestracji zdarzeń produkcyjnych, magazynowych i jakościowych. Wykazano, że systemy tej klasy pozwalają na powiązanie danych o próbie produkcyjnej z informacjami dotyczącymi partii, surowców, parametrów procesu oraz dokumentacją potwierdzającą jej dalsze przemieszczanie w łańcuchu dostaw.

W przedstawionym ujęciu system ERP umożliwia odwzorowanie całego cyklu operacyjnego próby produkcyjnej, obejmującego pobranie, nadanie identyfikatora, ewidencję magazynową oraz załadunek na środek transportu zewnętrznego. Kluczową rolę pełnią tu dokumenty systemowe, takie jak zlecenie produkcyjne, przyjęcie wyrobu gotowego, wydanie z magazynu oraz rejestry kontroli jakości, które pozwalają na zachowanie ciągłości informacji na każdym etapie procesu. Zaprezentowany przykład potwierdził, że standardowe funkcjonalności ERP mogą stanowić podstawę do tworzenia wiarygodnego cyfrowego zapisu historii partii i prób produkcyjnych, nawet w przedsiębiorstwach średniej wielkości.

Wyniki porównania systemów ERP wykazały istotne zróżnicowanie funkcjonalne pomiędzy rozwiązaniami dedykowanymi makro przedsiębiorstwom (SAP ERP, Oracle Cloud, Microsoft Dynamics 365), a systemami ukierunkowanymi na sektor MŚP (Comarch, Streamsoft, SAP Business One, BPSC). Systemy dla makro przedsiębiorstw umożliwiają automatyzację i interoperacyjność modułów, wspierając traceability w ujęciu globalnych łańcuchów dostaw, podczas gdy rozwiązania stosowane w mniejszych przedsiębiorstwach koncentrują się przede wszystkim na wewnątrzzakładowej identyfikowalności i dokumentowaniu parametrów produkcyjnych.

Przedstawione rozwiązanie wdrożone w systemie SAP Business One potwierdziło możliwość stworzenia spójnego, cyfrowego śladu kontroli jakości opartego na rejestracji zdarzeń procesowych. Zaprezentowany model pozwolił na ewidencjonowanie kolejnych etapów pracy z próbą produkcyjną od pobrania i oznaczenia, poprzez operacje magazynowe i załadunek na środek transportu zewnętrznego, aż do potwierdzenia odbioru i analizy w państwie docelowym. Wykazano, że system ERP może stanowić centralną platformę gromadzenia i archiwizacji danych identyfikowalności, umożliwiając zachowanie ciągłości informacji w całym przebiegu procesu. Zastosowane rozwiązanie umożliwia również odtworzenie historii procesu na potrzeby audytów, certyfikacji lub analizy przyczyn niezgodności, a przy odpowiedniej konfiguracji spełnia wymagania wynikające z norm jakościowych, m.in. ISO 9001:2015 czy ISO 22005.

Zestawione wyniki potwierdzają, że system ERP może stanowić spójne środowisko gromadzenia i zarządzania informacją o próbach produkcyjnych, umożliwiając odtworzenie pełnego przebiegu procesu bez konieczności stosowania dodatkowych narzędzi informatycznych. Cyfrowe powiązanie danych operacyjnych z dokumentacją jakościową pozwala utrzymać ciągłość informacji od produkcji po analizę laboratoryjną, a tym samym zapewnia zgodność rejestrów procesowych z wymaganiami dokumentacyjnymi. Opracowane ujęcie

stanowi podstawę do dalszego doskonalenia praktyk traceability w przedsiębiorstwach produkcyjnych oraz pokazuje, że funkcjonalności dostępne w systemach ERP mogą w sposób kompletny odwzorować przebieg pracy z próbą produkcyjną w ujęciu procesowym i logistycznym.

Bibliografia

- Akkermans H. A., Bogerd P., Yücesan E., Van Wassenhove L. N.: The impact of ERP on supply chain management: Exploratory findings from a European Delphi study. *European Journal of Operational Research*, 146(2), 284–301, 2003
- Alfaro J. A., Rábade L. A.: Traceability as a strategic tool to improve inventory management: A case study in the food industry. *International Journal of Production Economics*, 118(1), s. 104–110, 2009
- Ayan B., Güner E., Son-Turan S.: Blockchain technology and sustainability in supply chains and a closer look at different industries: A mixed method approach. *Logistics*, 6(4), 85, 2022
- Badia-Melis R., Garcia-Hierro J., Ruiz-Garcia L.: Food traceability: New trends and recent advances. *Sensors*, 15(8), 2015
- Bartoszewicz G.: Projektowanie wdrożenia modułów logistycznych zintegrowanych systemów klasy ERP. *Podejście procesowe*. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Poznaniu, Poznań, s. 23, 2007
- Bechini A., Cimino M. G. C. A., Marcelloni F., Tomasi A.: Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business. *Information and Software Technology*, 50(4), 342–359, 2008
- Bulkova Z., Gasparik J., Camaj J.: Implementation of automated systems in logistics: The key to efficiency and environmental sustainability. *Transportation Research Procedia*, Vol. 87, s. 1–10, 2025.
- Chomuszko M.: System ERP. *Dobre praktyki wdrożeń*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, s. 6, 2016
- Dyczkowska J. A., Chamier-Gliszczyński N., Olkiewicz M., Królikowski T.: Evaluation of IT systems in logistics. *Procedia Computer Science*, 246, s. 4297–4306, 2024
- European Commission: Environment – European Commission. Dostęp w dniu 22.10.2025. <https://environment.ec.europa.eu>
- Golarz M.: The usage of ERP class system in logistics area of companies. *Journal of Modern Management Process*, 2(1), s. 18–29, 2017
- Li Q., Wu G.: ERP System in the Logistics Information Management System of Supply Chain Enterprises. *Mobile Information Systems*, Vol. 2021, s. 11, 2021
- Liao Y., Kwaramba C. S., Kros J. F.: Supply chain traceability: An institutional theory perspective. *International Journal of Logistics Economics and Globalisation*, 8(3), 193–223, 2020
- ISO 28000:2007: Specification for security management systems for the supply chain. International Organization for Standardization, Geneva, 2007
- ISO 9001:2015: Quality management systems - Requirements. International Organization for Standardization, Geneva, 2015
- ISO/TS 16949:2009: Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001 for automotive production and relevant service part organizations. International Automotive Task Force / International Organization for Standardization, 2009
- Lv G., Song C., Xu P., Qi Z., Song H., Liu Y.: Blockchain-based traceability for agricultural products: A systematic literature review. *Agriculture*, 13(9), 1757, 2023
- Łazicki A., Króżycka L.: Zarządzanie magazynem. *Zapasy, WMS, Lean, bezpieczeństwo*. Wiedza i Praktyka, Warszawa, s. 119, 2019

- Parys T.: System ERP III przykładem zintegrowanego systemu informatycznego ery mobilnej komunikacji. Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, Nr 24, s. 666, 2018
- Regattieri A., Gamberi M., Manzini R.: Traceability of food products: General framework and experimental evidence. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 347–356, 2007
- Trzaskalik T.: Harmonogramowanie produkcji w systemach klasy ERP na przykładzie systemu Impuls 5. Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice, s. 32, 2011
- Zhou B., Siddik A. B., Zheng G.-W., Masukujjaman M.: Unveiling the role of green logistics management in improving SMEs' sustainability performance: Do circular economy practices and supply chain traceability matter? *Systems*, 11(4), 198, 2023

Adres do korespondencji: j.giera@po.edu.pl

ORCID: Julia Giera 0000-0002-7297-458X

ORCID: Dariusz Masłowski 0000-0002-3964-540X

ORCID: Małgorzata Dendera-Gruszka 0000-0002-3683-5160

GEOPOLITYKA JAKO ELEMENT ZARZĄDZANIA INŻYNIERIĄ PRODUKCJI

Zofia Gródek-Szostak¹, Elżbieta Olech², Rafał Kornas^{2,3}

¹ Katedra Ekonomiki i Organizacji Przedsiębiorstw, Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

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

³ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Wstęp

Współczesna gospodarka światowa opiera się na złożonych i silnie zintegrowanych globalnych łańcuchach dostaw, które umożliwiają efektywną produkcję, dystrybucję i konsumpcję dóbr na niespotykaną dotąd skalę^{1,2}. Jednakże rosnące napięcia geopolityczne – takie jak wojny handlowe, konflikty zbrojne, sankcje ekonomiczne, zmiany w polityce handlowej oraz rywalizacja mocarstw – coraz częściej zakłócają płynność tych łańcuchów, prowadząc do opóźnień, wzrostu kosztów i konieczności ich restrukturyzacji^{3,4,5}. Pandemia COVID-19 oraz inwazja Rosji na Ukrainę unaocznili, jak bardzo globalne łańcuchy dostaw są podatne na czynniki polityczne i strategiczne.

W latach 2023–2025 globalne łańcuchy dostaw znalazły się pod silną presją wynikającą z dynamicznych zmian w środowisku geopolitycznym. Konflikty zbrojne, sankcje gospodar-

¹ Cupiał M., Szelań-Sikora A., Sikora J. Gródek-Szostak Z., Zintegrowane systemy zarządzania w logistyce [W:] Dzieniszewski G., Kuboń M. (red.), Aktualne problemy logistyki. T. 1, Państwowa Wyższa Szkoła Wschodnioeuropejska, 2017

² Adryjańczyk S., Olech E., Kuboń M., Szelań-Sikora A., Sikora J., Gródek-Szostak Z., Niemiec M. Stuglik J., Wybrane aspekty logistyki serwisowej w przedsiębiorstwach produkcyjnych [W:] Kuboń M. (red.), Transport i logistyka w dobie inżynierii mechanicznej. T. 1 Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, 2020

³ Adamczyk J., Gródek-Szostak Z., Kulisa B., Współczesne determinanty efektywności i rozwoju przedsiębiorstw. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, 2020

⁴ Gródek-Szostak Z., Kajrunajtys D., Ochoa Siguencia L., Polish State Aid for Transport Services and Infrastructure Between 2007-2016 [W:] Ginters E., Ruiz Estrada M. A., Piera Eroles M. A., Ginters E., M. A. R. E. & M. A. P. E. (red.), ICTE in Transportation and Logistics 2019, (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure), Springer, 2020

⁵ Duda J., Kusa R., Suder M., Gródek-Szostak Z., Grumadaitė K., Role of Inter-organizational Cooperation During Times of Crisis [W:] Bernat T., Duda J. (red.), Business Impacts of COVID-19: International Business, Crisis Management, and the Global Economy (Routledge Studies in International Business and the World Economy). Routledge, 2023

cze, napięcia handlowe, rosnący protekcyjizm oraz postępująca fragmentacja instytucji międzynarodowych znacząco wpłynęły na funkcjonowanie i rozwój transnarodowych sieci logistycznych. Wzrost niepewności politycznej oraz zmiany w układzie sił na arenie międzynarodowej doprowadziły do konieczności rewizji dotychczasowych modeli zarządzania łańcuchami dostaw oraz poszukiwania nowych strategii odporności i dywersyfikacji.

Celem niniejszej publikacji jest analiza wpływu kluczowych czynników geopolitycznych na globalne łańcuchy dostaw w okresie 2023–2025. W szczególności badaniu poddane zostaną skutki konfliktów zbrojnych, sankcji ekonomicznych, napięć handlowych, polityki protekcyjnistycznej oraz osłabienia globalnych instytucji regulujących handel międzynarodowy. Opracowanie ma na celu nie tylko identyfikację głównych zagrożeń, ale również ocenę reakcji przedsiębiorstw i państw oraz wskazanie możliwych kierunków adaptacji w obliczu zmieniającej się geopolityki.

Przegląd literatury

W trzeciej dekadzie XXI w. obserwuje się dynamiczny rozwój literatury poświęconej wpływowi geopolityki na globalne łańcuchy dostaw. W niniejszym przeglądzie omówiono trzy główne nurty badawcze: 1 - geopolityczne ryzyko i rekonfigurację łańcuchów dostaw, 2 - odporność i zrównoważony rozwój jako odpowiedź na zakłócenia oraz 3 - fragmentację instytucjonalną i zmianę paradygmatu globalizacji.

W literaturze z lat 2023–2025 podkreśla się, że konflikty zbrojne (np. wojna w Ukrainie), napięcia między USA a Chinami oraz wzrost protekcyjizmu prowadzą do głębokich zmian w strukturze globalnych łańcuchów dostaw. Autorzy tacy jak Baldwin i Evenett⁶ wskazują, że przedsiębiorstwa coraz częściej rezygnują z modelu „*just-in-time*” na rzecz „*just-in-case*”, co skutkuje wzrostem zapasów i dywersyfikacją źródeł zaopatrzenia. EY-Parthenon⁷ zauważa, że liczba odniesień do ryzyka geopolitycznego w raportach korporacyjnych wzrosła sześciokrotnie w porównaniu z okresem sprzed pandemii, co świadczy o jego rosnącym znaczeniu w strategiach przedsiębiorstw. Z kolei ESPAS⁸ analizuje przypadki relokacji produkcji z Chin do Azji Południowo-Wschodniej i Europy Środkowo-Wschodniej.

W odpowiedzi na zakłócenia geopolityczne, przedsiębiorstwa wdrażają strategie zwiększające odporność łańcuchów dostaw. Christopher i Peck⁹ oraz Sheffi¹⁰ podkreślają znaczenie elastyczności, redundancji i regionalizacji jako kluczowych mechanizmów adaptacyjnych. W literaturze pojawia się również koncepcja „*supply chain sovereignty*”, czyli dążenia państw do kontroli nad strategicznymi segmentami łańcuchów dostaw (np. półprzewodniki,

⁶ Baldwin, R., Evenett, S. J., *Revitalizing multilateralism: Pragmatic ideas for the WTO*, CEPR Press, 2023

⁷ EY-Parthenon, https://www.ey.com/pl_pl/insights/strategy/ceo-outlook-pulse-poland-report-2024, 2024

⁸ ESPAS, *Światowe tendencje do 2030 r.: czy UE jest w stanie sprostać przyszłym wyzwaniom?* Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej, 2017

⁹ Christopher, M., Peck, H., *Building the resilient supply chain*, *International Journal of Logistics Management*, 34(2), 2023

¹⁰ Sheffi, Y., *The resilient enterprise: Overcoming vulnerability for competitive advantage* (2nd ed.). MIT Press, 2024

surowce krytyczne). Raport ING¹¹ wskazuje, że przedsiębiorstwa w Europie Środkowo-Wschodniej, w tym w Polsce, zaczęły postrzegać geopolitykę jako kluczowy czynnik ryzyka operacyjnego, co skutkuje wzrostem inwestycji w lokalne centra produkcyjne i logistyczne.

Najnowsze badania wskazują, że dotychczasowy model globalizacji ulega przekształceniu. Zamiast jednolitego rynku światowego pojawiają się „bloki handlowe” i „sojusze surowcowe” (np. USA–UE, Chiny–Rosja). Autorzy tacy jak Rodrik¹² i Antras¹³ wskazują na wzrost znaczenia polityki przemysłowej i bezpieczeństwa narodowego w decyzjach o lokalizacji produkcji. W literaturze pojawia się również pojęcie „*friendshoringu*” – przenoszenia produkcji do krajów politycznie sprzyjających, co może prowadzić do dalszej fragmentacji globalnych łańcuchów dostaw i wzrostu kosztów.

Metodyka badawcza

Badanie ma charakter teoretyczno-analityczny i opiera się na metodzie studium przypadku, osadzonej w szerszym kontekście przeglądu literatury oraz analizy dokumentów źródłowych. Podstawę teoretyczną stanowią trzy komplementarne podejścia badawcze. Po pierwsze, teoria złożoności łańcuchów dostaw¹⁴ wskazuje na rosnącą podatność globalnych sieci logistycznych na zakłócenia wynikające z czynników zewnętrznych, w tym geopolitycznych. Po drugie, teoria ryzyka geopolitycznego¹⁵ pozwala zrozumieć, w jaki sposób konflikty zbrojne, sankcje, napięcia handlowe czy protekcyjizm wpływają na decyzje gospodarcze i logistyczne. Po trzecie, teoria odporności i adaptacji¹⁶ umożliwia analizę reakcji przedsiębiorstw i państw na zakłócenia oraz ich zdolności do rekonfiguracji łańcuchów dostaw w warunkach niepewności.

Metodyka badawcza obejmuje analizę treści (*content analysis*) dokumentów, raportów branżowych, komunikatów instytucji międzynarodowych oraz danych wtórnych. Studium przypadku pełni funkcję ilustracyjną i eksplanacyjną – jego celem jest ukazanie mechanizmów wpływu konkretnego wydarzenia geopolitycznego na strukturę i funkcjonowanie wybranego segmentu globalnego łańcucha dostaw. Dobór przypadku opiera się na kryteriach znaczenia geopolitycznego, wpływu na sektor gospodarki oraz dostępności źródeł.

¹¹ ING Raport: Polska w światowych łańcuchach dostaw. Szanse globalne a ryzyka lokalne. <https://ekonomiczny.ing.pl/publikacja/803025>, 2023

¹² Rodrik D., The political economy of deglobalization. *Journal of Economic Perspectives*, 38(1), 2024

¹³ Antras, P., Global value chains in a fragmented world economy. Harvard University Press, 2025

¹⁴ Cohen, M., Cui, S., Doetsch, S., Ernst, R., Huchzermeier, A., Kouvelis, P., Lee, H., Matsuo, H., Tsay, A., Understanding global supply chain and resilience: Theory and practice. In *Creating values with operations and analytics*, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08871-1_14, 2022

¹⁵ Balli F., Balli H. O., Hasan M., Gregory-Allen R., Geopolitical risk spillovers and its determinants, *International Journal of Forecasting*, 38(4), <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.01.005>, 2022

¹⁶ Kummer S., Wakolbinger T., Novoszel L., & Geske A. M. (Eds.), *Supply chain resilience: Insights from theory and practice* (Vol. 17), Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95401-7>, 2022

Zastosowane podejście umożliwia nie tylko identyfikację głównych zagrożeń dla globalnych łańcuchów dostaw, ale również ocenę strategii adaptacyjnych wdrażanych przez podmioty gospodarcze i państwa w odpowiedzi na zmieniające się uwarunkowania geopolityczne.

Globalne łańcuchy dostaw – podejście teoretyczne

Analiza wpływu geopolityki na globalne łańcuchy dostaw wymaga zastosowania interdyscyplinarnego podejścia teoretycznego, łączącego perspektywy z zakresu stosunków międzynarodowych, ekonomii oraz zarządzania. W pracy przyjęto ramę teoretyczną opartą na czterech komplementarnych teoriach: realizmu (teoria stosunków międzynarodowych); teorii odporności łańcucha dostaw (*Supply Chain Resilience Theory*); geopolityce krytycznej i teorii kosztów transakcyjnych. Zastosowanie powyższych teorii pozwala na wielowymiarową analizę zjawiska: realizm i geopolityka krytyczna wyjaśniają działania państw i ich motywacje polityczne, a teoria odporności i kosztów transakcyjnych tłumaczą reakcje przedsiębiorstw i mechanizmy adaptacyjne¹⁷.

Tabela 1. Teorie wpływu geopolityki na łańcuchy dostaw

Lp.	Teoria	Poziom analizy	Główne założenia	Reakcja na geopolitykę
1.	Realizm	Państwowy	Siła i bezpieczeństwo	Protekcjonizm, sankcje
2.	Odporność łańcucha dostaw	Organizacyjny	Adaptacja do zakłóceń	Dywersyfikacja, nearshoring
3.	Geopolityka krytyczna	Dyskursywny	Wpływ narracji	Polityczne uzasadnienia zmian
4.	Koszty transakcyjne	Ekonomiczny	Minimalizacja kosztów	Internalizacja, zmiana dostawców

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Morgenthau¹⁸, Christopher, Peck¹⁹, Ó'Tuathail²⁰, Williamson²¹

¹⁷ Gródek-Szostak Z., Adamczyk J., Kotulewicz-Wisińska K., Niemczyk A., Olszowska K. W., Szeląg-Sikora A., *The European Green Deal and the Eastern Partnership: Towards Resilient. Sustainable and Integrated Economies.* (Routledge Advances in Regional Economics, Science and Policy). Routledge, 2024

¹⁸ Morgenthau H. J., *Politics Among Nations*; Waltz K. (1979). *Theory of International Politics*, 1948

¹⁹ Christopher M., Peck H., *Building the resilient supply chain*, *International Journal of Logistics Management*, 34(2), 2023

²⁰ Ó'Tuathail G., *Critical Geopolitics. The Politics of Writing Global Space.* Borderlines, 1996

²¹ Williamson O. E., Williamson, Oliver E., *The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting.* University of Illinois at Urbana-Champaign's Academy for Entrepreneurial Leadership Historical Research Reference in Entrepreneurship, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1496720>, 1985

Realizm zakłada, że państwa działają w warunkach anarchii międzynarodowej, kierując się interesem narodowym i dążeniem do maksymalizacji bezpieczeństwa. W kontekście łańcuchów dostaw teoria ta tłumaczy działania takie jak: wprowadzanie sankcji gospodarczych, kontrola eksportu surowców strategicznych, militaryzacja infrastruktury logistycznej. Realizm pozwala zrozumieć, dlaczego państwa ingerują w przepływy handlowe w celu osiągnięcia przewagi strategicznej.

Teoria odporności łańcucha dostaw koncentruje się na zdolności organizacji do przetrwania i adaptacji w obliczu zakłóceń. Kluczowe mechanizmy to: dywersyfikacja dostawców, regionalizacja produkcji (*nearshoring*), tworzenie zapasów strategicznych. Pozwala analizować, jak przedsiębiorstwa reagują na ryzyko geopolityczne poprzez modyfikację struktur łańcuchów dostaw.

Geopolityka krytyczna bada, w jaki sposób narracje polityczne i medialne kształtują postrzeganie zagrożeń i decyzje strategiczne. Wskazuje, że decyzje o relokacji produkcji mogą być motywowane ideologicznie, dyskurs o „bezpieczeństwie narodowym” wpływa na politykę handlową. Teoria ta umożliwia analizę, jak polityczne narracje wpływają na decyzje gospodarcze niezależnie od realnych zagrożeń.

Zgodnie z teorią kosztów transakcyjnych, przedsiębiorstwa dążą do minimalizacji kosztów związanych z niepewnością, negocjacjami i egzekwowaniem kontraktów. Wzrost ryzyka geopolitycznego zwiększa koszty transakcyjne, skłania do internalizacji procesów (*reshoring*), wpływa na wybór lokalizacji dostawców. Teoria ta pomaga zrozumieć ekonomiczne motywacje zmian w strukturze łańcuchów dostaw.

Tabela 2. Studia przypadku wpływu geopolityki na globalne łańcuchy dostaw

Lp.	Teoria	Studium przypadku
1.	Realizm	- USA – Chiny: ograniczenia eksportowe na półprzewodniki – USA wprowadziły restrykcje wobec eksportu zaawansowanych chipów do Chin, by ograniczyć ich rozwój technologiczny. - Indie – zakaz eksportu ryżu (2023) – w obawie o bezpieczeństwo żywnościowe, Indie zakazały eksportu niektórych odmian ryżu, co wpłynęło na globalne ceny. - Rosja – ograniczenia eksportu gazu do UE – jako narzędzie nacisku politycznego po inwazji na Ukrainę. - Iran – ataki na tankowce w cieśninie Ormuz – zagrożenie dla globalnych dostaw ropy, motywowane interesem strategicznym.
2.	Odporność łańcucha dostaw	- UE – dywersyfikacja dostaw LNG po 2022 – zwiększenie importu z USA i Kataru po odcięciu rosyjskiego gazu. - Apple – przenoszenie produkcji z Chin do Indii i Wietnamu – w odpowiedzi na napięcia geopolityczne i lockdowny. - Toyota – zwiększenie zapasów półprzewodników – po kryzysie chipowym z lat 2020–2022. - Niemcy – inwestycje w lokalne źródła energii i wodoru – jako odpowiedź na kryzys energetyczny.
3.	Geopolityka krytyczna	Narracja „deglobalizacji” w USA i UE – legitymizuje <i>friendshoring</i> i <i>reshoring</i> jako działania „patriotyczne”.

Lp.	Teoria	Studium przypadku
		2. Chiny – „dual circulation strategy” – promowanie samowystarczalności jako odpowiedź na zagrożenia zewnętrzne.
		3. UE – „strategiczna autonomia” – dyskurs o niezależności technologicznej i energetycznej.
		4. Rosja – narracja „oblężonej twierdzy” – uzasadnia izolację i budowę alternatywnych szlaków handlowych (np. przez Iran i Chiny).
4.	Koszty transakcyjne	1. Wycofywanie się przedsiębiorstw z Chin – z powodu rosnących kosztów regulacyjnych i ryzyka sankcji.
		2. Przenoszenie produkcji do Meksyku (nearshoring) – niższe koszty transakcyjne dzięki bliskości USA i umowom handlowym.
		3. Zerwanie kontraktów z Rosją przez podmioty europejskie – z powodu sankcji i ryzyka reputacyjnego.
		4. Zwiększone inwestycje w ASEAN (np. Wietnam, Malezja) – jako alternatywa dla Chin, z niższym ryzykiem politycznym.

Wprowadzenie przez Stany Zjednoczone ograniczeń eksportowych wobec Chin w zakresie zaawansowanych półprzewodników stanowi jedno z kluczowych wydarzeń geopolitycznych ostatnich lat. Restrykcje te mają na celu ograniczenie rozwoju technologicznego Chin, szczególnie w obszarach sztucznej inteligencji, superkomputerów i zaawansowanej elektroniki²². Ich skutki są jednak znacznie szersze i wpływają na globalne łańcuchy dostaw logistyki produkcji w wielu sektorach gospodarki. Zakłócenia w produkcji półprzewodników wpływają na wiele branż, w tym motoryzację, lotnictwo, energetykę i medycynę. Braki komponentów prowadzą do opóźnień w montażu, wzrostu cen i konieczności zmiany dostawców. Przedsiębiorstwa zmuszone są do opracowywania nowych strategii zarządzania ryzykiem²³.

Cieśnina Ormuz, przez którą przepływa około 20% światowego handlu ropą naftową, stanowi jeden z kluczowych punktów strategicznych dla globalnych łańcuchów dostaw energii i logistyki produkcji²⁴. Ataki na tankowce w tym regionie, przypisywane Iranowi, mają istotne konsekwencje dla bezpieczeństwa energetycznego, kosztów transportu oraz stabilności dostaw surowców dla przemysłu. Niepewność związana z bezpieczeństwem w cieśninie Ormuz prowadzi do wzrostu cen ropy na rynkach światowych. Wzrost cen surowców energetycznych przekłada się bezpośrednio na koszty produkcji w sektorach energochłonnych, takich jak przemysł chemiczny, metalurgiczny czy transportowy. Zakłócenia w dostawach ropy wpływają na dostępność paliw i komponentów petrochemicznych, co może prowadzić do przestojów w produkcji. Przedsiębiorstwa logistyczne muszą dostosowywać harmonogramy dostaw i zwiększać zapasy bezpieczeństwa, co wpływa na efektywność operacyjną.

W odpowiedzi na napięcia geopolityczne, wojny handlowe oraz zakłócenia związane z pandemią COVID-19, Apple rozpoczęło proces dywersyfikacji swojej bazy produkcyjnej,

²² Uznańska P., *Przerwane oblężenie? Chiński sektor procesorów pod sankcjami USA*. Ośrodek Studiów Wschodnich, Warszawa, 2024

²³ Kummer S., Wakolbinger T., Novoszel L., Geske A. M. (Eds.), *Supply chain resilience: Insights from theory and practice* (Vol. 17), Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95401-7>. 2022

²⁴ Kędzierski R., *Cieśnina Ormuz. Tędy przepływa 20 proc. ropy. Iran ją kontroluje*. <https://www.money.pl/>, 2025

przenosząc część operacji z Chin do Indii i Wietnamu. To strategiczne przesunięcie ma istotne konsekwencje dla globalnych łańcuchów dostaw logistyki produkcji, wpływając na strukturę dostawców, koszty transportu, zarządzanie ryzykiem oraz lokalne rynki pracy. Apple zmagają się z rosnącym ryzykiem geopolitycznym w relacjach USA–Chiny, w tym z ograniczeniami eksportowymi, kontrolą technologiczną oraz lockdownami w chińskich fabrykach. W odpowiedzi przedsiębiorstwo wdrożyło strategię *friendshoringu*, przenosząc produkcję do krajów bardziej przyjaznych politycznie, takich jak Indie i Wietnam²⁵. Relokacja produkcji wymusza przebudowę sieci dostawców, centrów montażowych i tras logistycznych. Indie i Wietnam stają się nowymi hubami produkcyjnymi, co prowadzi do zwiększenia inwestycji w infrastrukturę, ale także do wyzwań związanych z jakością, wydajnością i dostępnością komponentów²⁶. Zmiana lokalizacji produkcji wpływa na czas realizacji zamówień, koszty transportu oraz zarządzanie zapasami. Apple musi dostosować swoje strategie logistyczne, aby zminimalizować ryzyko opóźnień i zapewnić ciągłość dostaw. Nowe lokalizacje wymagają również rozwoju lokalnych kompetencji i infrastruktury²⁷.

W latach 2023–2025 globalne łańcuchy dostaw znalazły się w centrum geopolitycznych napięć, co doprowadziło do ich głębokiej transformacji. Analiza z perspektywy czterech teorii – realizmu, odporności łańcucha dostaw, geopolityki krytycznej oraz teorii kosztów transakcyjnych – pozwala uchwycić złożoność i wielowymiarowość tych zmian.

Po pierwsze, realizm wskazuje, że państwa coraz częściej traktują łańcuchy dostaw jako narzędzie polityki bezpieczeństwa. Przykłady takie jak ograniczenia eksportowe USA wobec Chin czy embargo energetyczne Rosji wobec Europy pokazują, że logika siły i interesu narodowego dominuje nad logiką wolnego rynku. Państwa nie wahają się ingerować w przepływy handlowe, jeśli uznają to za konieczne dla ochrony suwerenności lub przewagi strategicznej.

Po drugie, teoria odporności łańcucha dostaw wskazuje, że przedsiębiorstwa i rządy zaczęły aktywnie projektować swoje sieci dostaw w sposób bardziej odporny na zakłócenia. Dywersyfikacja źródeł, zwiększanie zapasów, lokalizacja produkcji bliżej rynków zbytu – to tylko niektóre z działań podejmowanych w odpowiedzi na pandemię, wojnę i napięcia handlowe. Jednak budowanie odporności wiąże się z kosztami, które nie zawsze są akceptowalne dla wszystkich uczestników rynku.

Po trzecie, geopolityka krytyczna pozwala zrozumieć, że decyzje polityczne i gospodarcze są często kształtowane przez dominujące narracje i dyskursy. Pojęcia takie jak „strategiczna autonomia”, „deglobalizacja” czy „*friendshoring*” nie tylko opisują rzeczywistość, ale ją współtworzą. Narracje te legitymizują działania, które w innych warunkach mogłyby być uznane za protekcyjnistyczne lub nieefektywne.

Po czwarte, teoria kosztów transakcyjnych pokazuje, że przedsiębiorstwa reagują na wzrost ryzyka politycznego i regulacyjnego, przenosząc produkcję do bardziej przewidywalnych lokalizacji. Wzrost kosztów transakcyjnych w Chinach, Rosji czy Iranie sprawił, że

²⁵ Allen G. C., DeepSeek, Huawei, Export Controls, and the Future of the U.S.-China AI Race, JSTOR, <https://www.jstor.org/stable/resrep68307>, 2025

²⁶ Bloom N., Draca, M., Van Reenen, J., Trade Induced Technical Change? The Impact of Chinese Imports on Innovation, IT and Productivity, The Review of Economic Studies, 82(1), <https://www.jstor.org/stable/43868458>, 2015

²⁷ Hsieh C.-T., & Klenow P. J., Misallocation and Manufacturing TFP in China and India. The Quarterly Journal of Economics, 124(4), <https://www.jstor.org/stable/40506263>, 2009

kraje takie jak Wietnam, Meksyk czy Indie zyskały na znaczeniu jako alternatywne centra produkcyjne. Jednak relokacja produkcji nie zawsze oznacza poprawę warunków pracy czy ochrony środowiska, co rodzi nowe wyzwania etyczne i społeczne.

Geopolityka nie tylko zakłóca globalne łańcuchy dostaw, ale również je przekształca. Obserwujemy przesunięcie od logiki efektywności do logiki odporności i bezpieczeństwa²⁸. Wymaga to nowego podejścia teoretycznego i praktycznego – takiego, które łączy analizę polityczną, ekonomiczną i społeczną. W przyszłości kluczowe będzie nie tylko zarządzanie ryzykiem, ale także umiejętność adaptacji do zmieniających się warunków geopolitycznych i narracyjnych.

Wnioski i zakończenie

Analiza wpływu geopolityki na globalne łańcuchy dostaw w latach 2023–2025 pokazuje, że mamy do czynienia z trwałą zmianą logiki funkcjonowania gospodarki światowej. W miejsce jednolitego, zglobalizowanego systemu pojawia się mozaika regionalnych i politycznie uwarunkowanych sieci produkcji i dystrybucji.

Zastosowanie czterech teorii – realizmu, odporności łańcucha dostaw, geopolityki krytycznej i teorii kosztów transakcyjnych – pozwala uchwycić różne wymiary tego zjawiska: od interesów państw, przez strategie przedsiębiorstw, po rolę narracji i ryzyka.

1. Geopolityka jako czynnik strukturalny. Współczesne łańcuchy dostaw nie funkcjonują już w neutralnym, globalnym środowisku handlowym. Geopolityka stała się czynnikiem strukturalnym, który wpływa na decyzje zarówno państw, jak i korporacji. Konflikty, sankcje, wojny handlowe i strategiczne sojusze redefiniują mapę globalnej produkcji i dystrybucji.
2. Od efektywności do odporności. Przesunięcie paradygmatu z maksymalizacji efektywności (*just-in-time*) na budowanie odporności (*just-in-case*) jest widoczne w działaniach przedsiębiorstw i państw. Dywersyfikacja źródeł, regionalizacja produkcji i friendshoring stają się nowymi normami.
3. Narracje jako siła sprawcza. Geopolityka krytyczna pokazuje, że nie tylko realne zagrożenia, ale także narracje (np. „strategiczna autonomia”, „deglobalizacja”) wpływają na politykę gospodarczą. Dyskursy te legitymizują działania, które wcześniej byłyby uznane za protekcyjnistyczne.
4. Koszty transakcyjne jako barometr ryzyka. Przedsiębiorstwa reagują na wzrost ryzyka politycznego, regulacyjnego i reputacyjnego, przenosząc produkcję do bardziej przewidywalnych lokalizacji. Teoria kosztów transakcyjnych pozwala zrozumieć, dlaczego niektóre regiony zyskują, a inne tracą na znaczeniu w globalnych łańcuchach dostaw.

W obliczu rosnącej niepewności, przyszłe badania powinny koncentrować się na tworzeniu zintegrowanych modeli analizy, które łączą perspektywy polityczne, ekonomiczne i społeczne. Tylko takie podejście pozwoli zrozumieć i skutecznie zarządzać łańcuchami dostaw w erze geopolitycznej niestabilności.

²⁸ Gródek-Szostak Z., Sikora J., Niemczyk A., Zielone zarządzanie w łańcuchu logistycznym [W:] Wodecka-Hyjek A., Nesterak J. (red.), Wiedza - gospodarka - społeczeństwo: aktualne trendy i wyzwania cyfrowe, Instytut Nauk Ekonomicznych Polskiej Akademii Nauk, 2023

Bibliografia

- Adamczyk J., Gródek-Szostak Z., Kulisa B., Współczesne determinanty efektywności i rozwoju przedsiębiorstw. Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, 2020
- Antràs P., Global value chains in a fragmented world economy. Harvard University Press, 2025
- Adryjańczyk S., Olech E., Kuboń M., Szelaż-Sikora A., Sikora J., Gródek-Szostak Z., Niemiec M. Stuglik J., Wybrane aspekty logistyki serwisowej w przedsiębiorstwach produkcyjnych [W:] Kuboń M. (red.), Transport i logistyka w dobie inżynierii mechanicznej. T. 1 Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, 2020
- Allen G. C., DeepSeek, Huawei, Export Controls, and the Future of the U.S.-China AI Race, JSTOR, <https://www.jstor.org/stable/resrep68307>, 2025
- Baldwin R., Evenett S. J., Revitalizing multilateralism: Pragmatic ideas for the WTO, CEPR Press, 2023
- Balli F., Balli H. O., Hasan M., Gregory-Allen R., Geopolitical risk spillovers and its determinants, International Journal of Forecasting, 38(4), <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2022.01.005>, 2022.
- Bloom N., Draca M., Van Reenen J., Trade Induced Technical Change? The Impact of Chinese Imports on Innovation, IT and Productivity, The Review of Economic Studies, 82(1), <https://www.jstor.org/stable/43868458>, 2015
- Christopher M., Peck H., Building the resilient supply chain, International Journal of Logistics Management, 34(2), 2023
- Cohen M., Cui, S., Doetsch S., Ernst R., Huchzermeier A., Kouvelis P., Lee H., Matsuo H., Tsay A., Understanding global supply chain and resilience: Theory and practice. In Creating values with operations and analytics, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08871-1_14, 2022
- Cupiał M., Szelaż-Sikora A., Sikora J. Gródek-Szostak Z., Zintegrowane systemy zarządzania w logistyce [W:] Dzieniszewski G. & Kuboń M. (red.), Aktualne problemy logistyki. T. 1, Państwowa Wyższa Szkoła Wschodnioeuropejska, 2017
- Duda J., Kusa R., Suder M., Gródek-Szostak Z., Grumadaitė K., Role of Inter-organizational Cooperation During Times of Crisis [W:] Bernat T., Duda J. (red.), Business Impacts of COVID-19 : International Business, Crisis Management, and the Global Economy (Routledge Studies in International Business and the World Economy). Routledge, 2023
- ESPAS, Światowe tendencje do 2030 r.: czy UE jest w stanie sprostać przyszłym wyzwaniom? Luksemburg: Urząd Publikacji Unii Europejskiej, 2017
- EY-Parthenon, https://www.ey.com/pl_pl/insights/strategy/ceo-outlook-pulse-poland-report-2024, 2024
- Gródek-Szostak Z., Adamczyk J., Kotulewicz-Wisińska K., Niemczyk A., Olszowska K. W., Szelaż-Sikora A., The European Green Deal and the Eastern Partnership: Towards Resilient. Sustainable and Integrated Economies. (Routledge Advances in Regional Economics, Science and Policy). Routledge, 2024
- Gródek-Szostak Z., Sikora J., Niemczyk A., Zielone zarządzanie w łańcuchu logistycznym [W:] Woźdecka-Hyjek A., Nesterak J. (red.), Wiedza - gospodarka - społeczeństwo: aktualne trendy i wyzwania cyfrowe, Instytut Nauk Ekonomicznych Polskiej Akademii Nauk, 2023
- Gródek-Szostak Z., Kajrunajtys D., Ochoa Siguencia L., Polish State Aid for Transport Services and Infrastructure Between 2007-2016 [W:] Ginters E., Ruiz Estrada M. A., Piera Eroles M. A., Ginters E., M. A. R. E. & M. A. P. E. (red.), ICTE in Transportation and Logistics 2019, (Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure), Springer, 2020
- Hsieh C.-T., Klenow P. J., Misallocation and Manufacturing TFP in China and India. The Quarterly Journal of Economics, 124(4), <https://www.jstor.org/stable/40506263>, 2009
- ING Raport: Polska w światowych łańcuchach dostaw. Szanse globalne a ryzyka lokalne. <https://ekonomiczny.ing.pl/publikacja/803025>, 2023

- Kummer S., Wakolbinger T., Novoszel L., Geske A. M. (Eds.), Supply chain resilience: Insights from theory and practice (Vol. 17), Springer, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-95401-7>, 2022
- Morgenthau H. J., Politics Among Nations; Waltz K. (1979). Theory of International Politics, 1948
- Ó'Tuathail G., Critical Geopolitics. The Politics of Writing Global Space. Borderlines, 1996
- Kędzierski R., Cieśnina Ormuz. Tędy przepływa 20 proc. ropy. Iran ją kontroluje. <https://www.money.pl/>, 2025
- Rodrik D., The political economy of deglobalization. Journal of Economic Perspectives, 38(1), 2024
- Sheffi Y., The resilient enterprise: Overcoming vulnerability for competitive advantage (2nd ed.). MIT Press, 2024
- Uznańska P., Przerwane oblężenie? Chiński sektor procesorów pod sankcjami USA. Ośrodek Studiów Wschodnich, Warszawa, 2024
- Williamson O. E., Williamson, Oliver E., The Economic Institutions of Capitalism: Firms, Markets, Relational Contracting. University of Illinois at Urbana-Champaign's Academy for Entrepreneurial Leadership Historical Research Reference in Entrepreneurship, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=1496720>, 1985

Adres do korespondencji: grodekz@uek.krakow.pl

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

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

ORCID: Rafał Kornas 0000-0001-8808-7849

WPLYW ORGANIZACJI PROCESU PRODUKCYJNO-LOGISTYCZNEGO NA EFEKTYWNOŚĆ DEZYNFEKCJI JAJ

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

¹ Katedra Pojazdów i Maszyn, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

² Katedra Agroekosystemów i Ogrodnictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Wprowadzenie

W branży drobiarskiej sektor jajczarski jest jednym z najważniejszych, ale zarówno najtrudniejszych gałęzi produkcji. Wzrost kosztów produkcji oraz wyzwania związane z ptasią grypą oraz rosnące wymagania jakościowe stawiane przez przemysł spożywczy i sektor hotelarsko – gastronomiczny wymagają od branży tej innowacyjnych rozwiązań. Równolegle coraz większego znaczenia nabiera rosnąca rola przetworzonych form, a szczególnie proszku jajecznego, który znajduje szerokie zastosowanie w produkcji przemysłowej przeznaczonej na rynek krajowy i eksport. Rok 2024 okazał się jednym z najbardziej wymagających dla globalnego rynku jaj w ostatniej dekadzie. Splot czynników epidemiologicznych, ekonomicznych i politycznych wpłynął na produkcję, handel i konsumpcję. Choć jaja uchodzą za stabilny produkt spożywczy, ostatnie czasy pokazały, że ten segment również jest podatny na poważne wstrząsy. Mimo tych zakłóceń globalny popyt na jaja pozostał stabilny¹.

Szczególne znaczenie nabiera postępowanie z jajami w gastronomii. Kiedy jaja sterylizować? Kiedy naświetlać, a kiedy kupować płynne? Dezynfekcja jaj, a zasady Dobrej Praktyki Produkcyjnej (GMP), Dobrej Praktyki Higienicznej (GHP) oraz zasady HACCP. Należy podejmować konkretne decyzje. A co z salmonellą? To najważniejsze pytania dotyczące kwestii obróbki jaj. W związku z tym poszukuje się rozwiązań optymalnych technicznie i ekonomicznie. Jednym z takich rozwiązań może być linia technologiczna z użyciem do dezynfekcji diód LED.

Linia technologiczna, jako jeden ze sposobów organizacji procesu produkcji stanowi zespół stanowisk roboczych, na których poszczególne czynności związane z wytworzeniem produktu zostają uszeregowane w zależności od wykonywanego procesu technologicznego.

¹Przegląd i analiza rynku jajek w 2025 [Global Report].<https://foodcom.pl/przegląd-i-analiza-ryнку-jajek-w-2025-global-report/> (data pobrania 1.10.2025)

Pozwala to na znaczne skrócenie czasu wykonywanych czynności, co ma ogromne znaczenie przy produkcji masowej^{2,3,4,5}.

Celem pracy jest opracowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń pozwalających na zautomatyzowanie procesu technologicznego związanego z naświetlaniem jaj promieniami LED.

Ogólna charakterystyka produktu

Jajka należą do najbardziej wartościowych produktów żywnościowych dzięki znacznej zawartości przyswajalnych składników odżywczych. Stanowią one bogate źródło aminokwasów, (w tym egzogennych), kwasów tłuszczowych, witamin oraz składników mineralnych. Wzrastająca świadomość konsumentów w zakresie jakości produktów żywnościowych skłoniła producentów i dystrybutorów do przeprowadzenia badań nad wartością odżywczą jajek pozyskiwanych w różnych systemach utrzymania niosek. Zawartość składników odżywczych w jajkach konsumpcyjnych jest uzależniona poprzez: wybór systemu utrzymania kur, jakość i rodzaj podawanej paszy oraz dobór odpowiednich ras niosek⁴.

W jajkach konsumpcyjnych, podobnie, jak w innych produktach spożywczych wraz z czasem przechowywania dochodzi do obniżenia ich jakości. Zmiany te rozpoczynają się już w momencie zniesienia jajka. Na intensywność zmian związanych ze „starzeniem się” surowca wpływa szereg czynników związanych z podłożem genetycznym, oraz systemem utrzymania ptaków. Niezależnie jednak od wskazanych czynników na jakość jajek wpływa zarówno czas, jak i warunki przechowywania takie jak np. temperatura⁵.

Jajka w procesie produkcji, należy poddawać dezynfekcji lub sterylizacji. Jajka sterylizuje się lub dezynfekuje w celu zabicia pałeczek *Salmonelli* znajdujących się na skorupce. Pomimo tego, że fermy drobiu są systematycznie kontrolowane przez Inspekcję Weterynaryjną, zdarza się, że w jajku wystąpi *Salmonella*.

Profesjonalne naświetlacze do jaj służą do odkażania jajek przy pomocy promieniowania UV wykorzystywanego podczas przygotowywania potraw np. w branży hotelarsko – gastronomicznej. Urządzenie to skutecznie zwalcza bakterie, a w szczególności *Salmonella Enteritidis* dzięki czemu z powodzeniem zastępuje tradycyjne metody wyparzania jaj. Naświetlanie polega na dezynfekcji jaj za pomocą lamp UV. Lampy emitują promieniowanie

² Jarczyk A., Plocharski W.: Technologia produktów owocowo-warzywnych, Wyd. WSEH w Skierniewicach, 2010

³ Panas K., Łukaszewicz A. Innowacyjne podejście do projektowania linii technologicznej do pakowania produktów z uwzględnieniem aspektów ergonomicznych (artykuł został wykonany w ramach pracy S/WM/1/2013 realizowanej w Politechnice Białostockiej) https://www.mechanik.mechanik.pl/pliki/do_pobrania/artysty/15/26_panas_innowacyjne.pdf (dostęp w dniu 29.11.2024)

⁴ Tomczyk Ł., Szablewski T., Cegielska- Radziejewska R. Wartość odżywcza jaj konsumpcyjnych pozyskiwanych od kur niosek utrzymywanych w różnych systemach. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 6;109, 20–27, 2016

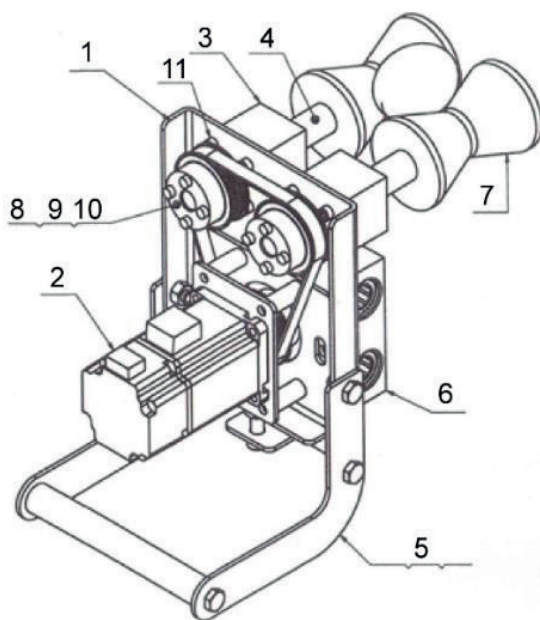
⁵ Drabik K., Batkowska J., Kanadys N. Najważniejsze czynniki wpływające na przechowalniczą jakość jaj konsumpcyjnych. *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce, Nauki przyrodnicze fauna i hodowla zwierząt MN . Młodzi Naukowcy*, Poznań 2020

ultrafioletowe, które zabija do 100% bakterii Salmonelli, E. Coli, ziarenkowców, laseczek tlenowych, pałeczek okrężnicy i grzybów z powierzchni skorupki.⁶

Według obecnych danych wiadomo, że:

- w stosowanych rozwiązaniach naświetlarek długość fali nie przekracza 253,6 nm;
- żywotność tradycyjnych naświetlarek lampowych szacowana jest na 7500 h;
- wykorzystanie tradycyjnych naświetlarek lampowych związane jest z dużym zużyciem energii;
- istnieje możliwość zastosowania naświetlarek ledowych charakteryzujących się szerokim zakresem regulacji długości fali;
- brak ograniczeń konstrukcyjnych naświetlarek związanych z rozmieszczeniem układu wytwarzającego promienie UV.

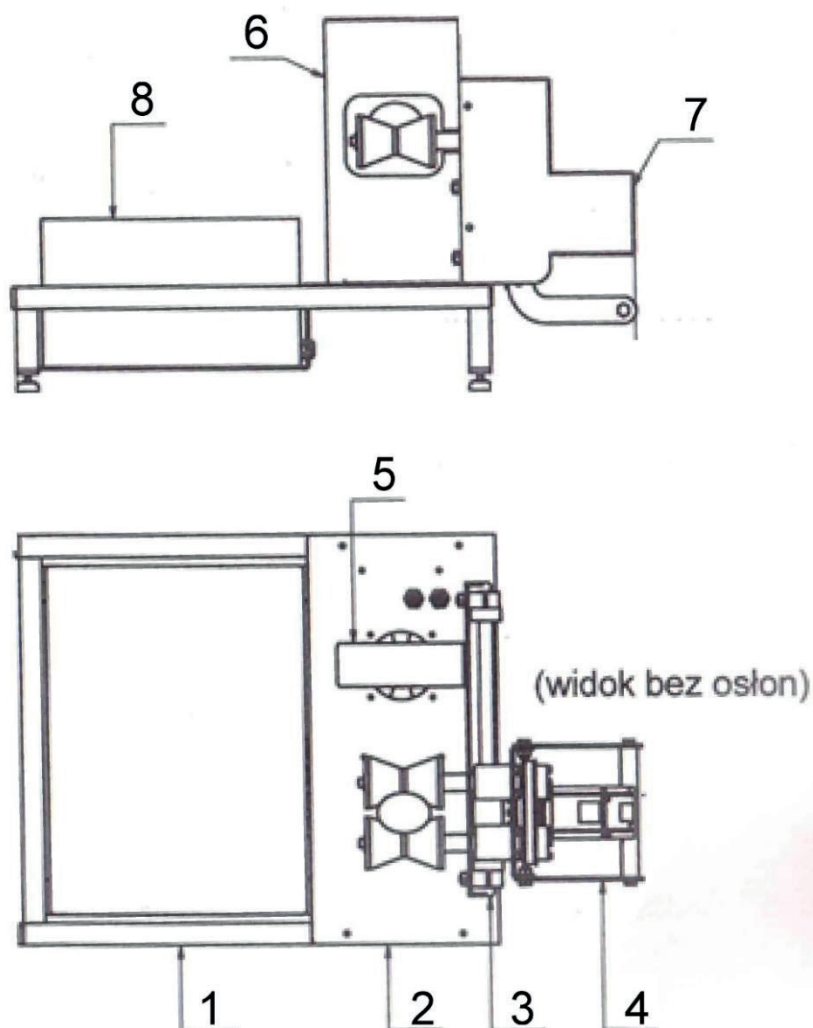
W związku z tym stworzono prototyp do przeciwbakteryjnego naświetlania jaj kurzych promieniami LED (rys. 1, 2, 3).



Rysunek 1. Widok wózka naświetlarki 1 – obudowa wózka; 2 – silnik elektryczny; 3 – obsada łożysk; 4 – oś rolki; 5 – uchwyt; 6 – oprawa wózka; 7 – rolka; 8 – tuleja zaciskowa; 9 – pas zębaty; 10 – koło pasowe napędu rolek; 11 – śruba mocowania obsady łożysk

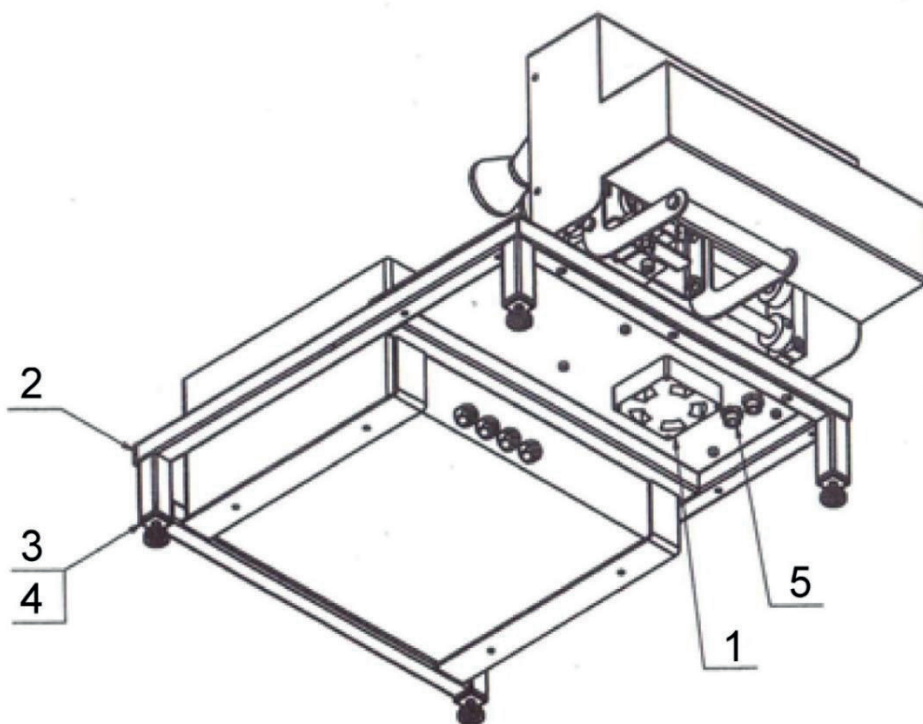
Źródło: Opracowanie własne

⁶<https://mmgastro.pl/pl/menu/kategorie/przybory-kuchenne-i-drobny-sprzet/naswietlacze-do-jaj-5418> (data pobrania 1.10.2025)



Rysunek 2. Widok naświetlarki z boku. 1 – rama nośna; 2 – obudowa mocowania osłon; 3 – prowadnice; 4 – wózek; 5 – element mocowania diód; 6 – osłona komory naświetlania; 7 – osłona układu napędowego; 8 – szafa sterownicza

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 3. Widok naświetlarki z dołu. 1 – wentylator; 2 – rama nośna; 3 – śruba regulacji poziomowania naświetlarki; 4 – stopka; 5 – ogranicznik przesuwu wózka

Źródło: Opracowanie własne

Innowacyjna naświetlarka do jaj z zastosowaniem technologii LED UV (o długości fali od 257 nm do 276 nm) posiada wysoki potencjał rynkowy. Naświetlarka do jaj odpowiada na istotny problem związany z ich bezpieczeństwem mikrobiologicznym, a szczególnie tych pochodzących z chowu alternatywnego - wolny wybieg.

Obecnie dostępne na rynku urządzenia wykorzystują lampy rtęciowe UV. Jednak są one bardzo zawodne i potencjalnie niebezpieczne dla zdrowia ze względu na obecność rtęci. Nowe innowacyjne rozwiązanie eliminuje mikroorganizmy w 99%, zapewniając wyższy poziom bezpieczeństwa żywności, co w konsekwencji umożliwia certyfikację, która zwiększa ich wartość rynkową.

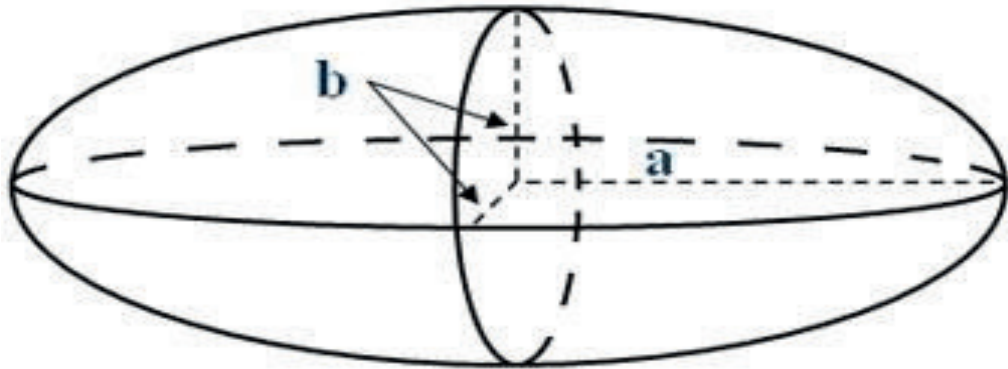
Docelową grupę odbiorców nowej technologii stanowią właściciele lokali gastronomicznych, restauracji, barów, hoteli, ferm drobiu, zakładów przetwórstwa spożywczego. Dzięki zastosowaniu innowacyjnych diod LED UV nowe urządzenie oferuje takie zalety jak np. brak rtęci, większa trwałość, energooszczędność, możliwość naświetlania z każdej strony. Innowacyjne rozwiązanie ma możliwość łatwego dostosowania do zmieniających się potrzeb

i wymagań, co sprawia, że rozwiązanie jest technologicznie atrakcyjne. W zawiązku z powyższym istnieje możliwość dostosowania proponowanej technologii do różnej wielkości produkcji.

Biorąc pod uwagę potencjał rynku warto zwrócić uwagę na konsumpcję jaj w Polsce, która wynosi około 10 miliardów rocznie, w Europie przekracza 100 miliardów, a globalnie wynosi około 1 biliona, dlatego duże znaczenie nabiera ich naświetlanie. Uniwersalność zastosowań naświetlarki do jaj wskazuje na duży potencjał rynku. Technologię tą można również zastosować w sterylizacji innych produktów spożywczych i narzędzi gastronomicznych.

Na uwagę zasługuje również fakt, iż potencjał rynkowy innowacyjnej naświetlarki do jaj jest wysoki, zwłaszcza w kontekście rosnącego zapotrzebowania na produkty ekologiczne i bezpieczne mikrobiologicznie. Rosnąca świadomość zdrowotna konsumentów, zaostrzające się normy sanitarne oraz unijne sprzyjają szybkiemu przyjęciu technologii LED UV. Bariery wejścia na rynek obejmują konieczność certyfikacji urządzenia (normy HACCP, CE), koszty wdrożenia i dystrybucji. Również ograniczeniem jest brak znajomości technologii wśród użytkowników końcowych⁷.

W celu sprawdzenia działania urządzenia prace przygotowawcze oraz badania wstępne i właściwe przeprowadzono w certyfikowanym laboratorium Wydziału Medycyny Weterynaryjnej, Katedra Mikrobiologii i Immunologii Klinicznej, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie. Polegały one na przygotowaniu obiektu badań czyli 30 losowo wybranych jaj kurzych, które oznaczono kolejnymi cyframi, zważono i zmierzono (wzdłuż ich dużych i małych półośi). Wyznaczono model naświetlanej bryły (jaja kurzego) rys. 4. na którym umieszczano wyhodowane w badaniach wstępnych szczepy bakterii.



Rysunek 4. Model naświetlanej bryły (jajo kurze) a - płaszczyzna pionowa, b - płaszczyzna pozioma elipsoidy obrotowej

Źródło: Opracowanie własne

⁷Załącznik nr 3. Wzór oceny możliwości komercjalizacji projektu badawczego. Bryżys J.

Badanie bakteriologiczne wstępne związane były z umieszczeniem każdego jajka w jałowym pojemniku, które przemywano kilkukrotnie 10 ml PBS. Otrzymaną zawiesinę posiewano redukcyjnie na podłoża – TSA (TryptoneSoya Agar), McConkey, Mannitol Salt Agar (Chapmana), Brilliance Salmonella Agar oraz Edwards Medium z krwią baranią. Po 24 h inkubacji (warunki tlenowe, 37°C) wyrosłe drobnoustroje identyfikowano na podstawie właściwości fenotypowych i biochemicznych. Szczepy z rodzaju *Streptococcus* identyfikowano na podstawie morfologii kolonii, testu katalazowego, testu CAMP oraz rozkładu eskuliny. Dla gronkowców było to: wytwarzanie katalazy, koagulazy, typ hemolizy oraz test lateksowy Staphytest Plus (Oxoid). Pałeczki Gram-ujemne z rodziny Enterobacteriaceae klasyfikowano na podstawie ich zdolności do rozkładu laktozy i testu na oksydazę, a następnie wykonywano identyfikację biochemiczną (zdolność do fermentacji węglowodanów i alkoholi cukrowych, próba na indol, obecność β -galaktozydazy, wytwarzanie ureazy, wykorzystanie cytrynianu).

Do badań właściwych użyto dwa wyizolowane szczepy bakterii (*Bacillus sp.*, *Staphylococcus sp.*), które rozmieszczono na powierzchni skorupy jajek wzdłuż wyrysowanych półosi zgodnie z zaproponowanym modelem badań elipsoidy obrotowej.

Bacillus sp.,

Liczba drobnoustrojów w testowanej zawiesinie bakteryjnej $2,1 \times 10^8$ cfu/ml

- 30s – liczba zdolnych do życia bakterii 250; 265; (liczone w 2 powtórzeniach);
- 60s – liczba zdolnych do życia bakterii 50; 44; (liczone w 2 powtórzeniach);
- 90s – liczba zdolnych do życia bakterii 35; 39; (liczone w 2 powtórzeniach);

Redukcja liczby zdolnych do życia bakterii > 99,9% w porównaniu do liczby wyjściowej bakterii.

Staphylococcus sp.,

Liczba drobnoustrojów w testowanej zawiesinie bakteryjnej $2,4 \times 10^8$ cfu/ml

- 30s – liczba zdolnych do życia bakterii 300; 280; (liczone w 2 powtórzeniach);
- 60s – liczba zdolnych do życia bakterii 60; 57; (liczone w 2 powtórzeniach);
- 90s – liczba zdolnych do życia bakterii 48; 45; (liczone w 2 powtórzeniach).

Redukcja liczby zdolnych do życia bakterii > 99,9 % w porównaniu do liczby wyjściowej bakterii.

W urządzeniu ze stanowiskiem do naświetlania jaj diodami LED zwiększono prześwit w obudowie części ruchomej naświetlarki. Badania przeprowadzono przy stałej prędkości obrotowej rolek wynoszącej 4 obr·min⁻¹. Podczas wykonywania badań z 5 zamocowanych diod LED uruchamiano tylko 4 z każdej strony naświetlanego jajka.

Podsumowanie

Naświetlanie skorup jaj promieniami LED przez 30, 60, 90 s powodowało redukcję liczby bakterii o 99,9% w stosunku do próby kontrolnej (jaj nie poddanych naświetlaniu).

Z uwagi na uzyskane wyniki badań należy sądzić, iż są one tylko pilotażowe i koniecznym i uzasadnionym działaniem jest przeprowadzenie kolejnych rozszerzonych badań przy zastosowaniu większej liczby szczepów, różnych rodzajów jajek oraz stosowanych kombinacji ustawień naświetlarki.

Bibliografia

- Bryżys J. Wzór oceny możliwości komercjalizacji projektu badawczego. Załącznik nr 3.
- Drabik K., Batkowska J., Kanadys N. Najważniejsze czynniki wpływające na przechowalniczą jakość jaj konsumpcyjnych. *Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce, Nauki przyrodnicze fauna i hodowla zwierząt MN . Młodzi Naukowcy, Poznań 2020*
- Jarczyk A., Płocharski W.: *Technologia produktów owocowo-warzywnych*, Wyd. WSEH w Skierniewicach, 2010
- Panas K., Łukaszewicz A. Innowacyjne podejście do projektowania linii technologicznej do pakowania produktów z uwzględnieniem aspektów ergonomicznych (artykuł został wykonany w ramach pracy S/WM/1/2013 realizowanej w Politechnice Białostockiej)
- Przegląd i analiza rynku jajek w 2025 [Global Report]. <https://foodcom.pl/przegląd-i-analiza-rynku-jajek-w-2025-global-report/> (data pobrania 1.10.2025)
- Tomczyk Ł., Szablewski T., Cegielska- Radziejewska R. Wartość odżywcza jaj konsumpcyjnych pozyskiwanych od kur niosek utrzymywanych w różnych systemach. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 6 ;109, 20–27, 2016
- <https://mmgastro.pl/pl/menu/kategorie/przybory-kuchenne-i-drobny-sprzet/naswietlacze-do-jaj-5418> (data pobrania 1.10.2025)
- https://www.mechanik.media.pl/pliki/do_pobrania/artykuly/15/26_panas_innowacyjne.pdf (dostęp w dniu 29.11.2024)

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

ORCID: Krzysztof Jadwisieńczak 0000-0001-7804-7675

ORCID: Dariusz J. Choszcz 0000-0002-3119-9038

ORCID: Joanna Majkowska-Gadomska 0000-0003-1693-0248

BEZPIECZEŃSTWO W ŁAŃCUCHU DOSTAW I JEGO WPŁYW NA ROZWÓJ RYNKU E-COMMERCE

Maciej Kuboń^{1,2}, Agnieszka Dudziak³, Grzegorz Zajac⁴, Tomasz Słowik⁴

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

² Wydział Nauk Technicznych i Sztuk Projektowych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyślu

³ Zakład Logistyki i Zarządzania Przedsiębiorstwem, Katedra Energetyki i Środków Transportu, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

⁴ Katedra Energetyki i Środków Transportu, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

Wprowadzenie

Współczesne systemy logistyczne odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu przedsiębiorstw oraz całych łańcuchów dostaw¹. Ich sprawność i niezawodność decyduje o efektywności procesów produkcyjnych, dystrybucyjnych oraz o poziomie obsługi klienta. Jednakże, pomimo zaawansowania technologicznego i organizacyjnego, systemy logistyczne są narażone na różnego rodzaju zakłócenia. Zakłócenia te mogą mieć charakter wewnętrzny lub zewnętrzny i wpływają negatywnie na ciągłość przepływu materiałów, informacji oraz środków finansowych. Celem niniejszej pracy jest omówienie istoty zakłóceń w systemach logistycznych, ich przyczyn, skutków oraz sposobów przeciwdziałania im.

W ostatnich latach światowy system gospodarczy został wystawiony na poważne próby, których skutki w sposób szczególnie uwiarygodniły się w funkcjonowaniu globalnych łańcuchów dostaw. Pandemia COVID-19, która wybuchła na przełomie 2019 i 2020 roku, doprowadziła do masowych zakłóceń w przepływach towarów, surowców oraz komponentów na skalę bezprecedensową. Wprowadzenie ograniczeń w przemieszczaniu się ludności, czasowe zamykanie zakładów produkcyjnych, niedobory siły roboczej oraz zatory w transporcie morskim i lądowym spowodowały, że łańcuchy dostaw, dotychczas traktowane jako stabilne, zaczęły wykazywać poważne oznaki słabości. Dodatkowym czynnikiem destabilizującym stała się pełnoskalowa inwazja Federacji Rosyjskiej na Ukrainę w 2022 roku, która zakłóciła funkcjonowanie sieci logistycznych w Europie oraz doprowadziła do kryzysu energetycznego i gwałtownego wzrostu cen surowców.

¹ Owsiak, Z., Płocienniczak, M., Biskupski, A., Weber, R., Włodek, S., Logistyka zaopatrzenia gospodarstw rolnych w wybrane środki produkcji. Inżynieria Rolnicza, 17(3, t. 2), 275-284, 2013

Wydarzenia te uwiarydociły fakt, że zarządzanie łańcuchami dostaw w warunkach globalizacji wymaga od przedsiębiorstw nie tylko optymalizacji kosztowej², lecz także budowania odporności (*resilience*) i zdolności adaptacyjnych. Współczesne organizacje muszą stawiać czoła coraz bardziej złożonym i dynamicznym zagrożeniom, obejmującym zarówno czynniki ekonomiczne, polityczne, technologiczne, jak i środowiskowe³. W tym kontekście wzrosło znaczenie zarządzania ryzykiem w logistyce, planowania scenariuszowego, dywersyfikacji źródeł dostaw oraz wdrażania nowoczesnych technologii cyfrowych umożliwiających lepsze monitorowanie i reagowanie na zmiany w otoczeniu⁴.

Tematyka zakłóceń w globalnych łańcuchach dostaw oraz ich wpływu na działalność przedsiębiorstw jest obecnie przedmiotem intensywnych badań naukowych i analiz praktycznych.

W dzisiejszych czasach, kiedy rynek mocno zdominowany jest przez globalizację, rozwój technologii i ciągłą presję na obniżanie kosztów, firmy muszą inaczej podchodzić do zarządzania swoimi działaniami. Tradycyjne modele logistyczne, zamknięte w obrębie jednej organizacji, coraz częściej są zastępowane przez podejście oparte na łańcuchu dostaw⁵. W tym nowym podejściu produkcja i dystrybucja traktowane są jako jeden, wspólny proces. Różne firmy, choć niezależne, współpracują ze sobą, żeby dostarczyć wartość końcowemu klientowi. Łańcuch dostaw stał się więc ważnym elementem zarządzania strategicznego – chodzi tu przede wszystkim o sprawne koordynowanie przepływu towarów, informacji i pieniędzy. Jak wskazuje Bielecki „globalizacja sprawiła, że logistyka i łańcuchy dostaw stały się jednym z ważniejszych elementów konkurencyjności przedsiębiorstw”⁶.

W literaturze przedmiotu łańcuch dostaw definiowany jest jako „sieć organizacji zaangażowanych, poprzez powiązania z dostawcami i odbiorcami, w różne procesy i działania, które tworzą wartość w postaci produktów i usług dostarczanych ostatecznym konsumentom”⁷. W tym kontekście łańcuch dostaw jest spójnym systemem połączeń, w którym efektywność każdego ogniwa wpływa na sprawność całego systemu, „procesy organizacyjne firmy bazowej muszą być skoordynowane z procesami pozostałych partnerów w łańcuchu dostaw”⁸. Jak zauważa Kołosowski i Józwiak „...każdy dowolny łańcuch dostaw charakteryzuje się

² Juściński, S., Innowacyjne ujęcie zarządzania logistycznego obsługą techniczną pojazdów i maszyn rolniczych. Zarządzanie Przedsiębiorstwem/Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, (4), 12-24, 2012

³ Kapuścińska, K. Z., Lachiewicz, S., & Matejun, M. (Eds.), Współczesne organizacje wobec wyzwań zarządzania ryzykiem: aspekty poznawcze. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015

⁴ Bukowska-Piestrzyńska, A., Doński-Lesiuk, J., Karkowski, T. A., Motowidlak, U., Adaptacyjność łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Studium na przykładzie produktów leczniczych i wyrobów medycznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022

⁵ Szymczak M., Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw w czasach turbulencji, zakłóceń i niestabilnej gospodarki, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań, <https://wydawnictwo.ue.poznan.pl/book.html?isbn=978-83-8211-250-4#streszczenie>, 2025

⁶ Bielecki, M., Total Logistic Management. Logistyka i łańcuchy dostaw 4.0. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022

⁷ Christopher, M., Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw. Polskie Centrum Doradztwa Logistycznego, 2000

⁸ Bril, J., Łukasik, Z., Logistyka w przedsiębiorstwie. TTS Technika Transportu Szybowego, 19, 2012

pewną kombinacją firm, przy czym każda z nich spełnia w nim określoną rolę...”⁹. Takie spojrzenie świadczy o tym, że funkcjonowanie firmy to nie osobna jednostka, a element większej całości- systemu kooperujących ze sobą wielu podmiotów.

Istota i rodzaje zakłóceń

Zakłócenia w systemach logistycznych definiuje się jako nieprzewidziane zdarzenia powodujące odchylenia od zaplanowanego przebiegu procesów logistycznych. Mogą one prowadzić do opóźnień, przerw lub dezorganizacji w przepływie towarów i informacji. Wyróżnia się dwa podstawowe typy zakłóceń: wewnętrzne, wynikające z działalności samego przedsiębiorstwa, oraz zewnętrzne, spowodowane czynnikami niezależnymi, np. sytuacją na rynku, pogodą czy zdarzeniami losowymi¹⁰.

Do najczęstszych rodzajów zakłóceń zalicza się:

- Zakłócenia techniczne – awarie maszyn, uszkodzenia pojazdów, przerwy w dostawie energii;
- Zakłócenia organizacyjne – błędy w planowaniu, brak koordynacji między działami, niewłaściwe zarządzanie zapasami;
- Zakłócenia informacyjne – błędne dane, brak komunikacji, opóźnienia w przepływie informacji;
- Zakłócenia transportowe – wypadki, korki, niekorzystne warunki atmosferyczne;
- Zakłócenia rynkowe – nagłe zmiany popytu, wzrost cen surowców, brak dostępności komponentów;
- Zakłócenia nadzwyczajne – katastrofy naturalne, konflikty zbrojne, pandemia¹¹.

Zakłócenia w logistyce mogą wynikać z wielu różnych przyczyn. Najczęściej pojawiają się w wyniku braku elastyczności w planowaniu i zarządzaniu zapasami, zbyt dużej zależności od jednego dostawcy lub niedostosowania infrastruktury technicznej do skali działalności¹². Często przyczyną są również błędy ludzkie, niewystarczające kwalifikacje pracowników czy nieadekwatne procedury operacyjne. Współczesne systemy logistyczne są także silnie uzależnione od technologii informatycznych, dlatego wszelkie awarie systemów ERP, WMS czy TMS mogą prowadzić do poważnych przestojów. Nie bez znaczenia pozostają także czynniki makroekonomiczne, takie jak inflacja, zmiany przepisów celnych czy polityka handlowa.

Rodzaje zakłóceń w łańcuchach dostaw

Zakłócenia w łańcuchach dostaw to sytuacje, które powodują nieprzewidziane przerwy, opóźnienia lub zmiany w przepływie materiałów, informacji i środków finansowych między

⁹ Kołosowski, A., Józwiak, A., Zrównoważony łańcuch dostaw. Systemy Logistyczne Wojsk, 38, 129-140, 2012

¹⁰ Korbiel, T., Czerwiński, S., Kania, J., Utrzymanie ruchu oraz eksploatacja maszyn w przemyśle 4.0. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, 12(1), 137-151, 2023

¹¹ Szczaniecka, E., Smarzyńska, N., Logistyka wyprzedzająca, czyli innowacyjne podejście do branży e-commerce. Journal of TransLogistics, 4(1), 2018

¹² Konecka, S., Ryzyko zakłóceń w zarządzaniu łańcuchami dostaw. Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu: Poznań, Poland, 2015

elementami łańcucha. W literaturze istnieje wiele definicji zakłóceń, Kramarz definiuje zakłócenia jako „nieprzewidziane lub przewidziane zdarzenia, które naruszają zaplanowane procesy lub stabilność organizacji”¹³. W dobie rosnącej globalizacji i złożoności sieci dostaw, coraz ważniejsze staje się umiejętne rozpoznawanie i klasyfikowanie różnych typów zakłóceń jako element skutecznego zarządzania. Ze względu na funkcjonowanie w obecnych czasach firm w bardzo dynamicznej, niepewnej i złożonej rzeczywistości „to modyfikacja łańcuchów dostaw powinna skłaniać ku takiemu ich projektowaniu, aby w razie potrzeby spełniały wymogi dostosowania do gwałtownie zmieniających się poziomów oraz struktury podaży i popytu”¹⁴.

Podstawowy podział wyróżnia zakłócenia wewnętrzne (endogeniczne) i zewnętrzne (egzogeniczne). Te pierwsze mają swoje źródło w działaniach samej firmy lub jej bezpośrednich partnerów i obejmują np. awarie sprzętu, błędy pracowników, braki kadrowe, problemy z jakością czy złe zarządzanie zapasami. Zakłócenia zewnętrzne są natomiast wynikiem czynników zewnętrznych, jak klęski żywiołowe, sytuacje polityczne, zmiany prawne lub pandemia¹⁵.

Maternowska zaproponowała podział na trzy podstawowe źródła zakłóceń:

„1. losowe zdarzenia operacyjne, takie jak: awarie sprzętu i błędy systemu, braki w ciągłości zaopatrzenia spowodowane np. bankructwem dostawcy lub strajkiem w jego firmie itp.,

2. katastrofy naturalne (trzęsienia ziemi, huragany, powodzie),

3. działania celowe, nakierowane na wywołanie zakłóceń, w tym m.in. terroryzm i problem niestabilności politycznej.”¹⁶.

Szymonik i Bielecki zaproponowali podział na cztery działy występowania zagrożeń¹⁷, zgodnie z tabelą 1.

Tabela 1. Podział zagrożeń w łańcuchach dostaw

Zagrożenia w łańcuchu dostaw	
Miejsce zagrożenia - podsystem	Drogi transportowych Punktów modalnych Zaopatrzenia, produkcji Dystrybucji, transportu Kształtowania zapasów Obsługi opakowań Obsługi zamówień klienta

¹³ Kramarz, M., Modelowanie podwykonawstwa w sieci dystrybucji z odroczoną produkcją. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej–Transport, (84), 55-67, 2012

¹⁴ Bukowska-Piestrzyńska, A., Doński-Lesiuk, J., Karkowski, T. A., Motowidlak, U., Adaptacyjność łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Studium na przykładzie produktów leczniczych i wyrobów medycznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022

¹⁵ Gaschi-Uciecha, A., Zakłócenia w procesach logistycznych przedsiębiorstw produkcyjnych-badania literaturowe. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, (78), 131-141, 2015

¹⁶ Maternowska, M., Ryzyko zakłóceń: niezawodność/podatność na zakłócenia versus koszty/zyski w łańcuchach dostaw. Logistyka, 5, 2006

¹⁷ Bielecki, M., Szymonik, A., Bezpieczeństwo systemu logistycznego w nowoczesnym zarządzaniu. Difin SA, 2015

Zagrożenia w łańcuchu dostaw	
	Informacyjny, mediów, transmisyjnych, zarządzania
Czas trwania zagrożenia	Pojedyncze, sporadyczne Długotrwałe, narastające Powtarzające się
Własności fizyczne zagrożenia	Materialne Informacyjne Energetyczne Niematerialne
Zasięg zagrożenia	Lokalny rozległy

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Szymonik i Bielecki, 2015)

Chopra i Sodhi w roku 2004 skategoryzowali rodzaje ryzyka związanego z łańcuchami dostaw i ich przyczyn¹⁸ zgodnie z tabelą 2.

Tabela 2. Kategorie ryzyka związane z łańcuchem dostaw i ich przyczyny

Kategoria ryzyka	Czynniki ryzyka
Zakłócenia	Kłęska żywiołowa Spór pracowniczy Bankructwo dostawcy Wojna i terroryzm Uzależnienie się od jednego źródła dostaw oraz od możliwości i szybkości reakcji dostawców alternatywnych
Opóźnienia	Wysokie wykorzystanie mocy produkcyjnych u źródła dostaw Nieelastyczność źródła zaopatrzenia Niska jakość lub wydajność w źródle zaopatrzenia Nadmierna obsługa związana z przekraczaniem granic lub zmianą środka transportu
Systemy	Awaria infrastruktury informacyjnej Integracja systemów lub rozległe sieci systemów Handel elektroniczny
Prognozy	Niedokładne prognozy z powodu długich terminów realizacji, sezonowości Różnorodność produktów, krótkie cykle życia, mała baza klientów „Efekt byka” lub zniekształcenie informacji z powodu promocji sprzedaży, zachęt, braku widoczności łańcucha dostaw oraz wyolbrzymianie popytu w okresach niedoboru produktów
Własność intelektualna	Pionowa integracja łańcucha dostaw Globalny outsourcing i rynki Zamówienia publiczne Ryzyko kursowe Procentowy udział kluczowych komponentów lub surowców pozyskiwanych z jednego źródła

¹⁸ Chopra, S., Sodhi, M. S., Supply-chain breakdown. MIT Sloan management review, 46(1), 53-61, 2004

Kategoria ryzyka	Czynniki ryzyka
	Wykorzystanie mocy produkcyjnych w całej branży Kontrakty długoterminowe i krótkoterminowe
Należności	Liczba klientów Siła nabywcza klientów
Zapasy	Stopień przestarzałości produktów Koszt utrzymania zapasów Wartość produktów Niepewność popytu i podaży
Zdolności produkcyjne	Koszt zdolności produkcyjnej Elastyczność zdolności produkcyjnych

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Chopra i Sodhi, 2004)

Coraz większą uwagę poświęca się również zakłóceniom technologicznym i cyfrowym. Jak zaznaczają autorzy publikacji na portalu erp-view.pl cyfrowe rozwiązania w biznesie, choć aktualnie bardzo popularne, zwiększają prawdopodobieństwo cyberataków. W miarę jak firmy wdrażają coraz więcej cyfrowych narzędzi, rośnie potrzeba zabezpieczania systemów informacyjnych przed awariami, opóźnieniami aktualizacji czy problemami z łącznością¹⁹.

Innym podejściem jest przyjrzenie się źródłom zakłóceń. Jezierska wymienia takie czynniki jak nieprzewidywalność popytu, brak elastyczności w produkcji, ograniczony wybór dostawców czy trudności wynikające z globalnego zasięgu sieci dostaw. Zakłócenia mogą być też efektem błędów strategicznych – na przykład zbytnej koncentracji produkcji w jednym miejscu lub braku planów awaryjnych²⁰.

Badania pokazują, że pewne branże są szczególnie narażone na problemy- m.in. sektor spożywczy (ze względu na krótki termin ważności produktów), farmaceutyczny (z powodu restrykcyjnych przepisów), motoryzacyjny (wymóg *just-in-time*) czy e-commerce (gdzie liczy się błyskawiczna realizacja zamówień). Jak pisze Dendera-Gruszka i in. „czynniki wpływających na zakłócenia w łańcuchu dostaw jest bardzo wiele i są one zależne od charakteru i specyfiki łańcucha dostaw oraz od ilości ogniw i podmiotów biorących udział w przepływie dóbr i towarów”²¹.

W ostatnich latach coraz częściej mówi się o tzw. efekcie domina- czyli sytuacji, w której pozornie niewielkie problemy w jednym miejscu prowadzą do dużych zakłóceń w całym systemie. Dobrym przykładem są opóźnienia w dostawach komponentów z Azji, które wpływają na produkcję w Europie. Dlatego tak ważne jest wdrażanie mechanizmów wczesnego ostrzegania i budowanie odporności (*resilience*) np. przez dywersyfikację dostawców, automatyzację czy przenoszenie produkcji bliżej rynków docelowych.

¹⁹ <https://www.erp-view.pl/erp/30772-bezpieczenstwo-w-systemach-erp-zagrozenia-i-zapobieganie.html> (data dostępu 28.10.2015)

²⁰ Jezierski, A., Zarządzanie łańcuchami dostaw żywności w czasie pandemii COVID-19–wybrane problemy. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki, 7(2), 51-66, 2022

²¹ Dendera-Gruszka, M., Kulińska, E., Wojtynek, L., Masłowski, D., Analiza zakłóceń w zakresie zwinnych łańcuchów dostaw. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 18, 2017

Podsumowując, zakłócenia w łańcuchach dostaw mogą przyjmować różne formy i mieć bardzo zróżnicowane źródła- od tych wewnętrznych po zewnętrzne, od operacyjnych po katastrofalne, od technicznych po informacyjne. Kluczowe dla firm jest ich skuteczne rozpoznawanie i klasyfikowanie, ponieważ to stanowi podstawę do budowy systemów odpornych i zdolnych do elastycznego działania w zmiennym otoczeniu. Nie da się jednak w stu procentach wyeliminować występowania zakłóceń, gdyż „wraz ze złożonością łańcucha dostaw wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia ryzyka w każdym z jego ogniw”²².

Aby ograniczyć ryzyko występowania zakłóceń oraz zminimalizować ich skutki, stosuje się różnorodne metody i strategie. Należą do nich m.in.:

- zarządzanie ryzykiem logistycznym, polegające na identyfikacji potencjalnych zagrożeń i opracowaniu planów awaryjnych,
- dywersyfikacja dostawców i tras transportowych,
- utrzymywanie buforów bezpieczeństwa w postaci zapasów lub rezerw mocy produkcyjnych,
- wdrażanie nowoczesnych systemów informatycznych wspierających planowanie i monitorowanie procesów,
- szkolenia i procedury awaryjne dla personelu,
- analiza danych i monitorowanie w czasie rzeczywistym, które pozwalają na szybkie reagowanie na odchylenia od normy.

Przykłady z ostatnich lat, takie jak pandemia COVID-19 czy zablokowanie Kanału Sueskiego w 2021 roku, pokazały, jak duże znaczenie ma przygotowanie logistyczne i zdolność adaptacji do nieprzewidzianych sytuacji.

Zarządzanie ryzykiem w łańcuchach dostaw

W dzisiejszych czasach łańcuchy dostaw działają w środowisku pełnym niepewności, złożoności i dynamicznych zmian. Globalizacja, wahania popytu, klęski żywiołowe, napięcia geopolityczne czy postęp technologiczny sprawiają, że firmy coraz częściej muszą stawiać czoła różnego rodzaju zagrożeniom. Według niektórych badaczy „ryzyko zakłóceń w łańcuchu dostaw uznawane jest jako mierzalne prawdopodobieństwo wystąpienia poszczególnych zakłóceń”²³. Dlatego właśnie zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw (*Supply Chain Risk Management - SCRM*) staje się jednym z kluczowych elementów zarządzania na poziomie strategicznym.

Zarządzanie ryzykiem w tym kontekście obejmuje „identyfikację, ocenę, kontrolę i monitorowanie ryzyka na każdym etapie procesu”²⁴. Jacak i Pigoń określają ten proces jako

²² Stanek-Kowalczyk, A., Skowronek-Mielczarek, A., Zajkowska, M., Effect Of The Pandemic On Sustainable Development of Enterprises. In Proceedings of FEB Zagreb International Odyssey Conference on Economics and Business (Vol. 3, No. 1, pp. 989-1007). University of Zagreb, Faculty of Economics and Business, 2021

²³ Bukowska-Piestrzyńska, A., Doński-Lesiuk, J., Karkowski, T. A., Motowidlak, U., Adaptacyjność łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Studium na przykładzie produktów leczniczych i wyrobów medycznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2020

²⁴ Klamerek, J., Kutnik, K., Zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw: jak minimalizować straty i poprawić efektywność transportu. Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie, 37(2), 163-169, 2023

„identyfikację i kierowanie ryzykiem w ogniwach składających się na łańcuch dostaw i ryzyka tworzonych w nim procesów, które poprzez zintegrowane działania ogniw tworzących łańcuch dostaw są związane z przepływem towarów/usług i informacji”²⁵.

Podstawą skutecznego działania w tym zakresie jest dobra klasyfikacja możliwych ryzyk. Jak zwraca uwagę Dendera- Gruszka „źródłem ryzyka w zarządzaniu łańcuchami dostaw może być każdy czynnik, który w końcowej fazie przyniesie niekorzystny efekt dla organizacji bądź element uważany za zagrożenie lub niepewność dla podmiotu, ale w konsekwencji skutek okaże się pozytywny”²⁶. Jednym z popularnych podejść do zarządzania ryzykiem jest tzw. cykl zarządzania, który obejmuje: identyfikowanie zagrożeń, ich ocenę, opracowywanie strategii postępowania, wdrażanie środków zapobiegawczych i reagowanie na pojawiające się problemy.

Jak mówi Leończuk „dzięki zapewnieniu odpowiedniego dostępu do informacji, przejrzystości działania i zaufaniu we wzajemnych relacjach pomiędzy partnerami, którzy wspólnie ustalają i realizują cele”²⁷.

W praktyce korzysta się z wielu narzędzi, takich jak analiza SWOT, FMEA, analiza scenariuszowa, klasyfikacja ABC/XYZ, mapy ryzyka czy ocena dostawców. Stosowanie takich narzędzi powinno być dostosowane do specyfiki branży i złożoności łańcucha dostaw. Przykładowo, w branży FMCG istotne są zagrożenia związane z popytem i logistyką, a w farmacji - z wymogami regulacyjnymi i jakością.

Strategie radzenia sobie z ryzykiem dzielą się na cztery grupy: unikanie, redukcję, transfer oraz akceptację ryzyka. W przypadku zagrożeń kluczowych warto postawić na różnicowanie źródeł dostaw, tworzenie buforów zapasów, długoterminowe umowy czy cyfryzację procesów. Ogromne jest znaczenie automatyzacji, systemów ERP i narzędzi predykcyjnych w minimalizowaniu skutków zakłóceń²⁷.



Rysunek 1. Odporny łańcuch dostaw - elementy składowe

Źródło: (Bukowska-Piestrzyńska, Doński-Lesiuk, Karkowski i Motowidlak, 2022)

²⁵ Jacak, A., Pigoń, J., Zarządzanie ryzykiem w łańcuchach dostaw. Zarządzanie Ryzykiem w logistyce i finansach, 61, 2016

²⁶ Kulińska, E., Dendera-Gruszka, M., Zarządzanie ryzykiem łańcuchów dostaw. Difin, 2019

²⁷ Leończuk, D., Ocena dokonanych adaptacyjnego łańcucha dostaw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2019

Firmy mogą wzmacniać swoją odporność poprzez inwestycje w nowe technologie, rozwijanie relacji z kluczowymi partnerami, zwiększanie przejrzystości działań oraz wdrażanie planowania scenariuszowego.

Nowym kierunkiem jest również zrównoważone zarządzanie ryzykiem (*sustainable risk management*), które łączy aspekty ekonomiczne, społeczne i środowiskowe. Zgodnie z tym co pisze Ocicka „nadrzędnym celem podmiotów gospodarczych staje się budowanie zdolności do zarządzania ryzykiem i odporności na kryzysy, w tym w odniesieniu do ryzyka związanego ze zmianami klimatu oraz wobec kryzysu klimatycznego”²⁸. Tego rodzaju podejście zyskuje szczególne znaczenie w kontekście zmian klimatycznych i społecznych wyzwań.

Podsumowując, zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw to obszar, który rozwija się dynamicznie i nabiera coraz większego znaczenia w obliczu globalnych zawirowań. Głównie wyzwaniem to włączenie działań związanych z ryzykiem w codzienną działalność operacyjną oraz budowanie struktur, które będą zarówno elastyczne, jak i odporne na zmiany oraz świadome potencjalnych zagrożeń. Jak mówi Staniewska „...połączenia istniejące między gospodarkami różnych krajów mogą tak oddziaływać, że zakłócenia, które spowodują nawet niewielki spadek produkcji w jednym państwie, mogą wpłynąć w istotny sposób na globalne łańcuchy dostaw i produkcję w innych państwach...”²⁹.

Zakłócenia łańcucha dostaw dla rynku e-commerce

Zakłócenia w globalnych łańcuchach dostaw stanowią jedno z najpoważniejszych wyzwań dla współczesnego rynku e-commerce, który opiera się na efektywnym i zintegrowanym systemie przepływu towarów, informacji i usług pomiędzy producentami, dystrybutorami a konsumentami. Stabilność łańcucha dostaw jest kluczowym czynnikiem umożliwiającym sprawne funkcjonowanie handlu elektronicznego, a wszelkie jego zakłócenia mogą prowadzić do znacznych trudności operacyjnych, finansowych i wizerunkowych dla podmiotów działających w tym sektorze.

Jak już wspomniano wcześniej, w ostatnich latach zjawisko to przybrało na sile, głównie w wyniku globalnych kryzysów, takich jak pandemia COVID-19, konflikty zbrojne (m.in. wojna w Ukrainie) czy rosnące napięcia geopolityczne w Azji. Dodatkowym czynnikiem destabilizującym stały się zmiany klimatyczne, które coraz częściej zakłócają transport morski i lądowy. Konsekwencją tych zjawisk są m.in. ograniczenia produkcji, braki komponentów, wzrost kosztów transportu oraz wydłużenie czasu realizacji zamówień. W kontekście e-commerce, który bazuje na szybkości i przewidywalności dostaw, takie utrudnienia mają szczególnie dotkliwy charakter.

Skutkiem zakłóceń jest wydłużenie terminów dostaw i obniżenie jakości obsługi klienta. Konsumenci, przyzwyczajeni do ekspresowych wysyłek, zaczynają wykazywać mniejszą lojalność wobec marek, które nie są w stanie sprostać ich oczekiwaniom³⁰. Dodatkowo wzrost kosztów surowców, energii oraz transportu zmusza przedsiębiorstwa do podnoszenia cen lub

²⁸ Ocicka, B., Zarządzanie zakupami w dążeniu do zrównoważonego rozwoju działalności przedsiębiorstwa w kontekście ESG. *Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów*, (197), 203-213, 2024

²⁹ Staniewska, E., Wybrane aspekty zarządzania bezpieczeństwem łańcuchów dostaw. *Systemy Logistyczne Wojsk*, 54(1), 135-148, 2021

³⁰ Gulc, A., Relacyjny model systemu kształtowania jakości usług kurierskich w branży e-commerce. *Politechnika Białostocka. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej*, 2020

redukcji marży, co negatywnie wpływa na ich rentowność. W wielu przypadkach obserwuje się również problemy z dostępnością towarów, co prowadzi do utraty zaufania klientów oraz spadku sprzedaży.

Zakłócenia w łańcuchu dostaw wpłynęły także na zmianę postaw konsumenckich. Nabywcy coraz częściej zwracają uwagę na lokalne pochodzenie produktów oraz stabilność dostawców, co sprzyja rozwojowi rynku krajowego i skracaniu łańcuchów logistycznych³¹. W odpowiedzi na te wyzwania przedsiębiorstwa e-commerce intensyfikują inwestycje w nowe technologie, takie jak systemy zarządzania zapasami oparte na sztucznej inteligencji, analityka predykccyjna czy automatyzacja procesów magazynowych. Rozwiązania te pozwalają na szybsze reagowanie na zmiany rynkowe oraz minimalizowanie skutków nieprzewidzianych przerw w dostawach.

W dłuższej perspektywie czasowej zakłócenia w łańcuchach dostaw mogą paradoksalnie przyczynić się do zwiększenia odporności sektora e-commerce. Wiele przedsiębiorstw dąży obecnie do dywersyfikacji źródeł zaopatrzenia, relokacji produkcji bliżej rynków zbytu oraz budowy własnych centrów logistycznych³². Takie działania mają na celu ograniczenie zależności od globalnych sieci transportowych i zapewnienie większej stabilności operacyjnej.

Dlatego też zakłócenia w łańcuchu dostaw stanowią istotny czynnik kształtujący współczesny rynek e-commerce. Choć w krótkiej perspektywie generują one liczne trudności, takie jak wzrost kosztów, opóźnienia w realizacji zamówień czy utratę zaufania klientów, to w dłuższym okresie mogą przyczynić się do transformacji branży w kierunku większej elastyczności, innowacyjności i zrównoważonego rozwoju. W tym kontekście kryzysy logistyczne można postrzegać nie tylko jako zagrożenie, lecz również jako impuls do budowania bardziej odpornych i nowoczesnych modeli biznesowych w handlu elektronicznym.

Podsumowanie

Zakłócenia w systemach logistycznych są nieuniknione, ale można skutecznie ograniczać ich wpływ poprzez zarządzanie ryzykiem, elastyczne planowanie oraz wykorzystanie nowoczesnych technologii. Przedsiębiorstwa, które potrafią szybko reagować i dostosowywać się do zmian, zyskują przewagę konkurencyjną nawet w warunkach kryzysowych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz teoretycznych sformułowano następujące wnioski:

- Globalne zakłócenia w łańcuchach dostaw stanowią realne zagrożenie dla funkcjonowania współczesnych organizacji. W szczególności dotyczy to firm o międzynarodowym zasięgu działalności, dla których nawet lokalne zakłócenia mogą wywoływać efekt domina w skali całego systemu logistycznego;
- Najistotniejsze zakłócenia identyfikowane przez badane przedsiębiorstwo mają charakter zarówno zewnętrzny, jak i wewnętrzny. Do najczęściej wskazywanych należą: opóźnienia w dostawach komponentów, fluktuacje cen surowców, zmiany prawno-regulacyjne,

³¹ Bukowska-Piestrzyńska, A., Doński-Lesiuk, J., Karkowski, T. A., Motowidlak, U., Adaptacyjność łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Studium na przykładzie produktów leczniczych i wyrobów medycznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022

³² Kuboń, M., Koszty infrastruktury logistycznej w przedsiębiorstwach rolniczych. Inżynieria Rolnicza, 12, 125-136, 2008

ograniczenia transportowe, a także problemy z planowaniem zapasów i niewystarczająca dywersyfikacja źródeł zaopatrzenia;

- Wpływ zakłóceń na działalność operacyjną przedsiębiorstwa jest wielowymiarowy i obejmuje zarówno aspekt kosztowy, jak i czasowy oraz wizerunkowy. Zidentyfikowano m.in. wzrost kosztów operacyjnych, opóźnienia w realizacji zamówień, trudności w utrzymaniu ciągłości produkcji oraz spadek satysfakcji klientów;
- Współczesne firmy coraz częściej wdrażają szereg działań zaradczych mających na celu minimalizację skutków zakłóceń, takich jak: dywersyfikacja dostawców, zwiększenie zapasów bezpieczeństwa, rozwój kompetencji pracowników w zakresie zarządzania kryzysowego oraz wzmacnianie systemów informatycznych wspierających decyzje logistyczne;
- Wzrasta świadomość zagrożeń związanych z globalnymi zakłóceniami natomiast skuteczność dotychczas podejmowanych działań jest umiarkowana, i wskazuje jednocześnie potrzebę dalszego rozwoju strategii zarządzania ryzykiem oraz inwestycji w rozwiązania zwiększające elastyczność i odporność organizacyjną;
- Znaczenie proaktywnego zarządzania ryzykiem w łańcuchach dostaw powinno być integralną częścią strategii każdego nowoczesnego przedsiębiorstwa. Kluczowe znaczenie mają tutaj: monitoring otoczenia, rozwój relacji z partnerami biznesowymi oraz cyfryzacja procesów logistycznych;
- Pomimo wielu wyzwań, jakie stwarzają zakłócenia w łańcuchu dostaw, organizacje posiadające zintegrowane i elastyczne systemy zarządzania wykazują większą zdolność adaptacyjną i szybciej odzyskują stabilność operacyjną.

Zakłócenia w systemach logistycznych są zjawiskiem nieuniknionym, wynikającym z dynamicznego i złożonego charakteru współczesnych łańcuchów dostaw. Ich skuteczne zarządzanie wymaga elastyczności, odpowiednich narzędzi informatycznych oraz świadomości ryzyka na każdym poziomie organizacji. Przedsiębiorstwa, które potrafią szybko reagować na zakłócenia i wyciągać wnioski z wcześniejszych doświadczeń, zyskują przewagę konkurencyjną oraz zwiększają odporność na przyszłe kryzysy. W dobie globalizacji i rosnącej niepewności, zdolność do zarządzania zakłóceniami staje się jednym z kluczowych czynników sukcesu w logistyce.

Podsumowując należy stwierdzić, że globalne zakłócenia w łańcuchu dostaw są zjawiskiem trwałym, a ich skala i intensywność wymagają od organizacji kompleksowego podejścia do zarządzania ciągłością działania. Przyszłość zarządzania logistyką i łańcuchami dostaw będzie w coraz większym stopniu zależna od poziomu odporności organizacyjnej, umiejętności adaptacyjnych oraz zdolności do przewidywania i reagowania na zmienne uwarunkowania otoczenia globalnego.

Bibliografia

- Bielecki, M., Total Logistic Management. Logistyka i łańcuchy dostaw 4.0. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022
- Bielecki, M., Szymonik, A., Bezpieczeństwo systemu logistycznego w nowoczesnym zarządzaniu. Difin SA, 2015
- Bril, J., Łukasik, Z., Logistyka w przedsiębiorstwie. TTS Technika Transportu Szynowego, 19, 2015

- Bukowska-Piastrzyńska, A., Doński-Lesiuk, J., Karkowski, T. A., Motowidlak, U., Adaptacyjność łańcuchów dostaw we współczesnej gospodarce. Studium na przykładzie produktów leczniczych i wyrobów medycznych. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2022
- Chopra, S., Sodhi, M. S., Supply-chain breakdown. MIT Sloan management review, 46(1), 53-61, 2004
- Christopher, M., Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw. Polskie Centrum Doradztwa Logistycznego, 2000
- Dendera-Gruszka, M., Kulińska, E., Wojtynek, L., Masłowski, D., Analiza zakłóceń w zakresie zwinnych łańcuchów dostaw. Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, 18, 2017
- Gaschi-Uciecha, A. Zakłócenia w procesach logistycznych przedsiębiorstw produkcyjnych - badania literaturowe. Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie/Politechnika Śląska, (78), 131-141, 2015
- Gulc, A., Relacyjny model systemu kształtowania jakości usług kurierskich w branży e-commerce. Politechnika Białostocka. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2020
- Jacak, A., Pigoń, J., Zarządzanie ryzykiem w łańcuchach dostaw. Zarządzanie Ryzykiem w logistyce i finansach, 61, 2020
- Jeziński, A., Zarządzanie łańcuchami dostaw żywności w czasie pandemii COVID-19—wybrane problemy. Zeszyty Naukowe Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Ekonomika i Organizacja Logistyki, 7(2), 51-66, 2022
- Juściński, S., Innowacyjne ujęcie zarządzania logistycznego obsługą techniczną pojazdów i maszyn rolniczych. Zarządzanie Przedsiębiorstwem/Polskie Towarzystwo Zarządzania Produkcją, (4), 12-24, 2012
- Kapuścińska, K. Z., Lachiewicz, S., Matejun, M. (Eds.), Współczesne organizacje wobec wyzwań zarządzania ryzykiem: aspekty poznawcze. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015
- Klamerek, J., Kutnik, K., Zarządzanie ryzykiem w łańcuchu dostaw: jak minimalizować straty i poprawić efektywność transportu. Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie, 37(2), 163-169, 2023
- Kołosowski, A., Józwiak, A., Zrównoważony łańcuch dostaw. Systemy Logistyczne Wojsk, 38, 129-140, 2012
- Konecka, S., Ryzyko zakłóceń w zarządzaniu łańcuchami dostaw. Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu: Poznań, Poland, 2015
- Korbiel, T., Czerwiński, S., & Kania, J., Utrzymanie ruchu oraz eksploatacja maszyn w przemyśle 4.0. Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji, 12(1), 137-151, 2023
- Kramarz, M., Modelowanie podwykonawstwa w sieci dystrybucji z odroczoną produkcją. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej—Transport, (84), 55-67, 2012
- Kuboń, M., Koszty infrastruktury logistycznej w przedsiębiorstwach rolniczych. Inżynieria Rolnicza, 12, 125-136, 2008
- Kulińska, E., Dendera-Gruszka, M., Zarządzanie ryzykiem łańcuchów dostaw. Difin., 2019
- Leończuk, D., Ocena dokonania adaptacyjnego łańcucha dostaw. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, 2019
- Maternowska, M., Ryzyko zakłóceń: niezawodność/podatność na zakłócenia versus koszty/zyski w łańcuchach dostaw. Logistyka, 5, 2006
- Ocicka, B., Zarządzanie zakupami w dążeniu do zrównoważonego rozwoju działalności przedsiębiorstwa w kontekście ESG. Studia i Prace Kolegium Zarządzania i Finansów, (197), 203-213, 2024
- Owsiak, Z., Płocienniczak, M., Biskupski, A., Weber, R., Włodek, S., Logistyka zaopatrzenia gospodarstw rolnych w wybrane środki produkcji. Inżynieria Rolnicza, 17(3, t. 2), 275-284, 2013
- Sczaniecka, E., Smarzyńska, N., Logistyka wyprzedzająca, czyli innowacyjne podejście do branży e-commerce. Journal of TransLogistics, 4(1), 2018
- Stanek-Kowalczyk, A., Skowronek-Mielczarek, A., Zajkowska, M., Effect Of The Pandemic On Sustainable Development of Enterprises. In Proceedings of FEB Zagreb International Odyssey Conference on Economics and Business (Vol. 3, No. 1, pp. 989-1007). University of Zagreb, Faculty of Economics and Business, 2021

Staniewska, E., Wybrane aspekty zarządzania bezpieczeństwem łańcuchów dostaw. Systemy Logistyczne Wojsk, 54(1), 135-148, 2021

Szymczak M., Logistyka i zarządzanie łańcuchem dostaw w czasach turbulencji, zakłóceń i niestabilnej gospodarki, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Poznaniu, Poznań, <https://wydawnictwo.ue.poznan.pl/book.html?isbn=978-83-8211-250-4#streszczenie>, 2025

<https://www.erp-view.pl/erp/30772-bezpieczenstwo-w-systemach-erp-zagrozenia-i-zapobieganie.html> (data dostępu 28.10.2015)

Adres do korespondencji: agnieszka.dudziak@up.lublin.pl

ORCID: Maciej Kuboń 0000-0003-4847-8743

ORCID: Agnieszka Dudziak 0000-0002-4884-5403

ORCID: Grzegorz Zając 0000-0003-4090-9334

ORCID: Tomasz Słowik 0000-0001-9449-2234

ZASTOSOWANIE METODY FMEA DO OCENY NIEZAWODNOŚCI MASZYN W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM

**Magdalena Lemecha¹, Dariusz J. Choszcz¹, Michał Janulin¹, Krzysztof Ligier¹,
Paweł Mikołajczak¹**

¹ Katedra Pojazdów i Maszyn, Wydział Nauk Technicznych, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Wprowadzenie

Współczesne przedsiębiorstwa produkcyjne funkcjonują w warunkach charakteryzujących się cyfryzacją, automatyzacją i integracją procesów dzięki technologiom, sztucznej inteligencji oraz systemom cyber-fizycznym (CPS)^{1,2}. Kluczowym wyzwaniem staje się zapewnienie wysokiej niezawodności maszyn i procesów produkcyjnych poprzez precyzyjną diagnostykę predykcyjną, tj. prognozowanie awarii na podstawie monitoringu stanu maszyn. Wprowadzenie „predykcyjnego utrzymania ruchu” umożliwi minimalizować nieplanowane przestoje oraz skrócić średni czas naprawy (MTTR), co bezpośrednio przekłada się na wzrost efektywności operacyjnej i obniżenie kosztów^{3,4,5}. Metody takie jak analiza drgań czy termowizja umożliwiają wczesne wykrywanie symptomów zużycia⁶.

Utrzymanie ruchu obejmuje działania zapewniające ciągłość pracy linii produkcyjnej poprzez utrzymanie maszyn w odpowiednim stanie technicznym. Jak podkreśla literatura,

¹ Kurylas P., Diagnostyka napędów w Przemysle 4.0–kompleksowe podejście do niezawodności maszyn. Napędy i Sterowanie, 26, 2024

² Shaheen B. W., Németh I., Integration of maintenance management system functions with industry 4.0 technologies and features A review. Processes, 10(11), 2173, 2022

³ Corrales L. d. C. N., Lambán M. P., Korner M. E. H., Royo J., Overall equipment effectiveness: systematic literature review and overview of different approaches. Applied Sciences, 10(18), 6469, 2020

⁴ Salonen A. and Gopalakrishnan M., Practices of preventive maintenance planning in discrete manufacturing industry. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 27(2), 331-350, 2020

⁵ Cheah C. K., Prakash J., Ong K. S., An integrated OEE framework for structured productivity improvement in a semiconductor manufacturing facility. International Journal of Productivity and Performance Management, 69(5), 1081-1105, 2020

⁶ Kurylas, Diagnostyka napędów w Przemysle 4.0–kompleksowe podejście do niezawodności maszyn

celem utrzymania ruchu jest przede wszystkim zagwarantowanie założonych zdolności produkcyjnych oraz jakości wyrobów⁷. Odpowiednie strategie utrzymania ruchu przekładają się na redukcję wad procesowych i defektów oraz stabilność parametrów produkcji. W praktyce oznacza to też zachowanie powtarzalności i precyzji procesów wytwarzania maszyn utrzymanych w stałym, optymalnym stanie technicznym, co wpływa na minimalizację liczby wyrobów niespełniających wymagań jakościowych. Pleskot i in. 2015 wykazują, że działania związane z utrzymaniem maszyn muszą zapewnić ciągłość pracy i utrzymanie jakości wyrobów przy minimalnych kosztach⁸. Stabilność parametrów procesu technologicznego jest utrzymywana poprzez cykliczne przeglądy techniczne oraz planowe działania konserwacyjne, które minimalizują ryzyko wystąpienia krytycznych odchyłeń w kalibracji układów pomiarowych i wykonawczych maszyn.

Odpowiednio realizowane utrzymanie ruchu znacząco wpływa na efektywność ekonomiczną zakładu. Wysoka awaryjność maszyn generuje znaczne straty finansowe: nawet niewielki spadek dostępności urządzeń może oznaczać wielomilionowe koszty oraz utratę klientów. Dlatego działania prewencyjne i predykcyjne pozwalają na zmniejszenie liczby nieplanowanych przestojów, co bezpośrednio podnosi wskaźniki OEE (*Overall Equipment Effectiveness*), czyli dostępność i wydajność linii produkcyjnych. Implementacja w przedsiębiorstwie strategii TPM (*Total Productive Maintenance*) lub RCM (*Reliability-Centered Maintenance*) skutkuje mierzalnymi efektami operacyjnymi, takimi jak redukcja wskaźnika awaryjności, skrócenie czasu przestojów oraz racjonalizacja gospodarki częściami zamiennymi. TPM to kompleksowa koncepcja zaangażowania wszystkich pracowników w utrzymanie ruchu. Zakłada ona systematyczne eliminowanie strat (wadliwych partii, przestojów czy usterek) i ciągłe doskonalenie procesów. Praktyka TPM przynosi wymierne efekty: wpływa na wzrost wydajności linii, poprawia jakość produktów oraz obniża koszty operacyjne. RCM z kolei skupia się na utrzymaniu ruchu zorientowanym na niezawodność, definiując priorytetowe funkcje maszyn i planując działania serwisowe w oparciu o analizę przyczyn powstawania wad (m.in. FMEA)⁹.

Zastosowanie tych strategii w praktyce oznacza:

- Wzrost dostępności maszyn (OEE): Mniej awarii i szybsze naprawy skracają łączne czasy przestojów, co zwiększa realną zdolność produkcyjną.
- Optymalizacja zapasów: Dzięki lepszemu planowaniu przeglądów i dostępności części zamiennych redukuje się zapasy materiałów eksploatacyjnych, co ogranicza koszty magazynowania.
- Redukcja kosztów utrzymania: Systematyczne utrzymanie ruchu minimalizuje koszty związane z nagłymi, kosztownymi remontami oraz awariami.
- Obniżenie MTTR i wydłużenie MTBF: Skuteczne procedury serwisowe skracają średni czas napraw (MTTR), a dobrze zaplanowana konserwacja wydłuża średni czas między awariami (MTBF).

⁷ Mikołajczyk J., Wykorzystanie analizy FMEA we współczesnej koncepcji utrzymania ruchu (RCM). Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie, (61), 85-100, 2013

⁸ Pleskot M., Lewandowski J., Wiśniewski Z., TPM: Kompleksowe utrzymanie ruchu w przedsiębiorstwie. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2015

⁹ Mikołajczyk, Wykorzystanie analizy FMEA we współczesnej koncepcji utrzymania ruchu (RCM)

Ponadto, poprzez szybsze przywracanie sprawności maszyn, możliwe jest lepsze wykorzystanie zasobów produkcyjnych i ograniczenie kosztów operacyjnych. Zauważono, że niewystarczające zarządzanie obszarem utrzymania ruchu prowadzi do istotnego wzrostu kosztów operacyjnych obejmujących robociznę, zużycie mediów oraz surowców sięgającego nawet kilkudziesięciu procent, co negatywnie wpływa na rentowność inwestycji w rozwój zdolności produkcyjnych. Utrzymanie ruchu na odpowiednim poziomie jest więc kluczowe dla zachowania rentowności, bowiem poprawa procesów produkcji i logistyki może być „zniweczona”, jeśli techniczne standardy utrzymania są na niskim poziomie.

Odpowiednie utrzymanie techniczne maszyn przekłada się także na wyższą efektywność organizacyjną firmy. Stabilna praca sprzętu umożliwia wiarygodne planowanie wielkości i terminów produkcji oraz lepsze wypełnianie zobowiązań wobec klientów. W strategii utrzymania ruchu często wymieniane są cele takie jak poprawa efektywności i niezawodności oraz usprawnienie obiegu informacji. W efekcie działu produkcyjne zyskują możliwość bardziej precyzyjnego planowania dostępnych mocy przerobowych, co minimalizuje ryzyko utraty klientów wynikające z opóźnień realizacyjnych lub niezgodności jakościowych dostaw. Z kolei przełożenie odpowiedniej polityki serwisowej na relacje z klientem przejawia się w terminowości realizacji zamówień i jakości dostarczanych wyrobów¹⁰. W celu osiągnięcia tych założeń ważne jest, aby szczególną uwagę zwrócić na:

- Planowanie produkcji: dokładna znajomość stanu technicznego maszyn pozwala na realistyczne planowanie zadań produkcyjnych.
- Relacje z klientami: mniejsza awaryjność i wysoka jakość dostaw zwiększają satysfakcję klientów.
- Koszty operacyjne: przemysłowe zarządzanie budżetem utrzymania ruchu ogranicza nadmiarowe wydatki. Strategiczne podejście wymaga osiągania założonych celów przy możliwie najniższych kosztach wewnętrznych.
- Strategia serwisowa: wykorzystanie narzędzi prognostycznych (np. monitorowania stanu maszyn) i analizy FMEA umożliwia wykrywanie problemów, co zwiększa konkurencyjność przedsiębiorstwa. Analiza efektów awarii umożliwia na kaskadowe planowanie działań konserwacyjnych, od operatorów po służby utrzymania, dla redukcji strat i podwyższenia efektywności ogólnej.

Praktyczne wsparcie dla utrzymania ruchu stanowią systemy CMMS (*Computerized Maintenance Management Systems*), które umożliwiają planowanie przeglądów, rejestrację awarii, zarządzanie magazynem części i analizę wskaźników technicznych. Wdrożenie CMMS jest kluczowe przy realizacji koncepcji TPM czy RCM, gdyż zapewnia wiarygodne dane o funkcjonowaniu maszyn. Dzięki temu przedsiębiorstwo może skuteczniej realizować normatywne standardy i dyrektywy (np. ISO, dyrektywę maszynową UE) oraz utrzymywać wysoki poziom bezpieczeństwa i jakości produkcji.

¹⁰ Corrales L. d. C. N., Lambán M. P., Korner M. E. H., Royo J., Overall equipment effectiveness: systematic literature review and overview of different approaches. *Applied Sciences*, 10(18), 6469, 2020

W tak złożonym środowisku bardzo istotne jest holistyczne podejście do zarządzania ryzykiem technicznym. Narzędziem wspierającym identyfikację i priorytetyzację potencjalnych przyczyn awarii jest analiza FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*)^{11,12,13}. Jest to strukturalna metoda oceny ryzyka, która umożliwia identyfikację potencjalnych kategorii awarii, ocenę ich skutków oraz opracowanie działań zapobiegawczych^{14,15}.

FMEA opiera się na trzech kryteriach: Severity – powaga skutków awarii (Z_n), Occurrence – częstotliwość występowania (C_z), Detection – możliwość wykrycia (W_y). Na ich podstawie obliczany jest Risk Priority Number – Wskaźnik Poziomu Ryzyka (WPR), który umożliwia hierarchizację zagrożeń. W nowoczesnym ujęciu, FMEA może być integrowana z systemami monitorowania danych w czasie rzeczywistym oraz algorytmami uczenia maszynowego (ML), co pozwala na dynamiczne aktualizowanie oceny ryzyka i szybsze reagowanie na zmiany w środowisku produkcyjnym. W badaniach Ajayi i in. (2025) zaproponowano hybrydowy model predykcyjny oparty na XGBoost i sieciach neuronowych, który skutecznie prognozował awarie maszyn na podstawie historii przestojów i czasu od ostatniej awarii. Metoda FMEA, opracowana w latach 50. XX w. dla lotnictwa, stała się powszechnie stosowanym narzędziem jakościowym i ilościowym dla szerokiej gamy branż¹⁶. Jej zastosowanie w przewidywaniu awarii i ocenie niezawodności może być dodatkowo wzbogacone o nowoczesne podejścia (np. systemy uczące się, sieci bayesowskie, logikę rozmytą) w duchu Przemysłu 4.0^{17,18}.

Systematyczna analiza ryzyka stała się podstawą nowoczesnych strategii utrzymania ruchu. Międzynarodowe normy jakości (jak ISO 9001:2015) i zarządzania ryzykiem (ISO 31000) kładą duży nacisk na podejście procesowe z identyfikacją i oceną zagrożeń. FMEA jest jedną z kluczowych metod wykorzystywanych na potrzeby analizy ryzyka w przedsiębiorstwach.

W praktyce przemysłowej FMEA stosuje się zarówno do analiz projektów nowych produktów, jak i procesów technologicznych. Metoda ta pozwala przewidzieć ryzyko wystąpienia usterek oraz ich następstwa, dzięki czemu organizacja może przejść do utrzymania predykcyjnego planując czynności prewencyjne na podstawie wcześniej zidentyfikowanych

¹¹ Wang L., Hu Y., Liu H., Shi H., A linguistic risk prioritization approach for failure mode and effects analysis: a case study of medical product development. *Quality and Reliability Engineering International*, 35(6), 1735-1752, 2019

¹² Anes V., Henriques E., Freitas M., Reis L., A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 34(4), 516-528, 2018

¹³ Oliveira U. R. d., Souza H. A. D. d., Menezes C. A. G., Rocha H. M., Straightening machine preventive maintenance intervention plan based on AHP: a case study in a steel company in Brazil. *Operations Management Research*, 16(3), 1577-1593, 2023

¹⁴ Ma X., Gu M., A Bayesian FMEA-Based Method for Critical Fault Identification in Stacker-Automated Stereoscopic Warehouses. *Machines*, 13(3), 242, 2025

¹⁵ Ivančan J., Lisjak D., Pavletić D., Kolar D., Improvement of failure mode and effects analysis using fuzzy and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Machines*, 11(7), 739, 2023

¹⁶ Anes, A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis

¹⁷ Mołęda M., Małysiak-Mrozek B., Ding W., Sunderam V., Mrozek D., From corrective to predictive maintenance – A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, 23(13), 5970, 2023

¹⁸ Ma, A Bayesian FMEA-Based Method for Critical Fault Identification in Stacker-Automated Stereoscopic Warehouses

kategoriі uszkodzeń^{19,20}. Kluczową cechą FMEA jest jej uniwersalność i użyteczność w całym cyklu życia produktu. Metodę tę można stosować na etapie projektowania, jak i w trakcie wdrażania produkcji i eksploatacji wyrobu. Zgodnie z praktyką, analiza FMEA produktu pozwala zidentyfikować „słabe punkty” wyrobu i zaproponować działania naprawcze zarówno przed jego wprowadzeniem na rynek, jak i podczas transportu czy serwisu. FMEA można stosować już na etapie koncepcji i rozwoju, a następnie aktualizować w fazie produkcji czy eksploatacji²¹. Dzięki temu przedsiębiorstwo buduje bazę wiedzy o niezawodności. Wiedzę tę można włączyć do systemów zarządzania informacją, co umożliwi kompleksową kontrolę stanu parku maszynowego. W erze Przemysłu 4.0 analizy FMEA bywają również łączone z technologiami cyfrowymi. Przykładowo, integracja wyników FMEA z cyfrowymi bliźniakami pozwala symulować wpływ wad i testować strategie utrzymaniowe w warunkach wirtualnych²². Ponadto zaawansowane systemy mogą automatycznie zaciągać dane o zakończonych działaniach prewencyjnych i adaptować macierze FMEA pod kątem nowych informacji, co pozwala doskonalić planowanie oraz działania związane z konserwacją maszyny. W konsekwencji FMEA staje się narzędziem strategicznym wspierającym podejmowanie decyzji o inwestycjach, doborze podzespołów i optymalizacji procesów, tak by osiągnąć wymaganą niezawodność i dostępność techniczną przy minimalnych kosztach.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że najważniejsze funkcje zarządzania utrzymaniem (np. harmonogram przeglądów, rejestr awarii, plan zapasów części) są silnie sterowane przez czujniki Internetu Rzeczy (IoT), algorytmy uczenia maszynowego i analitykę big data. Dzięki temu możliwe jest przejście od reaktywnego utrzymania do predykcyjnego. Systemy samoistnie wykrywają awarie i proponują przeprowadzenie analizy FMEA dla wykrytego trendu. Przykłady wdrożeń pokazują, że integracja FMEA z CMMS pozwala na dynamiczne aktualizacje wskaźnika poziomu ryzyka^{23,24}.

Dzięki FMEA możliwa jest nie tylko identyfikacja najbardziej ryzykownych przyczyn awarii (najwyższy RPN), ale i przydzielenie im priorytetów działań (rys. 1). W kontekście utrzymania ruchu pozwala to np. skierować dodatkowe zasoby na najkrytyczniejsze podzespoły lub zwiększyć częstotliwość ich inspekcji.

¹⁹ Khalil-Oliwa O., Przegląd systemów zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwach produkcyjnych notowanych na giełdzie papierów wartościowych w warszawie. Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series, 213-226, 2018

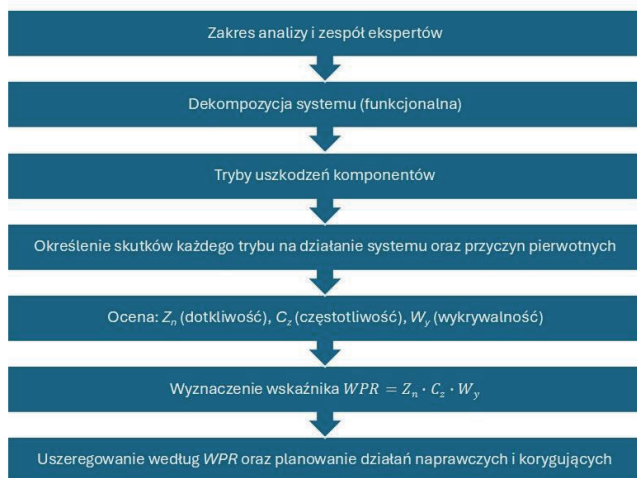
²⁰ Łopaciński M., T., Risk in managing innovation project. Kwartalnik Nauk O Przedsiębiorstwie, 47(2), 72-81, 2018

²¹ Nogalski B., Niewiadomski P., Implementacja metody fmea w elastycznym przedsiębiorstwie wytwórczym. Przegląd Organizacji, 4-12, 2016

²² Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F., Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 35(1), 80, 2022

²³ Zancul E., Takey S. M., Barquet A. P. B., Kuwabara L. H., Miguel P. A. C., Rozenfeld H., Business process support for iot based product-service systems (pss). Business Process Management Journal, 22(2), 305-323, 2016

²⁴ Thongtam N., Sinthupinyo S., Chandrachai A., Optimization of intelligent maintenance system in smart factory using state space search algorithm. Applied Sciences, 14(24), 11973, 2024



Rysunek 1. Schemat metodologii FMEA

Źródło: Opracowanie własne

W literaturze wskazuje się na korzyści wynikające z połączenia FMEA i Condition Monitoring. Diagnostyka predykcyjna dostarcza danych wejściowych (np. histogramy uszkodzeń, sygnały drgań) do oceny częstości (C_z), a techniki inżynierskie (np. drzewo przyczyn) pomagają przyporządkować i weryfikować przyczyny awarii. Tak zintegrowane podejście może wpłynąć na wzrost skuteczność prognozowania. Przyczyny o wysokim wpływie (Z_n) będą szybko identyfikowane dzięki wzorcom z monitoringu, co z kolei umożliwi zaplanowanie np. wymiany krytycznych części zanim wystąpi awaria²⁵.

Analiza FMEA odgrywa więc znaczącą rolę w przewidywaniu uszkodzeń części maszyn, co może przyczynić się do efektywnego planowania uzupełniania zapasów części zamiennych. Dzięki systematycznej identyfikacji potencjalnych kategorii awarii oraz oszacowaniu ich skutków, przedsiębiorstwa mogą prognozować, które elementy wymagają szczególnej uwagi i pilnej interwencji²⁶. Takie podejście umożliwia wcześniejsze wykrycie krytycznych usterek oraz zminimalizowanie ryzyka przestojów operacyjnych, co może prowadzić do optymalizacji stanów magazynowych poprzez precyzyjne określenie, kiedy i jakie części zamienne należy zamówić²⁷. W rezultacie, stosowanie metody FMEA wspiera nie tylko proces

²⁵ Johnson B., Staniewski G., Toms A. M., Failure mode and effect analysis and why it should be considered when establishing a condition monitoring program and writing astm test methods. Standard Guides and Practices That Support the Lubricant Condition Monitoring Industry, 22-31, 2022

²⁶ Dony Mahardhika, Hery M., Optimization of spare part inventory for mask production machines at pt. xyz to enhance productivity. J Statistika: Jurnal Ilmiah Teori Dan Aplikasi Statistika, 17(2), 721-729, 2024

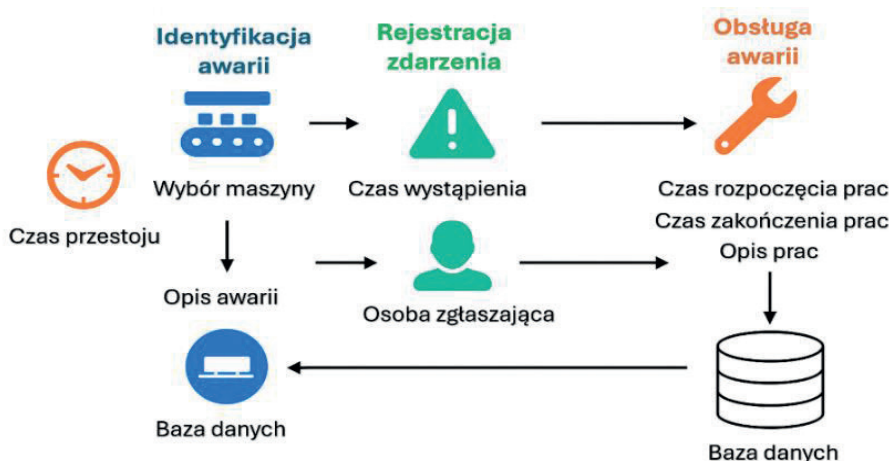
²⁷ Laia D. K., Herlina H., An inventory control of wuling car spare parts using a risk analysis approach. Jurnal Surya Teknik, 11(1), 2024

diagnostyczny, ale również decyzje dotyczące zarządzania zapasami, umożliwiając firmom dynamiczne reagowanie na potrzeby wynikające z przewidywanych uszkodzeń.

Rozwój Przemysłu 4.0 wymusza nowe podejście do niezawodności maszyn. W praktyce oznacza to szeroką integrację technologii cyfrowych IoT, cyber-fizycznych systemów (CPS) oraz sztucznej inteligencji w procesy produkcyjne²⁸. Umożliwia to efektywne monitorowanie stanu maszyn i analizę dużych wolumenów danych w czasie rzeczywistym, ale też zwiększa złożoność systemów i wymaga zaawansowanych narzędzi do ich integracji. Jak wskazują badania, cyfryzacja i automatyzacja (robotyzacja) procesów produkcyjnych oraz powszechne stosowanie rozwiązań typu „cyfrowy bliźniak” pozwalają na tworzenie otwartych, rozproszonych struktur wytwarzania (fabryk przyszłości). Taka architektura zwiększa możliwości monitoringu i diagnostyki maszyn, ale rodzi też liczne wyzwania. Konieczność integracji danych z różnorodnych źródeł sprawia, że metody tradycyjne nie wystarczają i potrzebne są narzędzia umożliwiające działanie na dużych zbiorach danych i modelowanie całego cyklu życia maszyn²⁹.

Metodyka badań

Celem badań była identyfikacja oraz analiza przyczyn i skutków występowania przestojów maszyn w przedsiębiorstwie produkcyjnym z wykorzystaniem metod inżynierii jakości - metody FMEA (rys. 2).



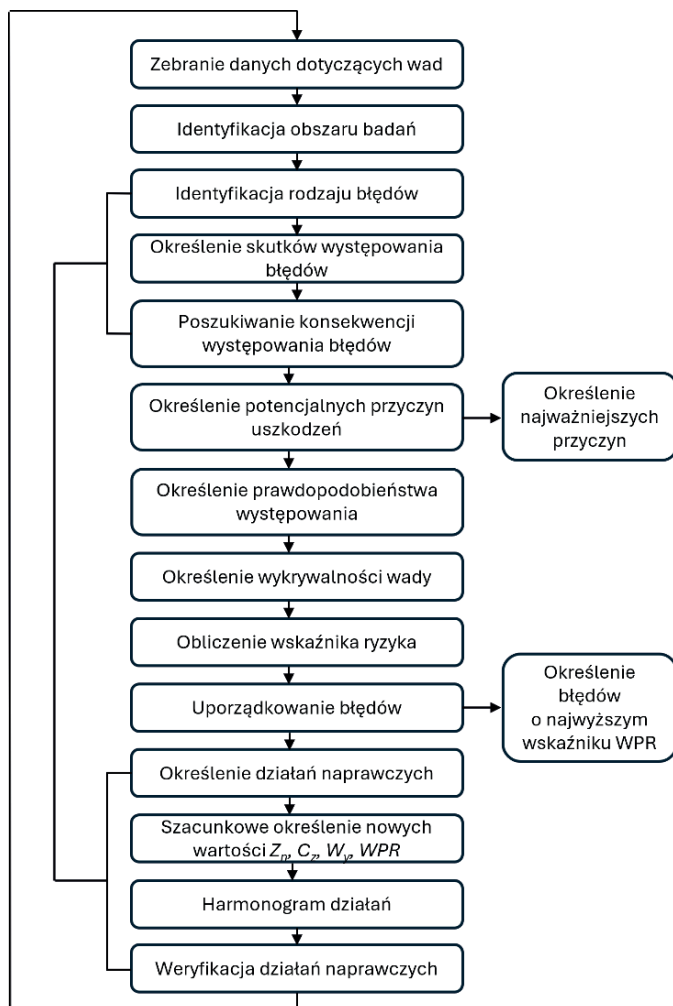
Rysunek 2. Schemat rejestrowania danych z awarii przedsiębiorstwa produkcyjnego

Źródło: (opracowanie własne)

²⁸ Farsi M. A., Zio E., Industry 4.0: some challenges and opportunities for reliability engineering. International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application, 2(1), 23-34, 2019

²⁹ Yang F., Zhu G., Zhu M., Xuan F., Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 35(1), 2022

Badania przeprowadzone w przedsiębiorstwie, którego działalność opiera się na produkcji podzespołów elektronicznych, miały na celu systematyczne rozpoznanie potencjalnych źródeł awarii oraz ocenę ich wpływu na ciągłość procesu produkcyjnego. Zebrane dane umożliwiły opracowanie działań prewencyjnych i korekcyjnych, których wdrożenie przyczyniło się do ograniczenia liczby oraz czasu trwania przestojów, a tym samym do zwiększenia efektywności operacyjnej przedsiębiorstwa. Do ewidencjonowania danych zastosowano algorytm rejestracji informacji o przestojach, umożliwiający gromadzenie i porządkowanie danych operacyjnych (rys. 3).



Rysunek 3. Schemat postępowania w metodzie FMEA

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Wolniak R., Skotnicka B. *Metody zarządzania jakością, teoria i praktyka*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej Gliwice, 2005)

Pierwszym etapem prowadzonych badań było zebranie danych dotyczących występujących wad i niezgodności. Proces ten obejmował analizę dostępnej dokumentacji oraz rejestrów zawierających informacje o dotychczasowych reklamacjach, awariach, błędach procesowych oraz innych przypadkach odstępstw od norm jakościowych. Dane te pochodziły zarówno z wewnętrznych systemów kontroli jakości, jak i zewnętrznych źródeł, takich jak opinie klientów czy raporty serwisowe. Zgromadzony materiał stanowił punkt wyjścia do dalszych analiz, umożliwiając precyzyjne określenie obszaru badań, czyli wskazanie konkretnego procesu technologicznego, maszyny, systemu lub produktu, który wymagał szczególnej oceny.

W kolejnym kroku dokonano identyfikacji rodzaju błędów, co polegało na systematycznym wskazaniu wszystkich możliwych usterek, jakie mogą wystąpić w analizowanym obszarze. Uwzględniono zarówno błędy typowe, często powtarzające się, jak i te rzadziej występujące, lecz potencjalnie istotne dla funkcjonowania systemu. Proces ten opierał się na analizie danych historycznych oraz wiedzy eksperckiej zespołu badawczego.

Następnie przeprowadzono ocenę skutków występowania zidentyfikowanych błędów. Analiza ta objęła zarówno aspekty techniczne i jakościowe, jak i wpływ na bezpieczeństwo użytkownika, niezawodność działania oraz ogólną efektywność funkcjonowania systemu lub przedsiębiorstwa. Szczególną uwagę poświęcono konsekwencjom występowania błędów w szerszym kontekście, uwzględniając ich wpływ na koszty operacyjne, reputację firmy, ciągłość produkcji oraz relacje z klientami i partnerami biznesowymi.

Kolejnym etapem było określenie potencjalnych przyczyn występowania uszkodzeń. W tym celu przeanalizowano czynniki technologiczne (np. parametry procesu), konstrukcyjne (np. projektowanie komponentów), materiałowe (np. jakość użytych surowców) oraz ludzkie (np. błędy operatorów, niewłaściwe procedury). Spośród wszystkich zidentyfikowanych przyczyn wyodrębniono te, które miały największy wpływ na powstawanie błędów, uznano je za kluczowe i stanowiące podstawę do dalszej i pogłębionej analizy.

W kolejnym kroku dokonano oceny prawdopodobieństwa występowania każdej z analizowanych wad oraz ich wykrywalności, czyli możliwości identyfikacji błędu przed przekazaniem produktu do użytkownika końcowego. Ocena ta miała na celu określenie, które błędy są najbardziej ryzykowne z punktu widzenia jakości i bezpieczeństwa, a także które z nich wymagają wdrożenia dodatkowych mechanizmów kontrolnych.

W ramach analizy FMEA uwzględniono trzy podstawowe czynniki wpływające na ocenę ryzyka: znaczenie skutku wady (Z_n), częstość jej występowania (W) oraz wykrywalność (W_k). Znaczenie skutku wady określa stopień wpływu uszkodzenia na działanie urządzenia lub systemu zarówno w kontekście technicznym, jak i użytkowym. Przyjętą skalę ocen skutków wady zestawiono w tabeli 1, co umożliwia obiektywną klasyfikację ryzyka i wspiera podejmowanie decyzji dotyczących działań korygujących i zapobiegawczych.

W przypadku bardzo małych wartości, oceniane uchybienia nie mają realnego wpływu na pracę urządzenia, często nawet są niezauważalne dla użytkownika. Wraz ze wzrostem oceny rośnie istotność wady od niewielkiego niezadowolenia klienta, poprzez przeciętne i duże niedomagania powodujące zauważalne pogorszenie funkcjonowania wyrobu, aż po wady krytyczne, które mogą naruszać bezpieczeństwo eksploatacji lub obowiązywać przepisy.

Tabela 1. Znaczenie skutków wady (Z_n)

Ocena	Znaczenie wady	Kryteria oceny
1	Bardzo małe	Niewielkie niedomaganie, niemające żadnego realnego wpływu na działanie urządzenia lub systemu. Klient prawdopodobnie nie zauważy wady.
2,3	Małe	Małe niedomaganie powodujące tylko lekkie niezadowolenie klienta. Klient prawdopodobnie odczytuje niewielki pogorszenie jakości wyrobu.
4,5,6	Przeciętne	Niedomaganie powoduje pewne niezadowolenie klienta. Klient doznaje niewygod lub jest zdenerwowany tą wadą, zauważa pogorszenie pracy.
7,8	Duże	Wysoki stopień niezadowolenia klienta spowodowany istotnym niedomaganiem wyrobu. Niedomaganie nie powoduje naruszenia bezpieczeństwa eksploatacji wyrobu lub przepisów administracyjnych.
9,10	Bardzo duże – krytyczne	Niedomaganie narusza bezpieczeństwo eksploatacji lub przepisy administracyjne

Drugim czynnikiem jest częstotliwość (C_z) występowania uszkodzenia, określająca prawdopodobieństwo jego pojawienia się. W tabeli 2 zestawiono kryteria oceny częstotliwości występowania uszkodzeń oraz przyjętą skalę ocen.

Tabela 2. Znaczenie skutków wady (C_z)

Ocena	Współczynnik uszkodzenia	Kryteria oceny
1	<1 na 106	Uszkodzenie jest nieprawdopodobne
2	1 na 20 000	Bardzo niewiele uszkodzeń
3	1 na 4000	Niewiele uszkodzeń
4	1 na 1000	Bardzo mało uszkodzeń
5	1 na 400	Mało uszkodzeń
6	1 na 80	Znacząca liczba uszkodzeń
7	1 na 40	Bardzo znacząca liczba uszkodzeń
8	1 na 20	Powtarzalne uszkodzenia
9	1 na 8	Uszkodzenie prawie nieuniknione
10	1 na 2	Uszkodzenie nieuniknione

Najniższe wartości odnoszą się do sytuacji, w których uszkodzenie jest praktycznie nieprawdopodobne, natomiast najwyższe do przypadków, gdy wystąpienie wady jest niemal pewne. Pomiędzy tymi skrajnościami wyróżnia się poziomy prawdopodobieństwa, od bardzo niewielkiej do powtarzalnej liczby uszkodzeń.

Trzecim czynnikiem uwzględnianym podczas badania było prawdopodobieństwo wykrycia wady (W_y). Kryteria oceny tego wskaźnika wraz z przyjętą w badaniach skalą ocen przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Prawdopodobieństwo wykrycia wady (W_y)

Ocena	Wykrywalność wady	Kryteria oceny
1,2	Bardzo wysoka	Działania kontrolne prawie na pewno wykryją istnienie uszkodzenia (proces automatycznie wykazuje uszkodzenie)
3,4	Wysoka	Działania kontrolne mają duże szanse wykrycia istnienie uszkodzenia
5,6	Przeciętna	Działania kontrolne mogą wykryć istnienie uszkodzenia
7,8	Niska	Działania kontrolne mają małą szansę wykrycia uszkodzenia
9	Bardzo niska	Działania kontrolne prawdopodobnie nie wykryją uszkodzenia
10	Nieemożliwa	Działania kontrolne nie wykryją uszkodzenia

Wysoka wykrywalność oznacza, że proces kontroli niemal na pewno wskaże występowanie uszkodzenia, natomiast wraz ze wzrostem wartości oceny maleje prawdopodobieństwo jego wykrycia od umiarkowanej, przez niską, aż po sytuację, w której wykrycie wady jest praktycznie niemożliwe.

Wymienione czynniki posłużyły do wyznaczenia wartości wskaźnika ryzyka (WPR), stanowiącego iloczyn ich wartości, zgodnie ze wzorem:

$$WPR = Z_n \cdot C_z \cdot W_y \quad (1)$$

gdzie:

- WPR – wskaźnik poziomu ryzyka,
- Z_n – znaczenie skutków uszkodzenia,
- C_z – częstotliwość wystąpienia uszkodzenia,
- W_y – prawdopodobieństwo wykrycia uszkodzenia.

Po dokonaniu obliczeń wskaźnika poziomu ryzyka, wszystkie zidentyfikowane błędy zostały uporządkowane według jego wartości. Umożliwiło to wyodrębnienie tych nieprawidłowości, które generowały najwyższe ryzyko dla jakości oraz niezawodności procesu, wskazując obszary wymagające działań korygujących. Dla błędów o najwyższych wartościach określono działania naprawcze, mające na celu eliminację przyczyn ich występowania lub ograniczenie skutków. Następnie dokonano oszacowania wartości wskaźników po wdrożeniu planowanych działań, co umożliwiło ocenę stopnia redukcji wartości wskaźnika poziomu ryzyka. Ostatnim etapem była weryfikacja skuteczności działań naprawczych, która pozwoliła potwierdzić, że wdrożone rozwiązania przyczyniły się do zmniejszenia prawdopodobieństwa występowania błędów oraz poprawy niezawodności analizowanego procesu.

Wyniki badań

Na podstawie przeprowadzonych analiz wskazano cztery główne kategorie przyczyn awarii, które w znacznym stopniu wpływały na ciągłość procesu produkcyjnego oraz jakość wytwarzanych produktów. Wśród nich wyróżniono awarie wynikające z przyczyn elektrycznych, obejmujące, między innymi, uszkodzenia instalacji, przewodów, czujników czy elementów sterujących. Kolejną grupę stanowiły awarie spowodowane wadami komponentów, które wynikały z błędów materiałowych, nieprawidłowego montażu, bądź zużycia elementów eksploatacyjnych. Trzecia kategoria to przyczyny organizacyjne, związane z niewłaściwym planowaniem, błędami ludzkimi, brakiem nadzoru lub niewystarczającym szkoleniem personelu. Ostatnią grupę stanowiły awarie o charakterze mechanicznym, obejmujące uszkodzenia podzespołów maszyn, zużycie elementów roboczych oraz inne defekty konstrukcyjne prowadzące do przestojów i obniżenia efektywności procesu produkcyjnego.

Wyniki przeprowadzonej analizy zestawiono w tabelach 4-7. Każda z tabel zawiera szczegółowe dane dotyczące potencjalnych usterek, skutków ich wystąpienia, możliwych przyczyn, a także ocen ryzyka w postaci współczynników: Z_n , C_z oraz W_y . Na tej podstawie obliczono wskaźnik poziomu ryzyka, którego wartość posłużyła do określenia priorytetów działań korygujących i zapobiegawczych. Zestawiono również wartości zredukowanego wskaźnika poziomu ryzyka, uzyskane po wdrożeniu rekomendowanych działań prewencyjnych.

Tabela 4. Analiza FMEA – awarie elektryczne

Potencjalna usterka	Skutki awarii	Przyczyna awarii	$Z_n/C_z/W_y/WPR$ (przed i po)	Zalecane działania
1) Awaria systemu transportowego	Przestój linii produkcyjnej	Kolizja wózków transportowych	10/5/8-400 10/4/6-240	Kontrola techniczna stanu wózków transportowych oraz ciągów komunikacyjnych
2) Nieprawidłowe pomiary z urządzeń termowizyjnych	Błędna klasyfikacja wyrobów	Utrata łączności pomiędzy systemami pomiarowymi a systemem sterowania maszyną	10/3/6-180 10/2/4-80	Okresowe kontrole stabilności połączeń systemów termowizyjnych przed rozpoczęciem cyklu produkcyjnego
3) Nadmierny odrzut komponentów	Wzrost liczby braków produkcyjnych	Nieprawidłowa kalibracja sensora	10/5/7-350 10/3/6-180	Wymiana sensora oraz przeprowadzenie kalibracji zgodnie z procedurą serwisową
4) Nieprawidłowy pomiar rezystancji komponentu	Błędne wyniki testów jakościowych	Zabrudzenie systemu pomiarowego	10/4/6-240 10/2/4-80	Czyszczenie i konserwacja systemu pomiarowego oraz regularne przeglądy

Tabela 5. Analiza FMEA – wady komponentu

Potencjalna usterka	Skutki awarii	Przyczyna awarii	Z _n /C _z /W _y /WPR (przed i po)	Zalecane działania
1) Blokowanie wyrobu na szynach transportowych	Przerwanie ciągłości procesu produkcyjnego	Zanieczyszczenia lub nagromadzenie odpadów produkcyjnych na szynach	10/7/7-490 10/5/5-250	Czyszczenie szyn transportowych oraz regularna kontrola ich stanu
2) Przekroczenie dopuszczalnych parametrów grubości materiału stosowanego w procesie produkcyjnym	Zwiększony odrzut komponentów oraz ryzyko wad produktu końcowego	Wada materiałowa – zastosowanie komponentów o niezgodnej grubości	10/5/9-450 10/3/8-240	Wymiana komponentu na nowy o parametrach zgodnych ze specyfikacją technologiczną
3) Blokowanie wyrobu w separatorze	Częste postoje maszyny, obniżenie wydajności procesu	Zanieczyszczenia lub nagromadzenie odpadów w separatorze	10/6/7-420 10/4/5-200	Czyszczenie separatora oraz okresowa kontrola podajnika
4) Niewłaściwa polaryzacja komponentów	Opóźnienia w pracy maszyny oraz ryzyko błędnego montażu	Nieprawidłowe ułożenie komponentów	10/5/8-400 10/3/7-210	Korekta polaryzacji komponentów
5) Zablockowanie komponentu w separatorze	Częste postoje maszyny oraz spadek efektywności linii produkcyjnej	Zanieczyszczony komponent lub pozostałości produkcyjne	10/6/7-420 10/4/5-200	Czyszczenie separatora oraz regularne monitorowanie czystości komponentów

Tabela 6. Analiza FMEA – wady komponentu

Potencjalna usterka	Skutki awarii	Przyczyna awarii	Z _n /C _z /W _y /WPR (przed i po)	Zalecane działania
1) Załadowanie niewłaściwego komponentu do maszyny przez operatora	Niewłaściwa praca maszyny, ryzyko uszkodzenia urządzenia lub wytworzenia niezgodnych produktów	Brak weryfikacji zgodności komponentu przez operatora przed załadunkiem	10/4/4-160 10/3/2-60	Kontrola zgodności komponentów przed montażem oraz przeszkolenie operatorów
2) Wprowadzenie niezgodnego komponentu do układu	Możliwość zanieczyszczenia systemu, powstania odrzutów i strat produkcyjnych	Błędna identyfikacja pojemników z wprowadzanym komponentem	10/3/4-120 10/3/3-90	Oznakowanie pojemników z komponentami oraz weryfikacja zgodności komponentów przed uruchomieniem procesu

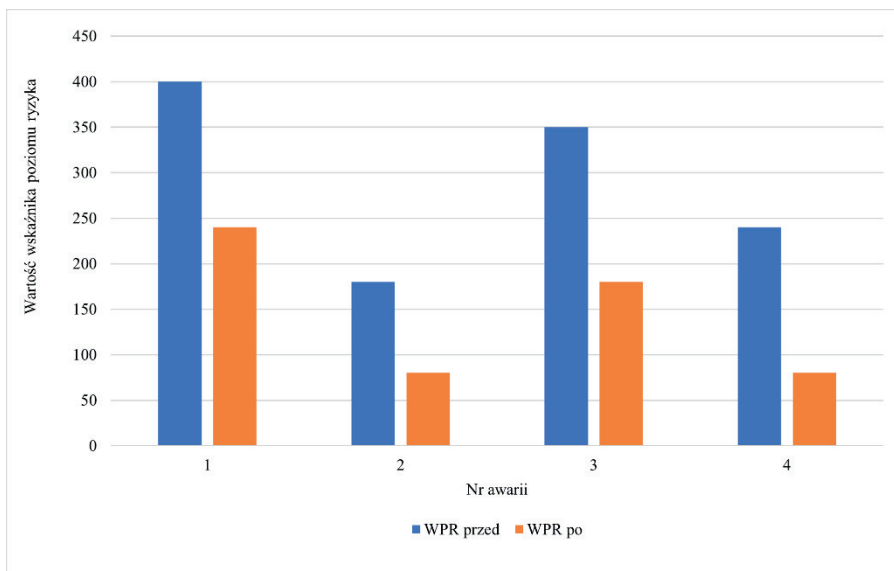
Potencjalna usterka	Skutki awarii	Przyczyna awarii	$Z_n/C_z/W_y/WPR$ (przed i po)	Zalecane działania
3) Opóźnienie w dostarczeniu komponentu do maszyny	Przestój w pracy linii produkcyjnej, obniżenie efektywności procesu	Brak skutecznej komunikacji pomiędzy operatorami a działem dystrybucji	10/4/3-120 10/3/2-60	Usprawnienie komunikacji między działami poprzez wdrożenie procedury wcześniejszego zamawiania komponentów i monitorowania zapasów

Tabela 7. Analiza FMEA – awarie mechaniczne

Potencjalna usterka	Skutki awarii	Przyczyna awarii	$Z_n/C_z/W_y/WPR$ (przed i po)	Zalecane działania
1) Kolizja ramienia maszyny z szynami transportującymi	Przestój maszyny, spadek wydajności produkcyjnej	Błąd oprogramowania	10/6/9 -540 10/4/7-280	Korekta położenia ramienia
2) Niewłaściwe działanie prasy	Wysoki odrzut	Zabrudzenie prasy resztkami komponentów	10/6/8-480 10/5/7-350	Czyszczenie elementów roboczych prasy
3) Błędne pozycjonowanie komponentu przez ramię	Częste postoje maszyny, wysoki odrzut	Luźne połączenia śrubowe ramienia	10/5/9-450 10/4/8-320	Regulacja połączeń śrubowych ramienia
4) Zablockowanie komponentu w systemie ślimakowym	Zatrzymanie maszyny	Zablokowanie elementu transportowego	10/4/7 -280 10/3/6-180	Odblokowanie mechanizmu ślimakowego oraz jego ponowna konfiguracja

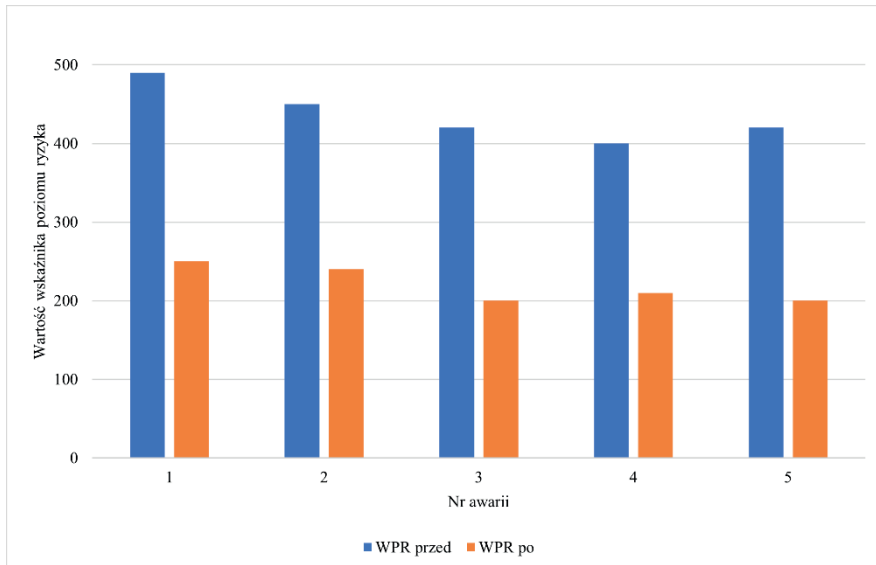
Szczegółowa analiza podstawowych czynników wpływających na ocenę ryzyka pozwala wyjaśnić przyczyny takiej dynamiki zmian. W większości rozpatrywanych przypadków znaczenie skutku zostało ocenione najwyżej (wartość 10), co oznacza, że wpływ skutków awarii na proces jest krytyczny i nie może być ignorowany. Zatem to częstość występowania i wykrywalność stanowią główne zmienne wpływające na wartość WPR i to właśnie poprzez redukcję tych współczynników osiągnięto znaczące obniżenie ryzyka w obszarach elektrycznych i komponentów. W praktyce oznacza to, że działania takie jak poprawa stabilności połączeń, kalibracje, czyszczenie urządzeń czy kontrole jakości dostaw komponentów skutecznie obniżają zarówno prawdopodobieństwo wystąpienia awarii, jak i łatwość jej wykrycia. Natomiast w przypadkach awarii mechanicznych część przyczyn wymaga działań o innym charakterze, do których zaliczyć można aktualizację oprogramowania, modyfikacje konstrukcji oraz urządzeń, wdrożenie systemów diagnostyki, a także cykliczne przeglądy i konserwacje, co może wpłynąć na szybkie obniżenie ryzyka do akceptowalnego poziomu.

Na rysunkach 4-7 przedstawiono wskaźnik poziomu ryzyka dla poszczególnych kategorii awarii, co umożliwia syntetyczne jego porównanie między analizowanymi kategoriami oraz ułatwia identyfikację obszarów, w których ryzyko występuje z największym natężeniem.



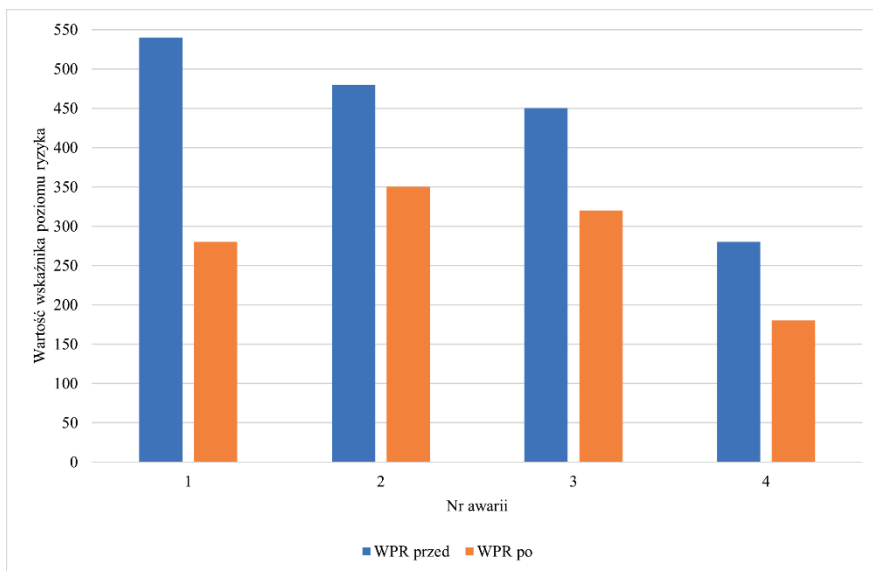
Rysunek 4. Wskaźnik poziomu ryzyka (*WPR*) przed i po zastosowaniu metody FMEA dla awarii elektrycznych

Źródło: opracowanie własne



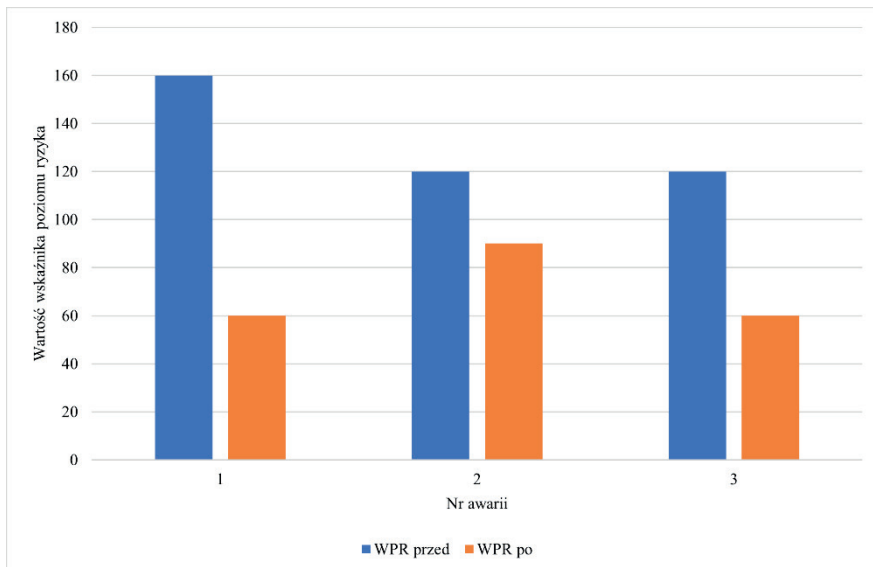
Rysunek 5. Wskaźnik poziomu ryzyka (*WPR*) przed i po zastosowaniu metody FMEA dla wad komponentu

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 6. Wskaźnik poziomu ryzyka (*WPR*) przed i po zastosowaniu metody FMEA dla awarii mechanicznych

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 7. Wskaźnik poziomu ryzyka (*WPR*) przed i po zastosowaniu metody FMEA dla awarii organizacyjnych

Źródło: opracowanie własne

Analiza występujących awarii wskazuje, że największymi problemami ocenianego procesu produkcyjnego przed wprowadzonymi zmianami były wady komponentu (rys. 5) oraz awarie mechaniczne (rys. 6). Skuteczność podjętych działań była najwyższa w obszarze awarii elektrycznych (rys. 4) i dotyczącym wad komponentów (rys. 5), gdzie metody takie jak regularne przeglądy, czyszczenie układów pomiarowych, kalibracje sensorów czy wymiana niezgodnych komponentów przełożyły się na zmniejszenie skumulowanego ryzyka o połowę. Również w obszarze organizacyjnym (rys. 7) odnotowano znaczące obniżenie wskaźnika poziomu ryzyka dzięki wprowadzeniu obowiązkowych procedur weryfikacji komponentów, oznakowania i szkoleń. Jednak poziom *WPR* początkowego był tu niższy, więc wprowadzone zmiany wpłynęły bardziej na poprawę jakości produkcji niż na eliminację dominującego źródła awaryjności.

W odróżnieniu od omówionych wyżej problemów procesu produkcyjnego, awarie mechaniczne wykazały najmniejsze obniżenie wartości wskaźnika poziomu ryzyka w odpowiedzi na zaproponowane działania. Mimo, że wprowadzane zmiany przyczyniły się do jego obniżenia, relatywnie wysoki poziom *WPR* wskazuje na potrzebę wdrożenia dodatkowych działań korygujących.

Podsumowanie

Zastosowanie analizy FMEA umożliwia kompleksowe, systematyczne i prewencyjne podejście do zarządzania jakością w przedsiębiorstwie. Dzięki identyfikacji potencjalnych zagrożeń oraz ich hierarchizacji według znaczenia i wpływu na proces, możliwe jest skoncentrowanie działań na najbardziej krytycznych obszarach. Takie podejście przekłada się bezpośrednio na wzrost niezawodności maszyn, stabilność procesów oraz jakość końcowych produktów.

Metoda FMEA wspiera również efektywną komunikację w zespołach interdyscyplinarnych, ułatwia podejmowanie racjonalnych decyzji oraz sprzyja ciągłemu doskonaleniu organizacji. W ramach etapu optymalizacji, na podstawie wyników oceny ryzyka, definiowane są konkretne działania korygujące i prewencyjne, których celem jest redukcja poziomu ryzyka oraz poprawa parametrów produktu i procesu.

Badania przeprowadzone w przedsiębiorstwie produkującym podzespoły elektroniczne wykazały, że integracja klasycznych metod zarządzania niezawodnością znacząco poprawia ciągłość procesu produkcyjnego i wskaźniki jakości. Analiza FMEA pozwoliła sklasyfikować przyczyny przestojów i przyporządkować je do czterech kategorii: elektryczne, wynikające z wad komponentów, organizacyjne i mechaniczne. Po wdrożeniu rekomendowanych działań, największą redukcję wskaźnika poziomu ryzyka osiągnięto w obszarach elektrycznych oraz wad komponentów (ok. 50% redukcji), podczas gdy awarie mechaniczne wymagają dalszych, bardziej złożonych działań.

Przeprowadzona analiza jednoznacznie wskazuje, że skuteczne utrzymanie ruchu stanowi kluczowy element zarządzania produkcją, mający bezpośredni wpływ na efektywność operacyjną przedsiębiorstwa. W obliczu rosnących wymagań rynkowych i presji na redukcję kosztów eksploatacyjnych, współczesne organizacje muszą łączyć klasyczne koncepcje niezawodności z nowoczesnymi technologiami cyfrowymi. Szczególne znaczenie zyskuje diagnostyka predykcyjna, która, wsparta analizą danych w czasie rzeczywistym oraz metodami

zarządzania jakością, umożliwia nie tylko wczesne wykrywanie symptomów zużycia, lecz także dynamiczne planowanie działań serwisowych i logistycznych. W tym kontekście istotną rolę odgrywa metoda FMEA, będąca jednym z fundamentalnych narzędzi inżynierii jakości. Dzięki systematycznej identyfikacji potencjalnych przyczyn awarii oraz ocenie ich skutków, FMEA wspiera zarządzanie ryzykiem technicznym i jakościowym. Jej zastosowanie umożliwia podejmowanie świadomych decyzji inwestycyjnych, logistycznych i eksploatacyjnych, co przekłada się na zwiększenie niezawodności systemów produkcyjnych.

Z perspektywy organizacyjnej, wdrożenie kompleksowych strategii utrzymania ruchu przyczynia się do ograniczenia liczby wad wyrobów, poprawy stabilności procesów oraz wzrostu konkurencyjności przedsiębiorstwa. W ujęciu strategicznym, utrzymanie ruchu przestaje być jedynie funkcją wspierającą produkcję, natomiast staje się integralnym komponentem systemu zarządzania jakością, logistyki i ryzyka.

Firmy, które potrafią efektywnie integrować wiedzę inżynierską z narzędziami analitycznymi i cyfrowymi, zyskują trwałą przewagę konkurencyjną opartą na wysokiej niezawodności, optymalizacji kosztów oraz elastyczności operacyjnej. W związku z tym rozwój nowoczesnych metod utrzymania ruchu, opartych m.in. na analizie FMEA, wyznacza kierunek dalszej ewolucji zarządzania produkcją w warunkach Przemysłu 4.0.

Bibliografia

- Anes, A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis
Anes V., Henriques E., Freitas M., Reis L., A new risk prioritization model for failure mode and effects analysis. *Quality and Reliability Engineering International*, 34(4), 516-528, 2018
- Cheah C. K., Prakash J., Ong K. S., An integrated OEE framework for structured productivity improvement in a semiconductor manufacturing facility. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 69(5), 1081-1105, 2020
- Corrales L. d. C. N., Lambán M. P., Komer M. E. H., Royo J., Overall equipment effectiveness: systematic literature review and overview of different approaches. *Applied Sciences*, 10(18), 6469, 2020
- Dony Mahardhika, Hery M., Optimization of spare part inventory for mask production machines at pt. xyz to enhance productivity. *J Statistika: Jurnal Ilmiah Teori Dan Aplikasi Statistika*, 17(2), 721-729, 2024
- Farsi M. A., Zio E., Industry 4.0: some challenges and opportunities for reliability engineering. *International Journal of Reliability, Risk and Safety: Theory and Application*, 2(1), 23-34, 2019
- Fu Y., Zhu G., Zhu M., Xuan F., Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 80, 2022
- Ivančan J., Lisjak D., Pavletić D., Kolar D., Improvement of failure mode and effects analysis using fuzzy and adaptive neuro-fuzzy inference system. *Machines*, 11(7), 739, 2023
- Johnson B., Staniewski G., Toms A. M., Failure mode and effect analysis and why it should be considered when establishing a condition monitoring program and writing astm test methods. *Standard Guides and Practices That Support the Lubricant Condition Monitoring Industry*, 22-31, 2022
- Khalil-Oliwa O., Przegląd systemów zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwach produkcyjnych notowanych na giełdzie papierów wartościowych w warszawie. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 213-226, 2018
- Kurylas P., Diagnostyka napędów w Przemysle 4.0 – kompleksowe podejście do niezawodności maszyn. *Napędy i Sterowanie*, 26, 2024

- Laia D. K., Herlina H., An inventory control of wuling car spare parts using a risk analysis approach. *Jurnal Surya Teknika*, 11(1), 2024
- Łopaciński M., T., Risk in managing innovation project. *Kwartalnik Nauk O Przedsiębiorstwie*, 47(2), 72-81, 2018
- Ma X., Gu M., A Bayesian FMEA-Based Method for Critical Fault Identification in Stacker-Automated Stereoscopic Warehouses. *Machines*, 13(3), 242, 2025
- Mikołajczyk J., Wykorzystanie analizy FMEA we współczesnej koncepcji utrzymania ruchu (RCM). *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Organizacja i Zarządzanie*, (61), 85-100, 2013
- Mołęda M., Małysiak-Mrozek B., Ding W., Sunderam V., Mrozek D., From corrective to predictive maintenance—A review of maintenance approaches for the power industry. *Sensors*, 23(13), 5970, 2023
- Nogalski B., Niewiadomski P., Implementacja metody fmea w elastycznym przedsiębiorstwie wytwórczym. *Przegląd Organizacji*, 4-12, 2016
- Oliveira U. R. d., Souza H. A. D. d., Menezes C. A. G., Rocha H. M., Straightening machine preventive maintenance intervention plan based on ahp: a case study in a steel company in Brazil. *Operations Management Research*, 16(3), 1577-1593, 2023
- Pleskot M., Lewandowski J., Wiśniewski Z., TPM: Kompleksowe utrzymanie ruchu w przedsiębiorstwie. *Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*, 2015
- Shaheen B. W., Németh I., Integration of maintenance management system functions with industry 4.0 technologies and features A review. *Processes*, 10(11), 2173, 2022
- Salonen A. and Gopalakrishnan M., Practices of preventive maintenance planning in discrete manufacturing industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(2), 331-350, 2020
- Thongtam N., Sinthupinyo S., Chandrachai A., Optimization of intelligent maintenance system in smart factory using state space search algorithm. *Applied Sciences*, 14(24), 11973, 2024
- Wang L., Hu Y., Liu H., Shi H., A linguistic risk prioritization approach for failure mode and effects analysis: a case study of medical product development. *Quality and Reliability Engineering International*, 35(6), 1735-1752, 2019
- Yang F., Zhu G., Zhu M., Xuan F., Digital twin for integration of design-manufacturing-maintenance: an overview. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 2022
- Zancul E., Takey S. M., Barquet A. P. B., Kuwabara L. H., Miguel P. A. C., Rozenfeld H., Business process support for iot based product-service systems (pss). *Business Process Management Journal*, 22(2), 305-323, 2016

Adres do korespondencji: magdalena.lemecha@uwm.edu.pl

ORCID: Magdalena Lemecha 0000-0002-2712-1131

ORCID: Dariusz J. Choszcz 0000-0002-3119-9038

ORCID: Michał Janulin: 0000-0003-3436-9079

ORCID: Krzysztof Ligier: 0000-0003-1348-7068

ORCID: Paweł Mikołajczak: 0000-0002-1455-9070

INŻYNIERIA WYTWARZANIA W BADANIACH NAD WPLYWEM MIKRODODATKÓW NA WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE BETONÓW OGNIOTRWAŁYCH

**Paulina Lachman¹, Maciej Kuboń^{2,3}, Dariusz Kwaśniewski², Elżbieta Olech²,
Karolina Furyk-Grabowska², Jakub Gajda², Rafał Kornas^{2,4}**

¹ Dyplomantka w Katedrze Inżynierii Produkcji, Logistyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

² Katedra Inżynierii Produkcji, Logistyki i Informatyki Stosowanej, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

³ Instytut Nauk Technicznych, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemyśle

⁴ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Chełmie

Wstęp

Materiały ogniotrwałe, w tym betony (*refractory castables*), stanowią kluczową klasę materiałów inżynierskich gwarantujących ciągłość i bezpieczeństwo procesów w sektorach hutniczym, energetycznym, chemicznym i cementowym¹. Ich zadaniem jest praca w ekstremalnych warunkach temperaturowych, mechanicznych i chemicznych przy równoczesnym utrzymaniu stabilności właściwości użytkowych - od urabialności świeżej masy, przez kinetykę wiązania, po gęstość i wytrzymałość na ściskanie po wygrzewaniu. W ostatnich dekadach obserwuje się istotny wzrost udziału monolitycznych materiałów ogniotrwałych względem formowanych kształtek, co wiąże się z rozwojem właściwości nowoczesnych zapraw i wprowadzeniem nowych technik aplikacji (np. wylewanie, natrysk)².

Wyroby betonowe składają się z kruszyw ogniotrwałych o różnych rozmiarach od 300µm do 20mm dla wytrzymałości i właściwości na gorąco oprócz składników matrycy, środków wiążących, modyfikatorów i domieszek³. Najbardziej rozpowszechnionymi kruszywami są stopiony lub spiekany tlenek glinu, ponieważ mają niski współczynnik rozszerzalności cieplnej i wysoką wytrzymałość w połączeniu z dobrymi właściwościami izolacyjnymi. Kru-

¹ Pawełek, A., Czechowski, J.: Materiały ogniotrwałe dla przetwórstwa aluminium. Gliwice, Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., 2010

² Tomšů, F., & Pivák, A.: Refractory Monolithics versus Shaped Refractory Products. *Interceram – International Ceramic Review*, 66(3), 20–24, 2017

³ Gogtas C.: Development of Nano-ZrO₂ Reinforced Self-flowing Low and Ultra Low Cement Refractory Castables, 2012

szywo Skelton jest wypełnione drobniejszymi cząsteczkami (modyfikatorami lub wypełniaczami), które odpowiadają głównie za reologię i charakterystykę przepływu, podczas gdy struktura jest utrzymywana razem za pomocą spoiwa lub środka wiążącego. W tabeli 1 przedstawiono skład materiałów ogniotrwałych a w tabeli 2 typowe modyfikatory/wypełniacze stosowane w betonach ogniotrwałych. Właściwości betonów, które obejmują kontrolę rozszerzalności, poprawę wiązania i regulację mineralogii/chemii, można kontrolować, stosując dodatki lub domieszki w małych ilościach w zakresie od 0,05 do 0,5% wag. Mogą być one organiczne, nieorganiczne lub stanowić ich kombinację⁴. W tabeli 3 wymieniono typowe domieszki stosowane w betonach ogniotrwałych.

Tabela 1. Skład materiałów ogniotrwałych⁵

Tworzywo	Treść (%)
Kruszywa	40–80
Modyfikatory	5–30
Agenci obligacji	2–50
Domieszki	<1
Tworzywo	Treść, %

Tabela 2. Typowe modyfikatory stosowane w betonach ogniotrwałych⁴

Rodzaj	Wzór	Funkcjonalność
Kruszywa drobno mielone	-	Chemia, mineralogia i regulacja, modyfikacja i rozwój wiązań
Kalcynowany tlenek glinu	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Dostosowanie chemiczne, modyfikacja i rozwój wiązań
Reaktywny tlenek glinu	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Kontrola przepływu/reologii, modyfikacja i rozwój wiązań
Kwarc krzemionkowy	SiO_2	Kontrola skurczu
Kyanit	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Kontrola skurczu (1325–1410°C), dostosowanie chemiczne i mineralogiczne
Glina	Uwodniony glino-krzemian	Wypełniacz, kontrola przepływu/reologii
Cyrkon	ZrSiO_4	Zredukuj metal, żużel, atak
Grafit/węgiel	C	Zmniejszenie ataku metalu i żużla
Popiół lotny	Różnie	Wypełniacz niskotemperaturowy

⁴ Lee W.E., Vieira W., Zhang S., Ghanbari Ahari K., Sarpoolaky H., Parr C.: Castable refractory concretes. *Int. Mater. Rev.*, 46, pp. 145-167, 2001.

⁵ Krietz L.: Beton ogniotrwały, 2004

Tabela 3. Typowe domieszki w betonach ogniotrwałych⁶

Dodatek	Przyspieszacz	Opóźniacz (retarder)	Regulacja pH	Reduktor wody	Modyfikator reologii
Węglan litu	×				
Wodorotlenek wapnia	×		×		
Węglan sodu	×		×		
Wodorowęglan sodu			×		
Cytrynian sodu		×		×	×
Fosforan sodu		×		×	×
Poli(akrylan sodu)				×	×
Polikarboksylan				×	×
Kwas cytrynowy		×			
Kwas borowy		×			

Rozwój inżynierii wytwarzania materiałów ogniotrwałych obejmuje dziś zarówno doskonalenie składu recepturowego (w tym roli mikro- i nanododatków), jak i sterowanie procesem wytwarzania: dobór kruszyw i spoiw, inżynierię reologii, kontrolę kinetyki hydratacji/spiekania oraz integrację z narzędziami Przemysłu 4.0 (IoT, analityka danych, bliźniaki cyfrowe), które pozwalają modelować i nadzorować zachowanie materiału od mieszalnika po eksploatację wyrobu w urządzeniu cieplnym^{7,8}. W literaturze materiałoznawczej podkreśla się ponadto znaczenie dodatków modyfikujących: organicznych (np. hydrokсыkwasы – kwas cytrynowy) oraz mineralnych (np. wapno hydratyzowane), które oddziałują na hydratację/spajanie, mikrostrukturę, urabialność i wytrzymałość, a przez to na parametry procesu produkcyjnego i trwałość eksploatacyjną^{9,10,11}.

Kwas cytrynowy (typowy retarder wg EN 934-2) wydłuża czas wiązania i zwykle zwiększa rozptył, przy czym efekty bywają nieliniowe: w wielu badaniach obserwuje się optymalne dawki rzędu ~0,05–0,2% m.c. cementu, powyżej których dochodzi do nadmiernego

⁶ Lee W.E., Vieira W., Zhang S., Ghanbari Ahari K., Sarpoolaky H., Parr C.: Betony ogniotrwałe lane. *Int. Mater. Rev.*, 46, s. 145-167, 2001

⁷ Ahmmed, MS, Isanaka, SP i Liou, F.: Promowanie synergii w celu poprawy efektywności produkcji w przetwórstwie materiałów przemysłowych: systematyczny przegląd Przemysłu 4.0 i sztucznej inteligencji. *Machines*, 12 (10), 681, 2024

⁸ Jaskuła, P.: Dodatek wapna hydratyzowanego jako środka adhezyjnego do mieszanek mineralno-asfaltowych, 2005

⁹ Czechowski, J., Witek, J., Śliwa, A.: Przemysł materiałów ogniotrwałych–problematyka badań i rozwoju. *Szkło i Ceramika*, 68, 2017

¹⁰ https://deutsche-bauchemie.com/fileadmin/uploads/tx_ttproducts/datasheet/DBC_229-SB-E-2017_01.pdf?utm_source=chatgpt.com

¹¹ Kon, E., Jóźwiak, H.: Klasyfikacja i wymagania dla domieszek do betonu, zaprawy i zaczynu. *Cement Wapno Beton*, 5(67), 23-26, 2000

opóźnienia lub nawet utraty zdolności wiązania; część prac notuje również lokalne maksimum wytrzymałości dla niskich dawek (efekt pośredni – lepsze uformowanie mikrostruktury)¹². Z kolei wapno hydratyzowane bywa stosowane jako dodatek modyfikujący mikrostrukturę zaczynu; literatura wskazuje na wpływ na czasy wiązania oraz stabilizację/zmianę wytrzymałości (zależnie od układu i reżimu dojrzewania), a przy współudziale innych dodatków – także na trwałość i parametry reologiczne układu cementowego^{13,14}. W przypadku betonów ogniotrwałych, których matryca bywa niskocementowa lub ultraniskocementowa i często zawiera wysokogliniowe składniki (Al_2O_3), zarządzanie reologią i kinetyką wiązania jest krytyczne, bo determinuje jakość zagęszczenia, defektywność, porowatość i w efekcie wytrzymałość po wygrzewaniu. Przeglądy poświęcone reologii castables oraz badania nad mikrostrukturą (m.in. z użyciem dodatków sol-gel) podkreślają sprzężenia między dodatkami, rozkładem ziarn i obróbką procesu a własnościami po utwardzeniu i wygrzewaniu¹⁵. W tym kontekście inżynieria wytwarzania pełni rolę łącznika między nauką o materiałach, projektowaniem receptur i sterowaniem procesem, a współczesne narzędzia (czujniki, analiza danych, bliźniaki cyfrowe) umożliwiają iteracyjne doskonalenie receptur i warunków wytwarzania co ma szczególne znaczenie dla materiałów pracujących w ekstremalnych warunkach cieplnych i chemicznych^{16,17}.

Podsumowując, temat badania wpływu mikrododatków (kwasu cytrynowego i wapna hydratyzowanego) na czas wiązania, rozptyw, gęstość czy wytrzymałość betonów ogniotrwałych jest uzasadniony zarówno potrzebami przemysłu, jak i stanem wiedzy – zwłaszcza w obszarze ustalenia optymalnych dawek w układach wysokogliniowych oraz ich integracji z nowoczesnym nadzorem procesów (I4.0).

Uzasadnienie tematu, cel i zakres pracy

W skali globalnej rośnie udział monolitów w produkcji materiałów ogniotrwałych dzięki postępowi właściwości i technik instalacji. Jednocześnie wymogi dostępności instalacji przemysłowych oraz presja kosztowa skłaniają do poszukiwania stabilnych, przewidywalnych i „łatwych w montażu” zapraw ogniotrwałych, które oferują wysoką wytrzymałość po wygrzewaniu i odporność na szok termiczny przy ograniczonej podatności na defekty monta-

¹² Marcos Lanzón, P.A. García-Ruiz: Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters, *Construction and Building Materials*, Volume 28, Issue 1, pp. 506-511, ISSN 0950-0618, 2012.

¹³ Chładzyński, S.: Wapno hydratyzowane. historia, właściwości i zastosowanie. *Isolacje*, 14, 68-71, 2009

¹⁴ Gui Z., Gai-Fei P., Xue-Yu Z., Xu-Jing N., Hong D.: Adding hydrated lime for improving microstructure and mechanical properties of mortar for ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 167, 107130, ISSN 0008-8846, 2023

¹⁵ Rheology of refractory concrete: An article review. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2021

¹⁶ Mohd J., Abid H., Rajiv S., Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review, *Cognitive Robotics*, Volume 3, Pages 71-92, ISSN 2667-2413, 2023

¹⁷ Mandecka-Kamień, L., Makuch, K., Rapacz-Kmita, A.: Ogniotrwałe betony mullitowe. *Cement Wapno Beton*, 15(77), 217-224, 2010

żowe. Lepsza kontrola reologii i wiązania bezpośrednio przekłada się na skrócenie przestojów oraz obniżenie ryzyka awarii wyłożenia ogniotrwałego, co ma wymiar strategiczny w hutnictwie i energetyce¹⁸. Choć mikrododatki (w tym kwasy organiczne, jak cytrynowy) są opisane w normach i raportach branżowych (np. EN 934-2; Deutsche Bauchemie)¹⁹, to wyniki badań nad ich wpływem na własności mechaniczne bywają rozbieżne i zależne od dawki, składu, temperatury, czasu oraz rodzaju cementu. Wykazano m.in. optimum działania kwasu cytrynowego w okolicach ~1500 ppm (ok. 0,15% m.c. cementu), po przekroczeniu którego następuje silne opóźnienie wiązania, a nawet zaburzenia formowania struktury; jednocześnie w niskich dawkach notuje się niekiedy wzrost wytrzymałości (lepsze uformowanie mikrostruktury)²⁰. W odniesieniu do wapna hydratyzowanego literatura wskazuje na oddziaływanie na czasy wiązania i rozwój wytrzymałości, ale efekt kierunkowy zależy od układu spoiw i warunków dojrzewania (obserwuje się scenariusze zarówno korzystne, jak i neutralne/niekorzystne), co potwierdza potrzebę badań parametrycznych w konkretnych układach wysokogliniowych typowych dla betonów ogniotrwałych²¹.

W przypadku betonów o niskiej zawartości cementu kluczowe jest zarządzanie rozkładem ziaren i deflokulacją oraz sterowanie lepkością i rozplywem w funkcji czasu (okno montażowe), co determinują m.in. dodatki organiczne i mineralne. Aktualne przeglądy reologii betonów ogniotrwałych podkreślają, że nawet niewielkie różnice w dawkowaniu dodatków mogą nieliniowo modyfikować lepkość pozorną i granicę płynięcia, a przez to dyktować wymagania procesu zagęszczania/wibrowania i wpływać na porowatość po wygrzewaniu. Badania nad mikrostrukturą betonu z dodatkami pokazują z kolei, że precyzyjna inżynieria faz wiążących przekłada się na gęstą strukturę i lepsze własności po spieczeniu, co wskazuje na wagę doboru i kompatybilności dodatków w złożonych systemach²². Z punktu widzenia zgodności normowej i przewidywalności procesu, korzystne jest opieranie polityki dodatków na standardach EN 934-2 (definicje i wymagania dla domieszek, w tym retardujących) oraz na dobrych praktykach producentów chemii budowlanej, którzy wskazują na hybrydowe domieszki poprawiające jednocześnie konsystencję i okno czasowe montażu, co może ograniczyć ilość defektów montażowych i marnotrawstwo materiału²³. W świetle celów zrównoważonej produkcji (mniej odrzutów, mniejsze zużycie energii podczas wygrzewania) kontrola dawki mikrododatków i ich wpływu na gęstość oraz mikrostrukturę ma również wymiar środowiskowy.

Włączenie narzędzi I4.0 (czujniki online, analiza danych, algorytmy ML, digital twins) do inżynierii wytwarzania betonów ogniotrwałych otwiera drogę do predykcyjnego sterowania dawkowaniem mikrododatków w czasie rzeczywistym (np. adaptacja dawki mikrododatków do temperatury/rodzaju cementu/poziomu wilgotności), symulacji reologii i wiązania

¹⁸ Tomšů, F., Pivák, A.: Refractory Monolithics versus Shaped Refractory Products. *Interceram – International Ceramic Review*, 66(3), 20–24, 2017

¹⁹ BS EN 934-2:2001. Admixtures for concrete. (tekst normy – dostęp przez wydawcę)

²⁰ Lanzón, M., García-Ruiz, P. A., Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 506–511, 2012

²¹ Zhang, G., Wang, Y., Li, Z.: Adding hydrated lime for improving microstructure and durability of cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 167, 107100, 2023

²² Ghosh, S., Nandi, T. K.: Microstructures of refractory castables prepared with sol–gel additives. *Ceramics International*, 29(6), 671–677, 2003

²³ https://claunicanarias.com/wp-content/uploads/2021/06/Bristish.pdf?utm_source=chatgpt.com

w warunkach rzeczywistych oraz uczenia się na danych z procesu i eksploatacji (zamknięta pętla doskonalenia receptury). Dla instalacji o wysokich kosztach przestojów może to oznaczać istotną redukcję ryzyka i poprawę niezawodności wyłożeń²⁴.

Celem badań było określenie wpływu mikrododatków w postaci kwasu cytrynowego oraz wapna hydratyzowanego (dodawanych do mieszanki betonowej) w różnych proporcjach, na wybrane właściwości fizyczne wyrobu gotowego. Do przeprowadzenia analizy posłużono się dwoma recepturami technologicznymi, gdzie jedna receptura oparta była na surowcach korundowych, druga zaś oparta była o szamot.

Założono hipotezę roboczą: H1: Mikrododatki w istotny sposób wpływają na parametry wytrzymałościowe produkowanych wyrobów.

Metodyka badań

Do oceny wpływu mikrododatków na produkowany beton wybrano następujące parametry fizyczne:

- czas wiązania,
- wytrzymałości na ściskanie po wysuszeniu w 110°C,
- rozptyw betonu.

Testy zostały przeprowadzone w laboratorium zakładowym. Badanie wykonano dla dwóch receptur – jednej zawierającej w składzie kwas cytrynowy oraz drugiej zawierającej wapno. Poszczególne dodatki zostały dodane do mieszanki betonowej w następującej ilości:

1. kwas cytrynowy dodany w ilości 1g; 2g; 3g; 4g,
2. wapno hydratyzowane dodane w ilości: 0,5g; 1g; 1,5g; 2g.

Pierwsze próbki zostały wylane bez dodatku kwasu i wapna, jako model wzorcowy M"0".

Kolejne próbki zostały opracowane z dodatkiem kwasu cytrynowego lub wapna hydratyzowanego, wg założonego doświadczenia. Każda próbka z dodatkiem została przebadana serią testów rozpoczynając od badania czasu wiązania, następnie rozptywu, a na końcu ciężaru objętościowego i wytrzymałości na ściskanie.

W celu przeprowadzenia badań właściwości fizycznych mieszanek betonowych pobrano próby z opakowań typu "big-bag" o wadze 1000 kg. Pobrano próby z pierwszej tony, po zakończeniu mieszania i zrzuceniu całego materiału do opakowania. Procedurę umieszczono na takim etapie, aby testy zostały przeprowadzone w warunkach jak najbardziej zbliżonych do warunków, w których klient otrzymuje wyprodukowany wyrób.

Procedurę rozpoczęto od otworzenia opakowania i odsunięcia na boki materiału w celu uzyskania reprezentatywnej formy całej mieszanki. Kolejno zagłębiono próbnik w dołku i pobrano próbę do wcześniej przygotowanego opakowania. Woreczek z próbką zidentyfikowano nazwą gatunku oraz datą produkcji. Tak przygotowaną próbę przeniesiono do laboratorium i kondycjonowano przed badaniem. Przechowywano ją w warunkach klimatyzowanych, przy odpowiedniej wilgotności, aby materiał nie uległ zbryleniu lub nie wysechł.

Testy w laboratorium rozpoczęto od sprawdzenia specyfikacji mieszanki - ilości wymaganej wody zarobowej oraz procentowej (lub gramowej) zawartości dodatków dla badanej

²⁴ Ahmed, MS, Isanaka, SP i Liou, F., Promowanie synergii w celu poprawy efektywności produkcji w przetwórstwie materiałów przemysłowych: systematyczny przegląd Przemysłu 4.0 i sztucznej inteligencji. *Machines*, 12 (10), 681, 2024.

receptury. Następnie do misy miksera Hobarta (umieszczonej na wytarowanej wadze) wysypano zawartość opakowania z próbą i na tej podstawie dobrano odpowiednią ilość wody zarobowej, a także dodatków. Wypełnienie misy nie przekraczało 45% objętości, by zapewnić odpowiednie przemieszanie suchej mieszanki z dodatkami.

Po umieszczeniu w misie rozpoczęto proces mieszania mieszanki betonowej z wodą zarobową. Długość mieszania odbywała się według ściśle określonych zasad, które definiują czas jaki powinien upłynąć, aby mieszanka została dokładnie wymieszana.

Po dokładnym połączeniu się betonu z wodą rozpoczęto przygotowanie próbek do badań właściwości fizycznych. Beton z misy Hobarta przełożono do formy na kostki, która posłużyła do badania wytrzymałości na ściskanie, przygotowano próbę do badania rozplywu oraz próbę do badania czasu wiązania. Pozostały beton, który nie został użyty do testów, a pozostał w misie został zutylozowany w big-bagu przeznaczonym do tego typu odpadu. Następnie misa wraz z łopatką miksera została dokładnie oczyszczona z resztek mieszanki, aby pozostałości nie zaburzały wyników kolejnych testów.

Mokrą próbkę przygotowano zgodnie z punktem „Przygotowanie próby do badań jakościowych w laboratorium przy produkcyjnym”. Następnie wypełniono plastikowy woreczek typu "zip-lock" mieszanką betonową do pełna i zamknięto go. Woreczek został opisany godziną rozpoczęcia pomiaru (tj. godziną rozpoczęcia mieszania próby w misie Hobarta, forma zapisu - h:min). Szczelnie zamkniętą próbkę umieszczono na stole wibracyjnym, a następnie zawibrowano. Próbkę wibrowano do momentu pojawienia się bąbli powietrza tuż przy górnej granicy powierzchni woreczka. Następnie bąble przekuto nakłuwaczem w taki sposób, aby powstała dziura nie spowodowała wylania mieszanki z woreczka. Proces wibrowania zakończono w momencie, gdy wizualnie potwierdzono brak skumulowanych bąbli powietrza nad powierzchnią próbki. Po zakończeniu procesu wibrowania próbkę betonu zdjęto ze stołu wibracyjnego i ołożono w dedykowanym miejscu w laboratorium, gdzie znajdują się kontrolowane warunki temperaturowe, mieszczące się w zakresie od 18°C do 22°C. Następnie co 15 minut sprawdzano stan związania betonu za pomocą twardościomierza.

Badanie twardości próbki zaczęto od obrócenia woreczka z próbką po to, aby pomiar wykonano na płaskiej powierzchni woreczka (spłaszczonej przez stół). Następnie przyłożono twardościomierz w pięciu miejscach na płaskiej powierzchni. Ze związanej próbki uzyskano wynik we wszystkich miejscach >98,0 HC, tzn. iż po zetknięciu się twardościomierza z powierzchnią badanej próby w dowolnym miejscu wynik, który odczytano na urządzeniu wynosił powyżej 98 HC. Wynik testu podano w minutach.

Badanie „płynięcia” betonu zmierzono wykorzystując do tego formę o kształcie ściętego stożka o wysokości 300 mm, a także za pomocą stolika rozplywowego z wbudowanym ubijakiem. Wnętrze formy, a także podstawę przed rozpoczęciem badania posmarowano odpowiednim preparatem, aby zmniejszyć zmiany tarcia powierzchniowego na opad stożka. Dodatkowo po umieszczeniu mieszanki wewnątrz stożka oczyszczono podstawę formy, aby nie była ona zanieczyszczona betonem.

Formę ułożono na gładkiej powierzchni stolika rozplywowego. Następnie wypełniono ją w całości mieszanką w taki sposób, aby górny poziom mieszanki równy był poziomowi górnej części formy. Nadmiar betonu zebrano za pomocą dedykowanego przyrządu. Podczas wypełniania formy należało mocno ją dociskać do podstawy stolika, aby zapobiec niekontrolowanemu przesunięciu. Po napełnieniu całości formy wykonano 10 uderzeń na jedną stronę używając do tego ubijaka wbudowanego do stolika. Po zakończeniu ubijania formę podniesiono pionowo w górę, następnie masa została pozostawiona na kilka sekund, aby

swobodnie „rozplynęła się” po powierzchni stołu. Ponownie wykonano uderzenia - 15 uderzeń na jedną stronę. Po zakończeniu badania wykonano pomiar rozplywu przy użyciu suwmiarki. Suwmiarkę przyłożono do próbki mierząc średnice opadu mieszanki. Pomiar wykonano w dwóch przeciwnych kierunkach. Z dwóch uzyskanych wyników obliczono średnią, którą podano jako wynik rozplywu mieszanki betonowej. Wynik badania został podany w milimetrach.

Badanie wytrzymałości na ściskanie betonu po wysuszeniu w suszarni w temperaturze 110°C według normy VSTP_4.2 przeprowadzono przy wykorzystaniu form sześciennych o boku 150 mm, a także przy użyciu prasy do zgniatania (metoda niszcząca) z podkładkami. Materiał z jakiego wykonano formy do próbek to stal lub żeliwo o mocnej konstrukcji. Przed samym skróceniem formy należało jej wnętrze, a także powierzchnie styku ścian przesmarować olejem mineralnym, aby zapobiec nadmiernemu przywieraniu próbek do ścianek, a także ścianek między sobą.

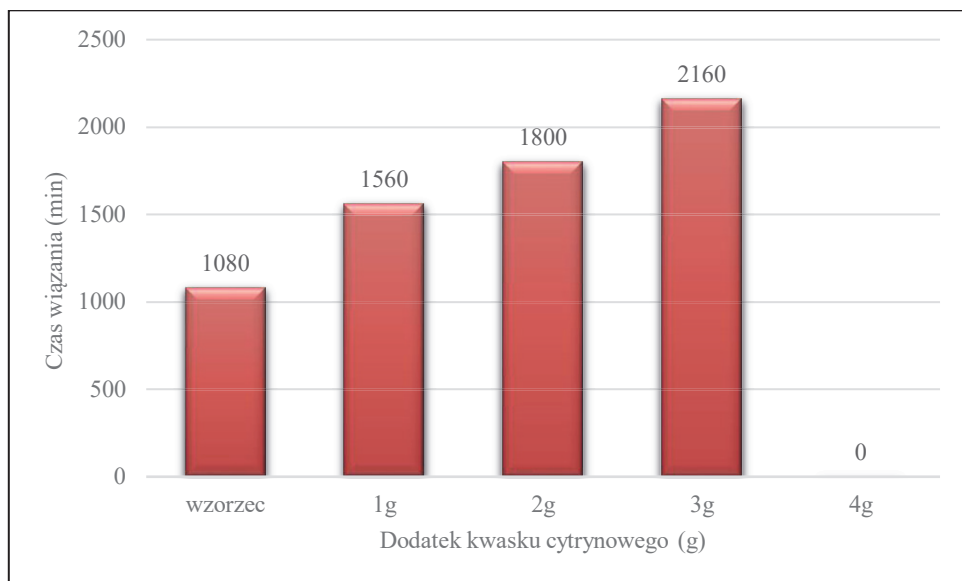
Badanie rozpoczęto od umieszczenia form na stole vibracyjnym (każda z form na podstawie musiała posiadać pasek magnetyczny, który zapobiega przesuwaniu się form podczas wibrowania). Następnie formę napełniono mieszanką betonową w co najmniej trzech warstwach. Każda z warstw została zagęszczona przy użyciu stołu vibracyjnego. Ubijanie mokrej masy trwało do momentu uzyskania pełnego zagęszczenia mieszanki, czyli uzyskania mieszanki bez segregacji lub wyciekania mleczka. Tak przygotowaną próbkę przełożono na specjalnie wyznaczone miejsce w laboratorium. Kostkę w taki sposób pozostawiono na ok. 24h ±4h w temperaturze ok. 15-25°C i wilgotności względnej sięgającej ok. 90%. Po takim kondycjonowaniu otworzono formę i ostrożnie wyjęto kostkę, a następnie umieszczono ją w suszarni i poddano procesowi suszenia w określonej temperaturze przy zadanej krzywej suszenia. Następnie wysuszoną kostkę ostudzono do temperatury pokojowej i poddano próbie zgniatania. Ściskanie wykonano w specjalnej prasie. Kostkę umieszczono wewnątrz prasy, pomiędzy płytami dociskowymi. Po wprowadzeniu kostki rozpoczęto proces ściskania. Badanie zostało zakończone w momencie, gdy kostka uległa całkowitemu zniszczeniu.

Wyniki badań

Wpływ kwasu cytrynowego na parametry jakościowe mieszanki betonowej opartej na surowcach korundowych

Na rysunku 1 pokazano długość czasu wiązania w betonie korundowym. Najdłuższy czas wiązania zauważono w próbce z dodatkiem kwasu 4g – próba ta nie „związała”, tzn. beton nie stwardniał. Natomiast najszybciej związała próba bez żadnego dodatku kwasu cytrynowego. Wiązanie i stwardnienie betonu wiąże się z rozpuszczeniem niektórych minerałów w wodzie, rozpadem minerałów na części składowe pod wpływem reakcji chemicznej z wodą (hydroliza) oraz chemicznym przyłączeniem wody przez minerał. Przyjmuje się, że ten proces trwa od chwili zmieszania cementu z wodą aż do uzyskania założonego produktu. Na bazie przeprowadzonych badań stwierdzono, że mieszanka betonowa po każdorazowym dodatku kwasu cytrynowego reagowała bardzo gwałtownie na jego obecność. Każdy kolejny dodatek kwasu powodował wydłużenie czasu wiązania od 300 minut do 400 minut

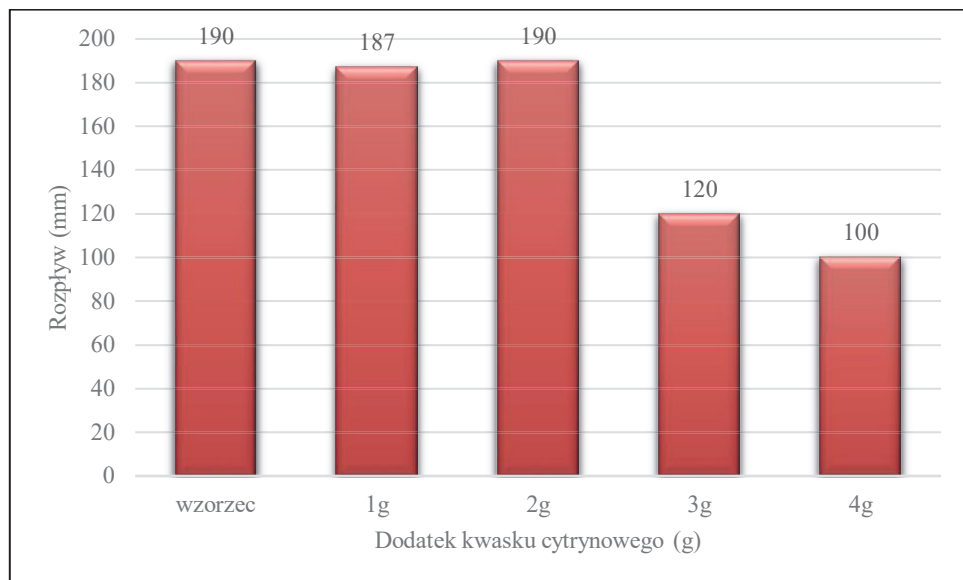
dłużej względem próbki poprzedzającej. Wydłużenie czasu wiązania zaobserwowano do momentu, gdzie do badanej próby został dodany kwas w ilości 3g. Kolejny dodatek (w ilości 4g) spowodował, iż wynik badanej próbki wyniósł 0 minut, co oznacza, że próba „nie związała”, tzn. podczas badania przy użyciu twardościomierza żaden punkt na próbce nie wykazał wyniku $>98,0$, a także na powierzchni próbki można było zaobserwować obecność luźnych kul betonu.



Rysunek 1. Czas wiązania betonu z dodatkiem kwasu cytrynowego

Badania dowiodły, iż każdorazowy dodatek kwasu cytrynowego do mieszanki betonowej musi być szczególnie kontrolowany, gdyż wpływa on mocno na wynik. Czas wiązania jest ważnym parametrem, który ze względu na charakter wykorzystania betonu musi być mocno przestrzegany. Dodatkowo oprócz badania twardościomierzem stwierdzono wizualnie, że próbka związała tzn. na powierzchni próbki nie stwierdzono obecności widocznych pojedynczych kulek, luźnych kawałków betonu.

Na rysunku 2 przedstawiono wynik rozplywu z dodatkiem kwasu cytrynowego. Największą wartość odnotowano w próbce wzorcowej (bez dodatku kwasu cytrynowego) oraz w próbce z dodatkiem 2g dodatku. Natomiast najmniejszy rozplyw wystąpił w próbce 4g. Konsystencja betonu (rozplyw) to stopień jego płynności, ciekłości, skłonność do odkształceń w wyniku poddania go obciążeniom ciężarem własnym lub oddziaływaniem zewnętrznym. Jest istotny parametr, który decyduje o sposobie i czasie transportu betonu, sposobie jego wbudowania. Konsystencja musi być dobrana do kształtu elementu oraz rozmieszczenia zbrojenia.



Rysunek 2. Rozpływ betonu z dodatkiem kwasu cytrynowego

W próbie wzorcowej (bez dodatku kwasu) stwierdzono, że wielkość rozptywu wynosiła 190 mm. Kolejne dwie badane próby (z dodatkiem 1g i 2g kwasu) odnotowały wynik o 3 mm mniejszy (dodatek 1g kwasu) niż próba wzorcowa lub takim samym (próba z ilością 2g) jak wzorzec. Co w efekcie jest wynikiem mocno zbliżonym do próby wzorcowej.

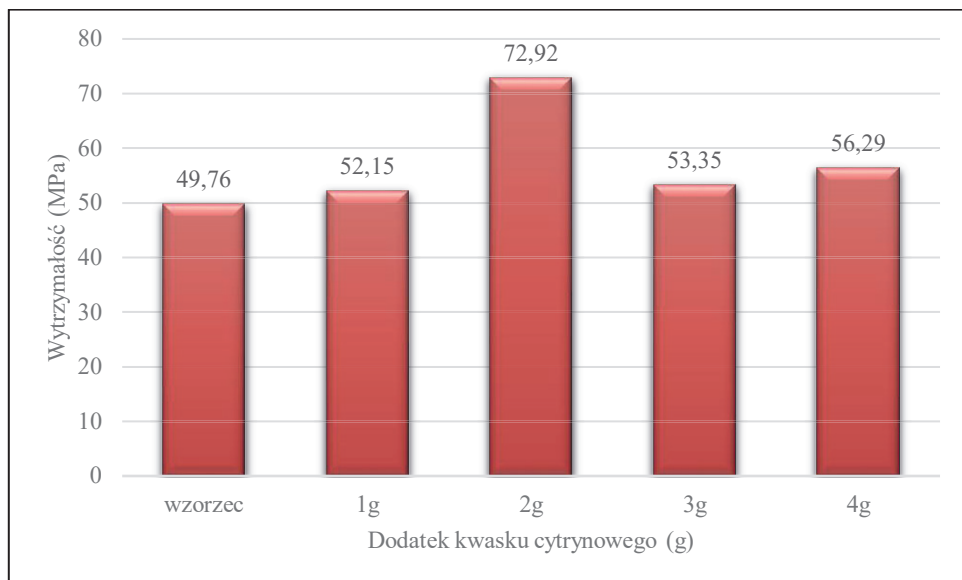
Natomiast wynik badania dla prób, gdzie ilość dodatku była większa niż próby poprzednio omawiane można stwierdzić, iż wynik badania znacznie się pogorszył i wynosił odpowiednio dla dodatku 3g – 120 mm, a dla dodatku 4g było to 100 mm.

Na rysunku można zauważyć, że dodatek kwasu do mieszanki betonowej powoduje zwiększenie rozptywu do pewnego momentu, a po przekroczeniu dawki kwasu cytrynowego powyżej 2g rozptyw zmniejszył się gwałtownie.

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości betonu na ściskanie z dodatkiem kwasu cytrynowego. Największą wytrzymałość osiągnęła próba z dodatkiem 2g kwasu, a najmniejszą wytrzymałość zanotowała próba wzorcowa (bez dodatku kwasu).

Wytrzymałość to jedna z kluczowych właściwości betonu, która określa jego zdolność do wytrzymania obciążeń skierowanych prostopadłe do jego powierzchni. Jest to jedna z najważniejszych właściwości, ponieważ wpływa na nośność i wytrzymałość konstrukcji betonowych.

Po przeprowadzonych badaniach wytrzymałościowych stwierdzono, że wytrzymałość betonu niezależnie od dodatku kwasu cytrynowego kształtuje się na zbliżonym poziomie z wyjątkiem próbki z dodatkiem kwasu w ilości 2g, gdzie odnotowano wynik na poziomie 72,92 MPa. Można zatem stwierdzić, że dodatek kwasu cytrynowego nie wpływa w znacznym stopniu na wytrzymałość analizowanych próbek.

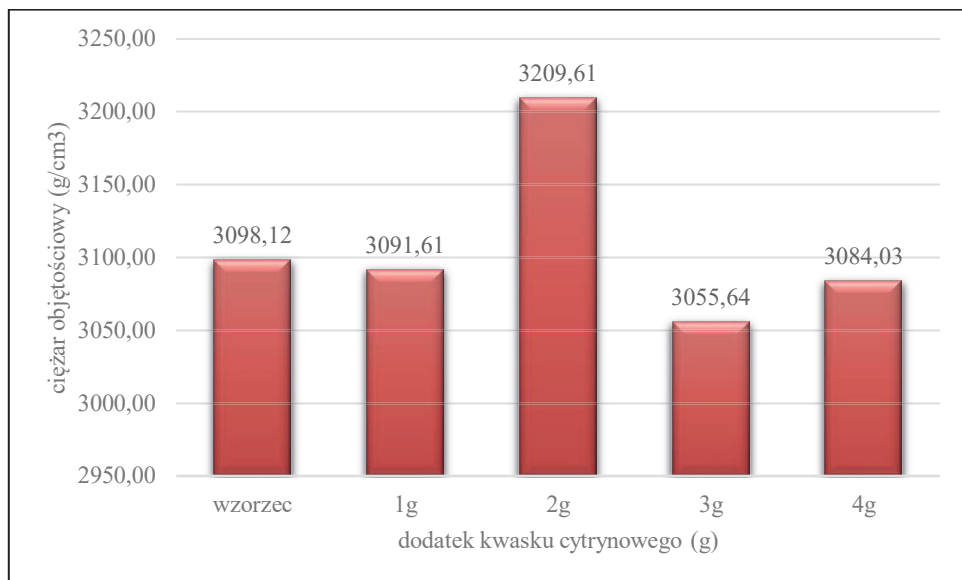


Rysunek 3. Wytrzymałość na ściskanie z dodatkiem kwasu cytrynowego

Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badania ciężaru objętościowego próbek z dodatkiem kwasu cytrynowego. Najwyższy wynik odnotowano w próbce z dodatkiem kwasu 2 g, a najmniejszy w próbce z dodatkiem kwasu 3 g.

Wskaźnik ten określa ilość betonu przypadającą na jeden metr sześcienny. W budownictwie określana jest pozorna gęstość betonu. Pod tym względem wymienia się beton lekki, średni oraz ciężki.

Wykres przedstawia wpływ dodatku kwasu cytrynowego na parametr fizyczny jakim jest ciężar objętościowy po wysuszeniu w 110°C . Z wykresu można wywnioskować, że rozkład wyników badań jest bardzo zróżnicowany w stosunku do poszczególnego dodatku kwasu. Wynik próby wzorcowej wynosił 3098 kg/m^3 i taki wynik osiągnęła jedynie próba, gdzie dodatek kwasu wyniósł 1g. Kolejne próby notują bardzo różne wyniki. Próba z dodatkiem 2 g kwasu osiągnęła wynik, aż o 300 kg/m^3 większy niż wzorzec, natomiast kolejna próba z dodatkiem 3g kwasu osiągnęła najniższy wynik (o ok. 45 kg/m^3 mniejszy niż wzorzec i ok. 1500 kg/m^3 mniejszy niż próba z najwyższym wynikiem). Wynik ostatniej próby, gdzie dodatku było 4 g oscylował w granicach wyniku próby wzorcowej.



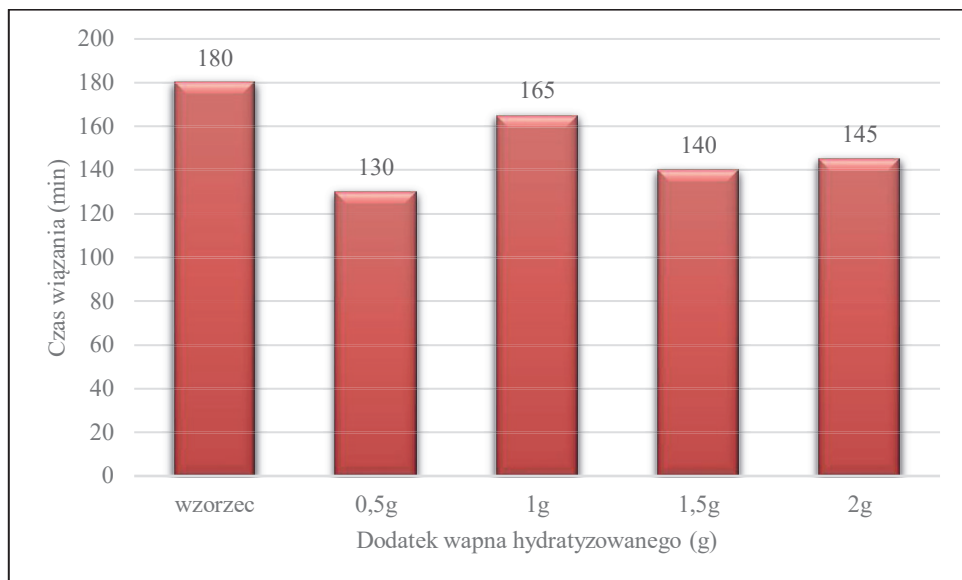
Rysunek 4. Ciężar objętościowy beton z dodatkiem kwasu cytrynowego

Wpływ wapna hydratyzowanego na parametry jakościowe mieszanki betonowej opartej na surowcach szamotowych

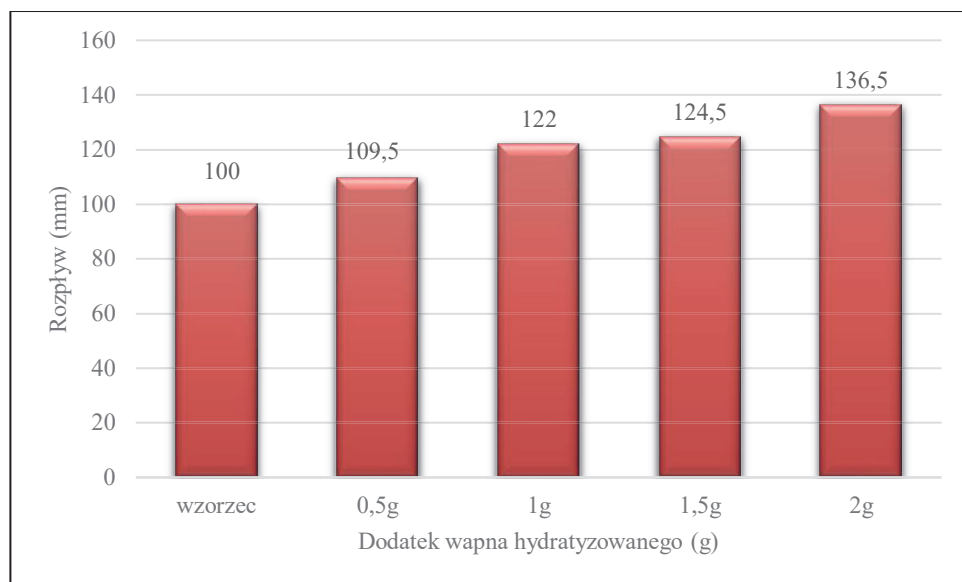
Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badania czasu wiązania z dodatkiem wapna hydratyzowanego. Najwyższy wynik odnotowano w próbie wzorcowej, natomiast najniższy wynik osiągnęła próba z dodatkiem 0,5 g wapna.

Stwierdzono, że każdorazowy dodatek wapna powodował znaczną zmianę wyniku czasu wiązania próbki. To oznacza, że najdłużej wiązała próba wzorcowa (bez dodatku wapna) a jej wynik wynosił 180 minut. Co jest czasem o 50 minut dłuższym względem próby z najszybszym wiązaniem. Najkrótszy wynik, czyli 130 minut osiągnęła próba z dodatkiem 0,5 g wapna. Każdy kolejny dodatek większej ilości wapna powodował wydłużenie czasu wiązania. Jednak rozkład nie był liniowy, a bardziej skokowy oraz żadna z tych prób nie osiągnęła wiązania na poziomie próby wzorcowej, czyli czasu 180 minut.

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki badania rozplywu. Najwyższy wynik zanotowano w próbie z dodatkiem wapna 2 g, natomiast najmniejszy wynik osiągnęła próba wzorcowa.



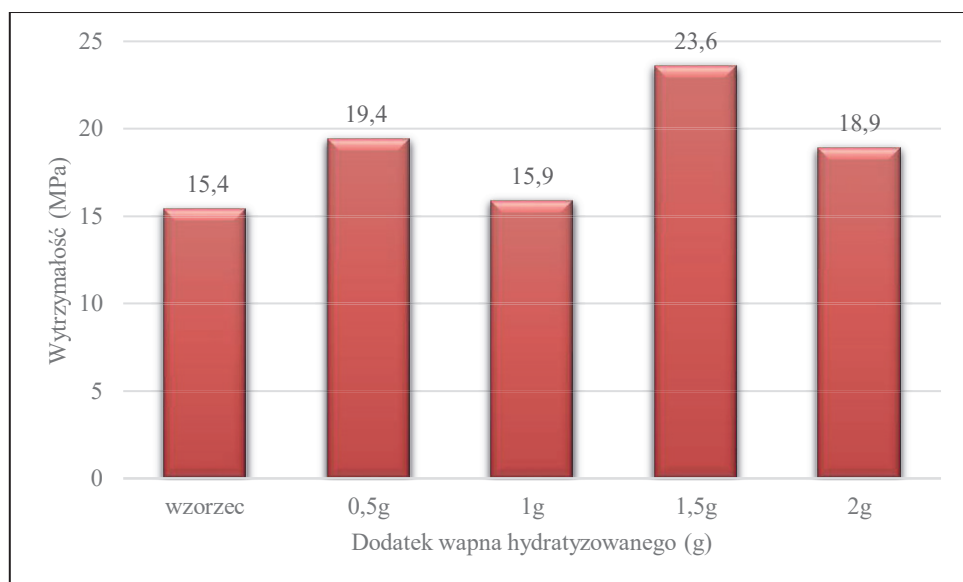
Rysunek 5. Czas wiązania z dodatkiem wapna hydratyzowanego



Rysunek 6. Rozpliw z dodatkiem wapna hydratyzowanego

Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że każdorazowy dodatek wapna miał duży wpływ na wynik rozptywu powodując jego wydłużenie, co biorąc pod uwagę zastosowanie betonu może utrudnić jego aplikację. Wyniki z przeprowadzonego testu mają rozkład linowy. Najmniejszy wynik rozptywu osiągnęła próba wzorcowa (100 mm). Wynik każdej kolejnej próby był większy od poprzedniej i wahał się w granicach od 9 mm do 15 mm więcej. Najwyższy wynik osiągnęła próba z największym dodatkiem wapna (2 g) - 136,5 mm. Badania potwierdziły, iż jakkolwiek dodatek wapna powoduje zmianę „płynięcia” betonu.

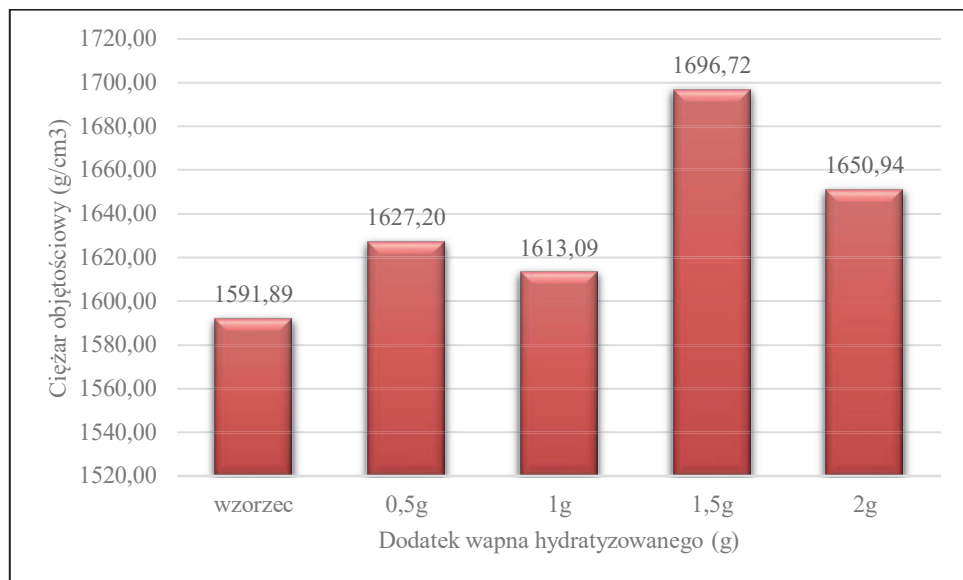
Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badania wytrzymałości na ściskanie z dodatkiem wapna hydratyzowanego. Jak można zauważyć największy wynik zanotowała próba z dodatkiem 1,5 g wapna, natomiast najniższy wynik osiągnęła próba 1 g.



Rysunek 7. Wytrzymałość na ściskanie z dodatkiem wapna hydratyzowanego

Zauważono, iż wyniki testów nie odbiegają zbyt wiele od próby wzorcowej, której wynik wynosił 15,4 MPa i był on najniższy. Wynik bardzo zbliżony do tego odnotowano przy próbie z dodatkiem 1g wapna - 15,9 MPa. Największą wytrzymałością charakteryzowała się próba z dodatkiem 1,5 g - 23,6 MPa i była ona o 8,2 MPa wyższa od wyniku najniższego. Średnia wszystkich prób dała wynik: 18,64 MPa.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki badania ciężaru objętościowego. Najwyższy wynik badania odnotowała próba z dodatkiem wapna w ilości 1,5 g wapna, a najmniejszy osiągnęła próba wzorcowa.



Rysunek 8. Ciężar objętościowy z dodatkiem wapna hydratyzowanego

Najniższy wynik osiągnęła próba wzorcowa, w przybliżeniu 1592 kg/m^3 , natomiast największy wynik odnotowano w próbce z dodatkiem $1,5 \text{ g}$ wapna – 1697 kg/m^3 . Daje to różnicę między najniższym, a najwyższym wynikiem na poziomie ok. 105 kg/m^3 . Próby z dodatkiem $0,5 \text{ g}$ oraz 1 g wapna zanotowały bardzo podobny wynik testu na poziomie ok. 1620 kg/m^3 . Ostatnia próba z największym dodatkiem wapna osiągnęła wynik o ok. 45 kg/m^3 mniejszy niż próba z najwyższym wynikiem i jest to drugi co do wielkości wynik pomiaru, czyli w przybliżeniu 1651 kg/m^3 .

Podsumowanie

Szereg testów mieszanek betonowych opartych na surowcach korundowych, a także szamotowych, które zostały przeprowadzone w laboratorium zakładowym potwierdziły postawioną hipotezę, iż poszczególne dodatki dodawane do mieszanki betonowej mają istotny wpływ na wyrób gotowy. W przypadku stosowania dodatków bardzo ważne jest umiejętne ich dozowanie, gdyż nieodpowiedni dobór ilościowy może spowodować, iż beton straci swoje właściwości, a w efekcie nie będzie spełniał swojej roli.

Omówione parametry fizyczne wyrobu gotowego do którego dodano różną ilość dodatku w postaci kwasu cytrynowego i wapna hydratyzowanego należy rozpatrywać jako jedną całość. Głównie dlatego, iż wyniki poszczególnych parametrów nie da między sobą porównać.

Dodatek kwasu cytrynowego, czy wapna hydratyzowanego w istotny sposób oddziałuje na wybrane parametry w znacznym stopniu powodując obniżenie lub zwiększenie wyniku, natomiast ten sam dodatek działa na inny parametr nie zmieniając jego wyników.

Betony ogniotrwałe działają w warunkach ekstremalnych, dlatego tak ważne jest, aby dołożyć wszelkich starań już podczas przygotowania do produkcji, a także samego naważenia surowców, a przede wszystkim różnego rodzaju dodatków. W pracy tej szereg badań dla poszczególnych parametrów udowodnił, że nawet najmniejsza zmiana w recepturze technologicznej może spowodować gwałtowną zmianę wyników parametrów, co w efekcie ma bardzo duży wpływ na wyrób końcowy.

Odbiorcą wyrobów ogniotrwałych są wielkie przedsiębiorstwa produkujące stal. Technologia produkcji stali jest procesem skomplikowanym, a także bardzo niebezpiecznym pod względem BHP. Drobną pomyłką, np.: podczas montażu kadzi może przynieść katastrofalne skutki. Dlatego ważne jest, aby wyrób mógł zapewnić spokojną i bezpieczną pracę operatorom w hucie. Aby branża stale się rozwija ważne jest aby przeprowadzać dalsze badania i poszukiwać nowych dodatków, które pozwolą na wyprodukowanie betonu, którego koszty produkcji będą niższe, a jakość jego będzie stale na wysokim poziomie.

Bibliografia

- Ahmmmed, MS, Isanaka, SP i Liou, F., Promowanie synergii w celu poprawy efektywności produkcji w przetwórstwie materiałów przemysłowych: systematyczny przegląd Przemysłu 4.0 i sztucznej inteligencji. *Machines*, 12 (10), 681, 2024
- BS EN 934-2:2001. Admixtures for concrete. (tekst normy – dostęp przez wydawcę)
- Chładzyński, S.: Wapno hydratyzowane. historia, właściwości i zastosowanie. *Izolacje*, 14, 68-71, 2009.
- Czechowski, J., Witek, J., Sliwa, A.: Przemysł materiałów ogniotrwałych – problematyka badań i rozwoju. *Szkło i Ceramika*, 68, 2017
- Gogtas C.: Development of Nano-ZrO₂ Reinforced Self-flowing Low and Ultra Low Cement Refractory Castables, 2012
- Ghosh, S., Nandi, T. K.: Microstructures of refractory castables prepared with sol–gel additives. *Ceramics International*, 29(6), 671–677, 2003
- Gui Z., Gai-Fei P., Xue-Yu Z., Xu-Jing N., Hong D.: Adding hydrated lime for improving microstructure and mechanical properties of mortar for ultra-high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 167, 107130, ISSN 0008-8846, 2023
- Jaskuła, P.: Dodatek wapna hydratyzowanego jako środka adhezyjnego do mieszanek mineralno-asfaltowych, 2005
- Kon, E., Józwiak, H.: Klasyfikacja i wymagania dla domieszek do betonu, zaprawy i zaczynu. *Cement Wapno Beton*, 5(67, nr 1), 23-26, 2000
- Krietz L.: Beton ogniotrwały, 2004
- Lanzón, M., García-Ruiz, P. A., Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), 506–511, 2012.
- Lee W.E., Vieira W., Zhang S., Ghanbari Ahari K., Sarpoolaky H., Parr C.: Betony ogniotrwałe lane. *Int. Mater. Rev.*, 46, s. 145-167, 2001
- Lee W.E., Vieira W., Zhang S., Ghanbari Ahari K., Sarpoolaky H., Parr C.: Castable refractory concretes. *Int. Mater. Rev.*, 46, pp. 145-167, 2001.
- Mandecka-Kamień, L., Makuch, K., Rapacz-Kmita, A.: Ogniotrwałe betony mullitowe. *Cement Wapno Beton*, 15(77), 217-224, 2010
- Marcos Lanzón, P.A. García-Ruiz: Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters, *Construction and Building Materials*, Volume 28, Issue 1, Pages 506-511, ISSN 0950-0618, 2012
- Mohd J., Abid H., Rajiv S., Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review, *Cognitive Robotics*, Volume 3, Pages 71-92, ISSN 2667-2413, 2023

- Pawełek, A., Czechowski, J.: Materiały ogniotrwałe dla przetwórstwa aluminium. Gliwice, Wydawnictwo Instytut Śląski Sp. z o.o., 2010
- Rheology of refractory concrete: An article review. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2021
- Tomšů, F., Pivák, A.: Refractory Monolithics versus Shaped Refractory Products. Interceram – International Ceramic Review, 66(3), 20–24, 2017
- Tomšů, F., Pivák, A.: Refractory Monolithics versus Shaped Refractory Products. Interceram – International Ceramic Review, 66(3), 20–24, 2017
- Zhang, G., Wang, Y., Li, Z.: Adding hydrated lime for improving microstructure and durability of cement-based materials. Cement and Concrete Research, 167, 107100, 2023

Adres do korespondencji: maciej.kubon@urk.edu.pl

ORCID: Maciej Kuboń 0000-0003-4847-8743

ORCID: Dariusz Kwaśniewski 0000-0002-1873-1456

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

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

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

ORCID: Rafał Kornas 0000-0001-8808-7849

INTEGRACJA TRANSPORTU PUBLICZNEGO I WSPÓLDZIELONEGO JAKO WYZWANIE DLA LOGISTYKI W INŻYNIERII PRODUKCJI

**Urszula Małaga-Toboła¹, Kamil Gibas¹, Natalia Toboła², Maciej Kuboń^{1,3},
Dariusz Kwaśniewski¹**

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

² Wydział Technologii Żywności, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

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

Wprowadzenie

Współczesne miasta stają przed rosnącymi wyzwaniami związanymi z mobilnością mieszkańców, przeciążeniem infrastruktury drogowej, zanieczyszczeniem powietrza oraz zmianami klimatycznymi¹. W tym kontekście istotną rolę odgrywa efektywny i zrównoważony system transportu, który powinien odpowiadać nie tylko na potrzeby codziennego przemieszczania się, lecz także wspierać cele społeczne i środowiskowe². Jednym z najważniejszych elementów takiego systemu jest transport publiczny oraz rozwijające się dynamicznie formy transportu współdzielonego³.

Publiczny transport zbiorowy to forma przemieszczania się dostępna dla ogółu społeczeństwa, realizowana w sposób zorganizowany i cykliczny. Zgodnie z definicją zawartą w europejskiej normie PN-EN 13816:2002, transport publiczny to usługa otwarta dla wszystkich podróżujących indywidualnie oraz w grupach, realizowana według ustalonego czasu lub częstotliwości, na określonych trasach z przystankami lub punktami dostępu. Polega na przewożeniu osób według ustalonych rozkładów jazdy oraz tras, które tworzą sieć połączeń komunikacyjnych w danym regionie. Jego głównym celem jest zapewnienie mieszkańcom miast, gmin czy powiatów możliwości sprawnego i wygodnego dotarcia do miejsc pracy, szkół,

¹ Makarova, I., Shubenkova, K., Pashkevich, A., Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*, 36(5), 409–419, 2021

² Jagiełło, A., Economic efficiency of sustainable public transport: A literature review on electric and diesel buses. *Energies*, 18(6), 1352., 2025

³ Heintz, F., Sustainable development assessment of incentive-driven shared on-demand mobility systems in rural settings. *European Transport Research Review*, 14, 32, 2022

placówek usługowych czy instytucji publicznych. Transport publiczny odgrywa więc podstawową rolę w funkcjonowaniu miast. Przede wszystkim umożliwia sprawne przemieszczanie się dużej liczby osób na stosunkowo niewielkiej przestrzeni, co jest szczególnie istotne w zatłoczonych aglomeracjach⁴. Rozwinięty i efektywnie zarządzany system transportu zbiorowego podnosi atrakcyjność miasta zarówno dla jego mieszkańców, jak i inwestorów czy turystów. Ułatwia mobilność, zmniejsza zapotrzebowanie na infrastrukturę drogową i parkingową oraz wpływa na estetykę i funkcjonalność przestrzeni miejskiej. Dobrze zorganizowany i odpowiednio finansowany miejski transport zbiorowy jest fundamentem nowoczesnej i zrównoważonej mobilności miejskiej. Poprawia jakość życia mieszkańców oraz przyczynia się do ochrony środowiska naturalnego^{5,6}. Jednak jego organizacja wymaga dobrze zaprojektowanego systemu operacyjnego, który opiera się na technologii cyfrowej – aplikacjach mobilnych, systemach GPS, zdalnym monitoringu pojazdów oraz bezkontaktowych metodach płatności⁷.

Coraz większego znaczenia w kształtowaniu nowoczesnej, zrównoważonej mobilności miejskiej nabiera transport współdzielony czyli system usług transportowych, w którym użytkownicy korzystają z pojazdów będących własnością usługodawcy lub innych osób, bez przenoszenia własności pojazdu na użytkownika, zazwyczaj na krótkie terminy, zgodnie z potrzebami⁸. Usługi te obejmują m.in. carsharing, ridesharing, bikesharing czy mikromobilność. W miastach, gdzie rosnąca liczba samochodów prowadzi do korków, zanieczyszczeń powietrza i problemów z parkowaniem, współdzielenie środków transportu staje się atrakcyjną alternatywą dla tradycyjnych form przemieszczania się. Ten rodzaj transportu odciąża także infrastrukturę miejską – zmniejsza bowiem zapotrzebowanie na miejsca parkingowe i pozwala lepiej zagospodarować przestrzeń publiczną. W efekcie miasta stają się bardziej przyjazne dla pieszych, rowerzystów i mieszkańców. Rozwój transportu współdzielonego wspiera innowacje i cyfryzację usług miejskich. Nowoczesne aplikacje, systemy rezerwacji, płatności bezgotówkowe oraz integracja z innymi formami transportu czynią poruszanie się po mieście bardziej nowoczesnym i efektywnym^{9,10}.

Jednostką organizacyjną odpowiedzialną za planowanie, organizację i kontrolę funkcjonowania publicznego transportu zbiorowego na terenie Krakowa oraz aglomeracji krakowskiej jest Zarząd Transportu Publicznego. Na jego zlecenie działa Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne, które jest głównym operatorem przewozów miejskich i aglomeracyjnych.

⁴ Sygut, E., Advertising Fee–Spatial Order Or Fiscal Objective?. *Mind Journal*, (16), 1-13, 2023

⁵ Sánchez Toledano, J., Duarte Monedero, B., Flores Ureba, S. i Simón de Blas, C., Efektywność miejskiego transportu publicznego i jego wpływ na zrównoważony rozwój środowiska, 2025

⁶ Toledano, JS, Monedero, BD, Flores-Ureba, S. i de Blas, CS, Efektywność miejskiego transportu publicznego i jej wpływ na zrównoważony rozwój środowiska. *Zrównoważone technologie i przedsiębiorczość*, 4 (2), 100097, 2025

⁷ Janczewski, J., & Janczewska, D., Zrównoważony rozwój z perspektywy mikromobilności. *Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie*, (2/29), 165-187, 2019

⁸ Machado, CAS, de Salles Hue, NPM, Berssaneti, FT i Quintanilha, JA, Przegląd mobilności współdzielonej. *Zrównoważony rozwój*, 10 (12), 4342, 2022

⁹ Martinez, L. M., Pritchard, J. P., & Crist, P., Shared Mobility's Role in Sustainable Mobility: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 49, 2024

¹⁰ Machado, C. A. S., de Salles Hue, N. P. M., Berssaneti, F. T., & Quintanilha, J. A., An overview of shared mobility. *Sustainability*, 10(12), 4342, 2018

Kraków jest jednym z wiodących miast w Polsce pod względem dostępności usług transportu współdzielonego. Obok rozwiniętej sieci transportu publicznego (tab. 1), mieszkańcy i turyści mają do dyspozycji szereg firm oferujących wynajem samochodów na minuty, elektrycznych hulajnóg czy rowerów miejskich (tab. 2). Usługi te pozwalają na elastyczne, często ekologiczne przemieszczanie się po mieście i jego okolicach, bez potrzeby posiadania własnego pojazdu. Do dyspozycji w transporcie współdzielonym zalicza się carsharing, ridesharing oraz hulajnogi i rowery elektryczne. Transport współdzielony w Krakowie tworzy bogaty i różnorodny ekosystem, który umożliwia mieszkańcom dostęp do niemal każdej formy mobilności – od szybkiego przejazdu Uberem, przez wynajem auta na weekend, po wygodną hulajnogę na ostatni kilometr. Różne firmy oferują komplementarne usługi, a część z nich integruje różne formy mobilności w jednej aplikacji. Miasto, wspólnie z operatorami, rozwija infrastrukturę ładowania i miejsc postoju, co czyni transport współdzielony coraz bardziej dostępnym i wygodnym.

Tabela 1. Liczba pojazdów transportu publicznego (szt.)

Rodzaj	Liczba pojazdów
Autobusy spalınowe	651
Autobusy elektryczne	121
Tramwaje	365

Tabela 2. Liczba pojazdów transportu współdzielonego (szt.)

Rodzaj	Liczba pojazdów
Samochody	750
Hulajnogi elektryczne	9500
Rowery elektryczne	100
Skutery elektryczne	110

Zarówno transport publiczny, jak i współdzielony, różnią się charakterem organizacyjnym, stopniem formalizacji i modelem finansowania¹¹ (tab. 3).

Tabela 3. Cechy transportu publicznego i współdzielonego

Cecha	Transport publiczny	Transport współdzielony
Trasy	Stałe	Elastyczne
Koszt	Zwykle niski	Średni lub wysoki
Ekologia	Wysoka	Zależy od formy
Wygoda	Średnia	Wysoka
Dostępność	Rozkład jazdy	24/7

¹¹ Carrese, F., Nigro, M., Patella, S. M., Toninelli, A., The integration of shared autonomous vehicles in public transportation services: A systematic review. Sustainability, 15(2), 1594, 2023

Odpowiadają jednak na wspólne wyzwania tj. konieczność ograniczania emisji, poprawa jakości życia w miastach oraz zapewnienie równego dostępu do środków transportu. Ich skuteczność zależy jednak nie tylko od rozwoju infrastruktury, ale również od poziomu jakości oferowanych usług oraz ich efektywności operacyjnej i społecznej.

Transport publiczny i współdzielony stanowi zatem istotny element zrównoważonego systemu mobilności miejskiej, a jego jakość i efektywność mają podstawowe znaczenie dla satysfakcji użytkowników oraz ograniczania negatywnych skutków transportu indywidualnego. W dobie dynamicznych zmian technologicznych ocena jakości oraz efektywności tych form transportu staje się nie tylko ważnym zagadnieniem badawczym, ale również narzędziem wspierającym podejmowanie decyzji przez władze samorządowe i operatorów¹².

Sprawne funkcjonowanie systemów transportowych wpływa korzystnie na jakość życia użytkowników i mieszkańców, szczególnie w gęsto zaludnionych obszarach miejskich. Jakość usług jest czynnikiem determinującym wzrost zadowolenia pasażerów transportu, jednak zrozumienie relacji jakości usług i zadowolenia jest ograniczone¹³. Wymagania jakościowe stawiane przez pasażerów komunikacji nieustannie rosną. Wynika to zarówno ze wzrastającej świadomości ich własnych potrzeb, jak i z ogólnej poprawy jakości życia w miastach. W miarę jak mieszkańcy stają się coraz bardziej wymagający i świadomi dostępnych standardów, rośnie także ich oczekiwanie wobec komfortu, dostępności i efektywności usług. Spełnienie tych oczekiwań ma znaczenie dla sposobu, w jaki pasażerowie postrzegają usługodawcę.

Stąd też celem pracy była ocena jakości i efektywności transportu publicznego i współdzielonego w Krakowie na podstawie doświadczeń i opinii jego użytkowników.

Material i metody

W celu oceny jakości i efektywności funkcjonowania transportu publicznego oraz współdzielonego w Krakowie, przeprowadzono badanie ilościowe z wykorzystaniem ankiety internetowej, która pozwoliła zebrać dane bezpośrednio od użytkowników systemu transportowego. Głównym celem badania było poznanie opinii mieszkańców oraz użytkowników miejskich systemów transportowych na temat ich dostępności, jakości usług, poziomu integracji różnych form transportu, a także ogólnego funkcjonowania tych systemów w codziennym użytkowaniu.

Ankieta została przygotowana w formie elektronicznej i zawierała łącznie 24 pytania jedno i wielokrotnego wyboru. Pytania dotyczyły m.in. częstotliwości korzystania z transportu publicznego i współdzielonego, poziomu zadowolenia z usług komunikacyjnych, barier w dostępie do transportu oraz preferencji dotyczących przyszłych rozwiązań mobilności w mieście.

¹² Dandl, F., & Bogenberger, K., Evaluation methods for the impacts of shared mobility: Classification and critical review. *Sustainability*, 12(24), 10504., 2020

¹³ Wtorek, K., & Piersiala, L., Modele organizacji miejskiego transportu publicznego pod kątem skutecznych mechanizmów zarządzania. *Management & Quality/Zarządzanie i Jakość*, 7(1), 2025

W badaniu wzięło udział 50 respondentów, którzy zadeklarowali korzystanie z transportu publicznego lub współdzielonego na terenie Krakowa.

Wśród ankietowanych było 58% kobiet, 40% mężczyzn oraz 2% osób, które nie określiły płci. Najliczniejszą grupę wiekową stanowili respondenci w wieku 25-34 lata (46%), kolejne grupy to osoby w wieku 18-24 lata (26%), 35-44 lata (12%), 45-54 lata (8%), poniżej 18. roku życia (6%) oraz 55-64 lata (2%).

Respondenci pochodzili z różnych obszarów Krakowa oraz okolicznych miejscowości. Najwięcej osób wskazało miejsce zamieszkania jako Kraków - dzielnice peryferyjne (44%). Kolejno uplasowali się mieszkańcy centrum miasta (26%), osoby mieszkające w miejscowościach pod Krakowem (24%) oraz respondenci z innych miast i miejscowości (6%).

Do oceny usług transportowych wykorzystano wskaźniki jakościowe oraz wskaźniki efektywności. Wskaźnik jakościowy odnosi się do subiektywnych odczuć i ocen użytkowników w aspekcie różnych form korzystania z usług transportowych. Obejmuje on takie elementy jak punktualność, łatwość dostępu, poczucie bezpieczeństwa czy ogólny poziom satysfakcji z użytkowania. Wskaźnik ten pozwala na ocenę jakości usług z perspektywy pasażerów, a także identyfikuje te czynniki, które są dla nich najistotniejsze w korzystaniu z tego typu transportu. Wskaźnik efektywności z kolei odnosi się do obiektywnej oceny funkcjonowania systemu transportowego, uwzględniającej jego praktyczną użyteczność i skuteczność w zaspokajaniu potrzeb użytkowników. Pomiar opiera się na analizie rzeczywistego korzystania z usług transportowych oraz takich czynników jak dostępność czasowa, poziom ponoszonych kosztów, możliwość podróży w trybie multimodalnym, integracja i wpływ nowoczesnych technologii. Wskaźnik ten koncentruje się na funkcjonalnym wymiarze transportu, ocenia efektywność działania systemu w praktyce, sprawność przemieszczania się oraz stopień realizacji codziennych potrzeb komunikacyjnych.

Wyniki badań

W ramach oceny dostępności pojazdów transportu publicznego i współdzielonego (tramwaj, autobus, hulajnogi, skutery) w miejscu zamieszkania lub jego najbliższym otoczeniu, 48% respondentów wyraziło pozytywną opinię, wskazując odpowiedzi „dobrze” (32%) lub „bardzo dobrze” (16%) (tab. 4). Wynik ten sugeruje, że niemal połowa badanych dostrzega korzystne rozmieszczenie środków transportu w przestrzeni miejskiej, co może świadczyć o skuteczności lokalnych rozwiązań komunikacyjnych i planistycznych. Z kolei 32% uczestników badania zaznaczyło odpowiedź „nie dotyczy”, co może oznaczać brak potrzeby korzystania z tych pojazdów lub ich fizyczną niedostępność w bezpośrednim otoczeniu. Pozostała część respondentów oceniła dostępność mniej przychylnie, bowiem 16% wskazało odpowiedź „przeciętnie”, a 4% oceniło ją jako „złą”. Te wyniki mogą insynuować istnienie pewnych niedociągnięć w rozmieszczeniu lub dostępności środków transportu w niektórych obszarach miejskich.

W odniesieniu do pytania dotyczącego infrastruktury wspierającej korzystanie z alternatywnych środków transportu takich jak miejsca do parkowania hulajnóg, ścieżki rowerowe czy inne elementy przestrzeni miejskiej – odpowiedzi respondentów ukazują wyraźny podział opinii. Pozytywnie o jakości dostępnej infrastruktury wypowiedziało się 46% ankietowanych, co wskazuje, że część badanych osób dostrzega jej użyteczność oraz odpowiednie

dostosowanie do potrzeb użytkowników. Jednocześnie aż ponad połowa, bo 54% respondentów wybierając odpowiedź “przeciętnie”, “źle” lub “bardzo źle” uznało infrastrukturę za niewystarczającą lub nieodpowiednio zaprojektowaną. Wskazuje to na istotne braki lub niedociągnięcia w organizacji przestrzeni miejskiej, które mogą utrudniać efektywne i bezpieczne korzystanie z mikromobilnych środków transportu. Wyniki te podkreślają potrzebę dalszego rozwoju oraz modernizacji infrastruktury, aby lepiej odpowiadała na rosnące zainteresowanie zrównoważonymi formami przemieszczania się.

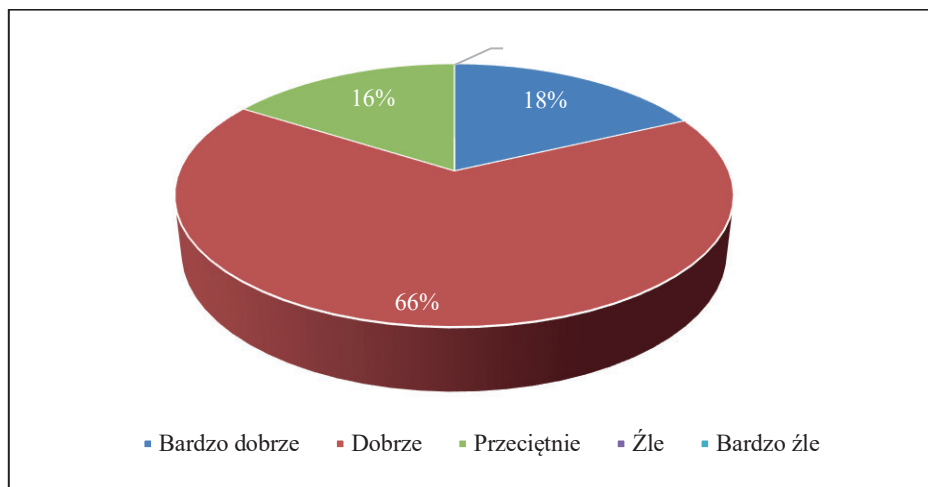
Tabela 4. Ocena dostępności i jakości miejskich systemów transportu

Wyszczególnienie	Dostępność pojazdów		Jakość infrastruktury	
	(szt.)	(%)	(szt.)	(%)
Bardzo dobrze	8	16	3	6
Dobrze	16	32	20	40
Przeciętnie	8	16	19	38
Źle	2	4	3	6
Bardzo źle	–	–	5	10
Nie dotyczy	16	32	–	–

Pojęcie dostępności czasowej odnosi się do oceny, na ile środki transportu są osiągalne w dogodnych porach dnia, uwzględniając zarówno godziny ich funkcjonowania, jak i częstotliwość kursów oraz przeciętny czas oczekiwania na przejazd. W przypadku tradycyjnych środków komunikacji zbiorowej, takich jak autobusy czy tramwaje, kluczowe znaczenie ma właśnie rozkład jazdy oraz jego dopasowanie do potrzeb mieszkańców – zarówno w godzinach szczytu, jak i poza nimi. Natomiast w odniesieniu do systemów transportu współdzielonego, takich jak rowery czy hulajnogi miejskie, dostępność czasowa przybiera nieco inną formę. Istotnym czynnikiem staje się tu możliwość natychmiastowego skorzystania z pojazdu, bez konieczności oczekiwania na zaplanowany kurs. Użytkownik oczekuje, że pojazd będzie dostępny „tu i teraz”, w momencie zgłoszenia potrzeby przejazdu. W związku z tym, dostępność czasowa w kontekście współdzielonych środków transportu wiąże się przede wszystkim z ich obecnością w najbliższej okolicy i gotowością do natychmiastowego użytku, co wpływa na ich postrzeganą wygodę oraz efektywność, jako alternatywy dla tradycyjnej komunikacji miejskiej^{14,15}. Ocena punktualności środków transportu publicznego stanowi istotny element analizy dostępności czasowej, mając bezpośredni wpływ na postrzeganą jakość usług transportowych. Z przeprowadzonego badania wynika, że aż 84% respondentów zadeklarowało zadowolenie z punktualności kursów, co jednoznacznie świadczy o pozytywnym odbiorze tej cechy przez zdecydowaną większość użytkowników (rys. 1).

¹⁴ Żochowska, R., Kłos, M. J., Soczówka, P., Pilch, M., Assessment of accessibility of public transport by using temporal and spatial analysis. Sustainability, 14(23), 16127, 2022

¹⁵ Schwinger, F., Tanriverdi, B., Jarke, M., Comparing micromobility with public transportation trips in a data-driven spatio-temporal analysis. Sustainability, 14(14), 8247, 2022



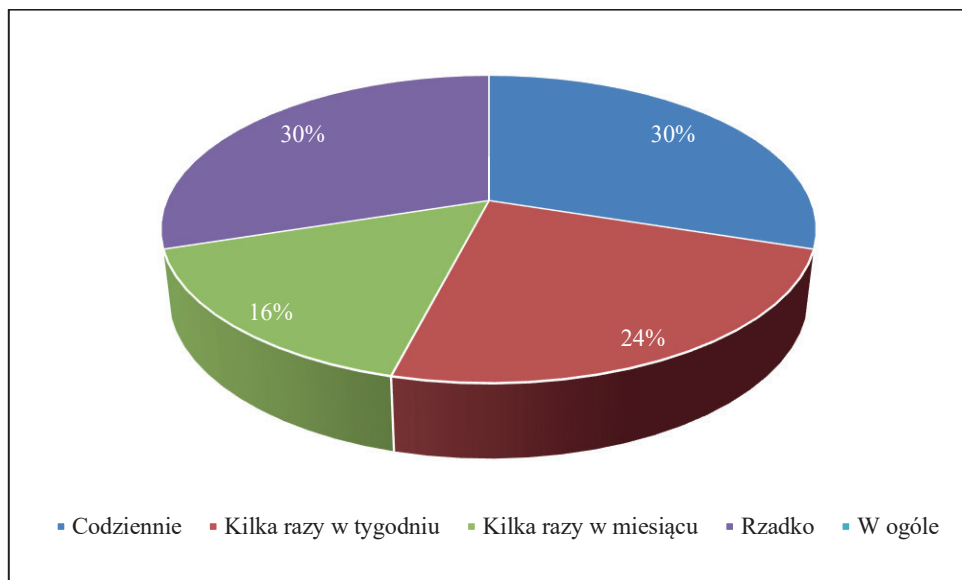
Rysunek 1. Punktualność transportu publicznego

Wysoki poziom satysfakcji w tym zakresie sugeruje, że system transportu publicznego w dużej mierze spełnia oczekiwania mieszkańców w kontekście przewidywalności oraz zgodności kursów z rozkładem jazdy. Z drugiej strony, 16% badanych oceniło punktualność jako przeciętną, co może wskazywać na występowanie pewnych problemów z regularnością przejazdów, zwłaszcza w godzinach szczytu komunikacyjnego, kiedy sieć transportowa jest najbardziej obciążona. Warto podkreślić, że zarówno punktualność, jak i krótki czas przejazdu należały do najczęściej wskazywanych przez respondentów aspektów decydujących o jakości podróży. Świadczy to o wysokich wymaganiach użytkowników względem efektywności czasowej transportu publicznego, co stawia przed organizatorami systemu komunikacji wyzwanie ciągłego doskonalenia harmonogramów i optymalizacji tras, w celu zapewnienia sprawnych i terminowych przejazdów.

Analiza dotycząca częstotliwości korzystania z dostępnych środków transportu wskazuje, że znaczna część badanych korzysta z komunikacji miejskiej codziennie lub stosunkowo często (rys. 2).

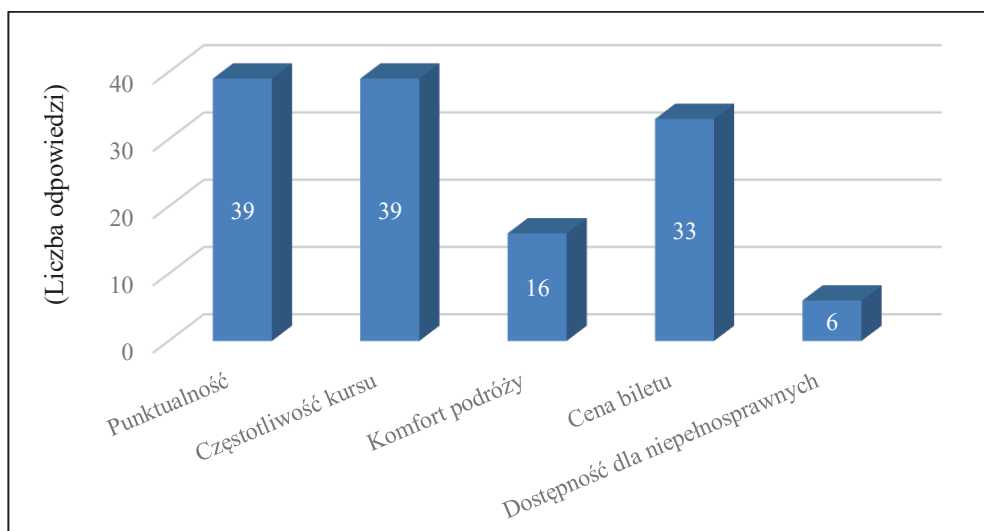
Taki poziom regularności może świadczyć o istotnej roli, jaką transport publiczny odgrywa w codziennym funkcjonowaniu mieszkańców – zarówno w zakresie dojazdów do pracy, szkoły, jak i realizacji innych codziennych aktywności. Wysoka częstotliwość użytkowania sugeruje również, że system transportu publicznego jest postrzegany jako dostępny i funkcjonalny pod względem czasowym, co oznacza, że oferowane godziny kursowania oraz częstotliwość przejazdów w dużej mierze odpowiadają potrzebom użytkowników. Regularne korzystanie może być również efektem zaufania do punktualności i przewidywalności usług transportowych, co w konsekwencji wzmacnia pozytywny wizerunek komunikacji miejskiej jako realnej i wygodnej alternatywy dla transportu indywidualnego¹⁶.

¹⁶ Krawiec, S., Wyzwania dotyczące kształtowania zrównoważonej mobilności w miastach i aglomeracjach. Regional Barometer. Analyses & Prognoses, 14(4), 129-138, 2016



Rysunek 2. Częstotliwość korzystania z transportu publicznego

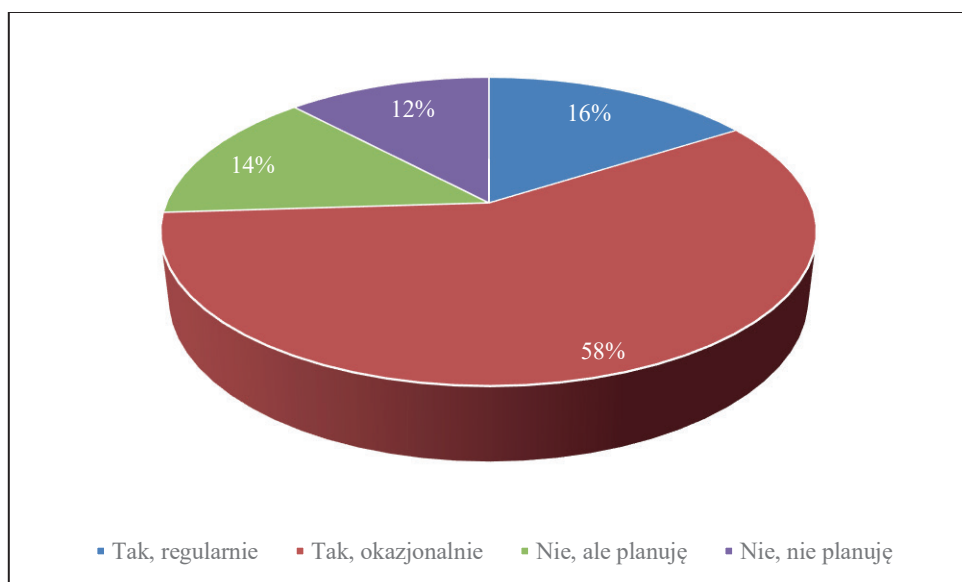
W ramach badania ankietowani zostali poproszeni o wskazanie, które cechy transportu publicznego są dla nich najważniejsze (rys. 3).



Rysunek 3. Cechy transportu publicznego

Choć komfort podróży został zauważony jako istotny, to odpowiedzi respondentów dają do zrozumienia, że w codziennej praktyce zdecydowanie większe znaczenie przypisuje się takim aspektom jak punktualność, wysoka częstotliwość kursów (po 39 odpowiedzi) oraz przystępność cenowa biletów (33 odpowiedzi). Wskazuje to na funkcjonalne podejście użytkowników do usług transportowych, w którym komfort schodzi na dalszy plan w porównaniu z efektywnością czasową i ekonomiczną podróży.

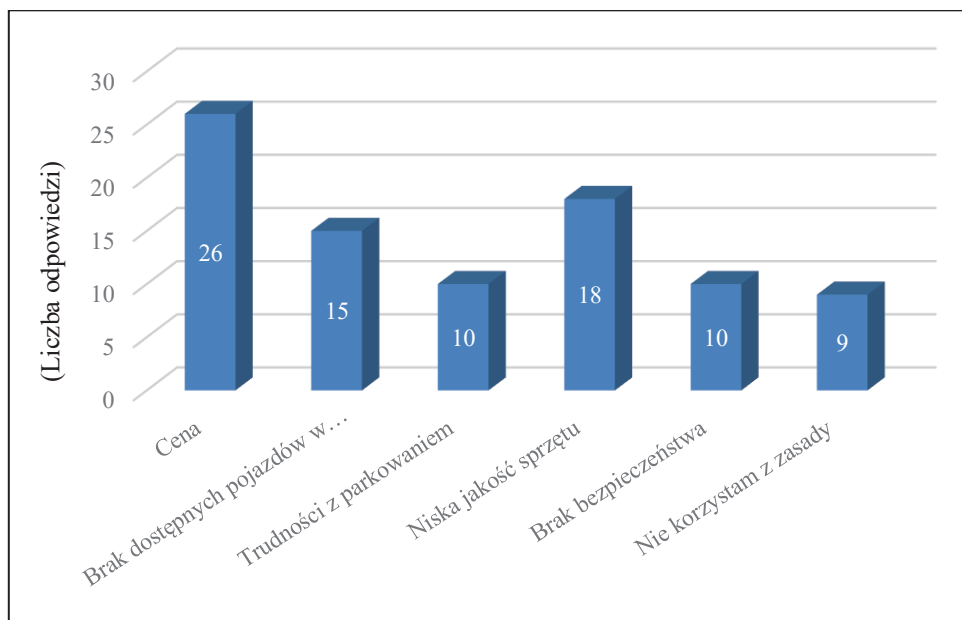
Analiza częstotliwości korzystania z transportu współdzielonego pozwala wnioskować, że duża grupa użytkowników jest otwarta na nowe formy mobilności. Według uzyskanych wyników aż 74% respondentów wskazało, że korzysta z transportu współdzielonego, w tym 16% regularnie, a 58% okazjonalnie (rys. 4). 29 osób, które okazjonalnie używają tę formę transportu może sugerować, że pojazdy współdzielone są wykorzystywane głównie jako uzupełnienie codziennego przemieszczania się.



Rysunek 4. Częstotliwość korzystania z transportu współdzielonego

Jednym z najistotniejszych czynników wpływających na codzienne wybory komunikacyjne mieszkańców miast stanowi koszt korzystania z transportu. Obejmuje on zarówno ceny biletów komunikacji miejskiej, jak i opłaty związane z użytkowaniem pojazdów współdzielonych, takich jak hulajnogi, rowery czy samochody na minuty. W ramach badania respondenci zostali poproszeni o wskazanie barier, które zniechęcają ich do korzystania z usług transportu współdzielonego (rys. 5). Najczęściej wymienianym czynnikiem była wysoka cena tych usług – odpowiedź tę zaznaczyło aż 54% ankietowanych. Tak wysoki odsetek wskazań pozwala wnioskować, że obowiązujące stawki są dla wielu użytkowników nieatrakcyjne finansowo, szczególnie w porównaniu z relatywnie tańszą i bardziej przewidywalną kosztowo komunikacją miejską. Poza kosztem, respondenci

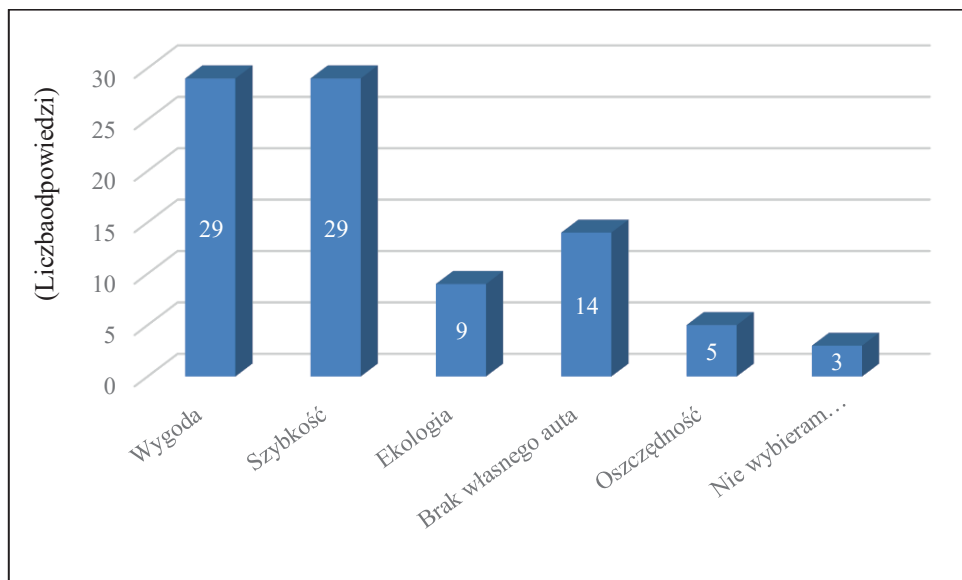
zwracali również uwagę na inne problemy związane z transportem współdzielonym. Otóż 36% (18 badanych) wskazało na niską jakość dostępnego sprzętu, co może oznaczać zużycie, awaryjność lub brak komfortu użytkowania. Natomiast 15 osób tj. 30% zadeklarowało, że przeszkodą w korzystaniu z transportu współdzielonego jest brak dostępnych pojazdów w najbliższym otoczeniu. Może to świadczyć o nierównomiernym rozmieszczeniu pojazdów w przestrzeni miejskiej lub niewystarczającej liczbie jednostek w stosunku do popytu.



Rysunek 5. Bariery korzystania z transportu współdzielonego

Natomiast spośród powodów, dla których wybierano transport współdzielony najczęściej wskazywano na wygodę oraz szybkość – odpowiedzi te zaznaczyło po 29 osób, co stanowiło 58% respondentów (rys. 6).

Na uwagę zasługuje fakt, że główną przewagą transportu współdzielonego nie jest jego opłacalność, lecz zdolność do szybkiego i elastycznego zaspokajania potrzeby mobilności, zwłaszcza w sytuacjach wymagających natychmiastowego przemieszczenia się. Można zatem stwierdzić, że transport współdzielony postrzegany jest przede wszystkim jako usługa wygodna i dynamiczna, jednak dostępna głównie dla osób gotowych zaakceptować wyższe koszty w zamian za komfort i oszczędność czasu.



Rysunek 6. Zalety transportu współdzielonego

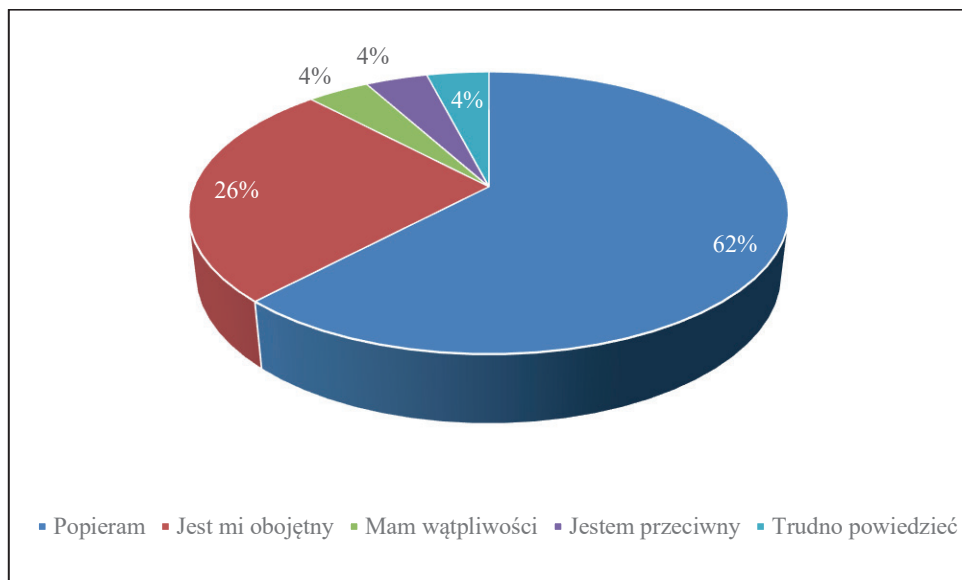
W badaniu uwzględniono również postawy mieszkańców wobec rozwoju transportu współdzielonego (rys. 7). Zdecydowana większość respondentów (62%) wyraziła poparcie dla dalszej rozbudowy tej formy mobilności, co pozwala wnioskować, że użytkownicy dostrzegają jej potencjał jako uzupełnienie tradycyjnego systemu transportu zbiorowego. Należy bowiem podkreślić, że transport współdzielony, taki jak miejskie hulajnogi, rowery czy samochody na minuty, postrzegany jest jako elastyczne rozwiązanie, zwiększające dostępność przestrzeni miejskiej i umożliwiające szybkie przemieszczanie się w sytuacjach, w których transport publiczny może okazać się mniej wygodny lub niedostępny¹⁷.

Współczesna mobilność dąży do integracji różnych systemów transportowych, a celem jest ułatwienie użytkownikom planowanie podróży, zakupu biletu oraz płynnego przesiadania się. Wskaźnik poparcia dla integracji systemów transportowych służy do oceny w jakim stopniu użytkownicy popierają integrację mobilnych aplikacji zarówno środków transportu publicznego, jak i współdzielonego¹⁸. Poparcie zintegrowania systemów transportu publicznego i współdzielonego w Krakowie deklaruje 88% badanych, wybierając odpowiedź “zdecydowanie tak” i “raczej tak” (rys. 8). Tak wysoki poziom wskazuje na społeczne zapotrzebowanie na bardziej intuicyjne i dostępne narzędzia transportowe. Respondenci dostrzegają potencjalne korzyści integracji, takie jak oszczędność czasu, wygoda użytkownika czy lepsze planowanie podróży.

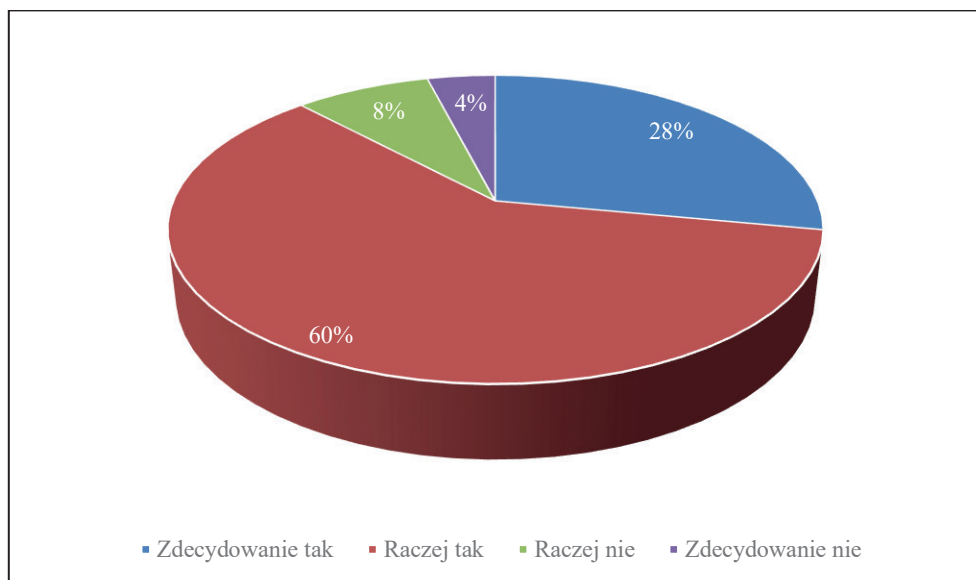
Mimo to, nadal spora grupa osób ma obawy czy wręcz jest przeciwna wprowadzaniu tego typu form transportu do komunikacji miejskiej.

¹⁷ Vidan, L., Slavulj, M., Grgurević, I., & Sikirić, M., An Overview of Shared Mobility Operational Models in Europe. *Applied Sciences*, 15(7), 4045, 2025

¹⁸ Chmiel, B., Pawłowska, B., & Szmelter-Jarosz, A., Mobility-as-a-service as a catalyst for urban transport integration in conditions of uncertainty. *Energies*, 16(4), 1828, 2023

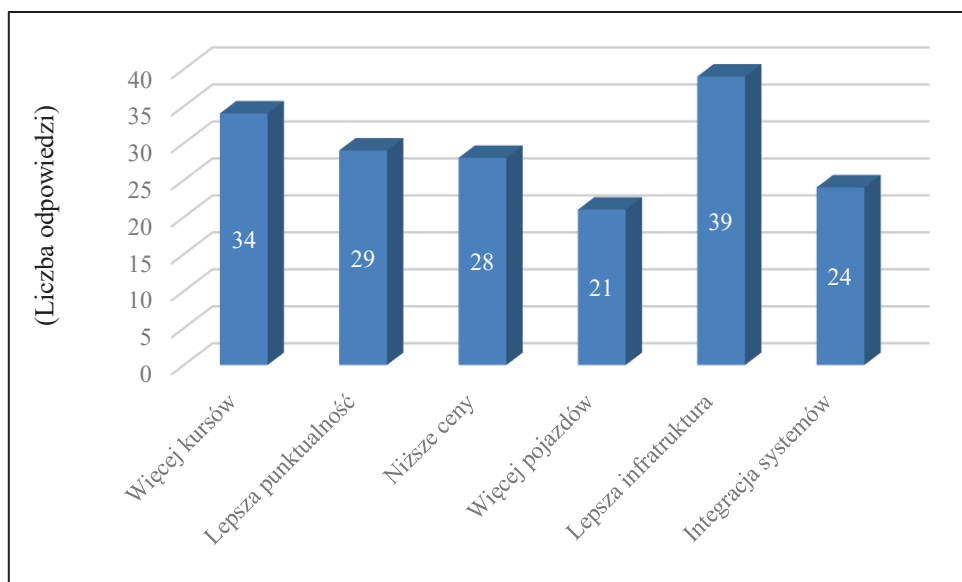


Rysunek 7. Rozwój transportu współdzielonego w Krakowie



Rysunek 8. Integracja publicznego i współdzielonego systemu transportu

Ogólna ocena jakości transportu w Krakowie obejmująca m.in. gęstość sieci połączeń, częstotliwość kursowania, dostępność przystanków i węzłów przesiadkowych, integrację różnych środków transportu (autobus, tramwaj, rower, car-sharing) w opinii jej użytkowników wypadła dobrze, bowiem aż 86% pozytywnie wypowiedziało się na ten temat. Jest to wynik, który pozwala uznać, że system transportu w większości spełnia oczekiwania klientów. Nie oznacza to jednak, że nie widzą potrzeby poprawy niektórych elementów, na co wskazują odpowiedzi przedstawione na rysunku 9.



Rysunek 9. Poprawa efektywności miejskich systemów transportu

Najwięcej osób (78%) jako problem wymagający poprawy wskazała rozbudowę i poprawę infrastruktury m.in. przystanków (oświetlenie, tablice informacyjne), udogodnień dla transportu współdzielonego (bezpieczne miejsca postojowe). Również często poruszanym obszarem było zwiększenie liczby kursów (68%), poprawa punktualności (58%), obniżenie cen biletów (56%), lepsza integracja różnych środków transportu (48%) oraz zwiększenie dostępności pojazdów współdzielonych (42%). Wyniki te pokazują, że mimo ogólnej satysfakcji, mieszkańcy oczekują dalszego doskonalenia usług w kierunku większej spójności, elastyczności i przystępności komunikacyjnej.

Najczęściej wskazywane propozycje mogą posłużyć jako wytyczne dla dalszego rozwoju systemu transportowego w mieście.

Podsumowanie i wnioski

Badanie przeprowadzone wśród użytkowników transportu publicznego i współdzielonego w Krakowie pozwoliło ocenić jego jakość oraz efektywność. Zebrane odpowiedzi ukazują, że komunikacja miejska, szczególnie tramwaje, cieszy się dużym zainteresowaniem i jest oceniana pozytywnie, choć istnieje potrzeba poprawy dostępności i częstotliwości kursów. Natomiast transport współdzielony, mimo dostępności w przestrzeni miejskiej, nie jest jeszcze powszechnie wykorzystywany, gdyż ograniczają go bariery głównie wysokich kosztów i dostępności. Wśród oczekiwań mieszkańców są m.in. rozwój infrastruktury, lepsza integracja form transportu czy wdrożenie nowych rozwiązań technologicznych, jak np. połączenie aplikacji mobilnych.

Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano następujące wnioski:

1. Aż 86% respondentów oceniło ogólne funkcjonowanie transportu publicznego w Krakowie jako bardzo dobre lub dobre. Szczególnie wysoko oceniono punktualność – pozytywnie oceniło ją 84% badanych, co potwierdza dobrą organizację kursów i rozkładów jazdy.
2. Blisko połowa respondentów (48%) uznało dostępność pojazdów publicznych (tramwaje, autobusy) i współdzielonych (hulajnóg, rowerów, samochodów) w swojej okolicy za dobrą lub bardzo dobrą, jednak 32% stwierdziło, że temat ich „nie dotyczy”, co wskazuje na ograniczony zasięg lub niską potrzebę korzystania w niektórych dzielnicach.
3. Za najważniejsze cechy usług transportowych uznano: punktualność (78%), częstotliwość kursów (78%) oraz cenę biletu (66%). Natomiast komfort podróży znalazł się dopiero na dalszym miejscu (32%), co sugeruje bardziej funkcjonalne, niż luksusowe podejście użytkowników do przemieszczania się po mieście.
4. Główną barierą dla transportu współdzielonego okazała się cena, bowiem 54% respondentów wskazało wysoką cenę jako najważniejszą barierę korzystania z transportu współdzielonego. Z pozostałych czynników wskazano niską jakość sprzętu (36%) i brak dostępnych pojazdów w pobliżu (30%).
5. 54% respondentów korzysta z transportu publicznego codziennie lub kilka razy w tygodniu, co potwierdza jego kluczową rolę w codziennej mobilności mieszkańców Krakowa. Natomiast transport współdzielony ma bardziej uzupełniający charakter, gdyż tylko 16% korzysta regularnie, a 58% okazjonalnie.
6. 60% uczestników badania użytkuje aplikacje mobilne do planowania podróży przynajmniej sporadycznie, co wskazuje na rosnące znaczenie cyfryzacji w mobilności miejskiej.
7. Najczęściej wskazywane propozycje poprawy to: rozbudowa infrastruktury (78%), zwiększenie liczby kursów (68%), poprawa punktualności (58%), obniżenie cen biletów (56%) oraz lepsza integracja różnych środków transportu (48%).
8. 62% respondentów popiera dalszy rozwój usług współdzielonych w Krakowie. Wskazuje to na duży potencjał integracji tych usług z istniejącą komunikacją miejską.

Bibliografia

- Carrese, F., Nigro, M., Patella, S. M., & Toninelli, A., The integration of shared au-tonomous vehicles in public transportation services: A systematic review. *Sustainability*, 15(2), 1594, 2023
- Chmiel, B., Pawłowska, B., & Szmelter-Jarosz, A, Mobility-as-a-service as a catalyst for urban transport integration in conditions of uncertainty. *Energies*, 16(4), 1828, 2023
- Dandl, F., & Bogenberger, K., Evaluation methods for the impacts of shared mobility: Classification and critical review. *Sustainability*, 12(24), 10504. <https://doi.org/10.3390/su122410504>, 2020
- Heinitz, F., Sustainable development assessment of incentive-driven shared on-demand mobility systems in rural settings. *European Transport Research Review*, 14, 32, 2022
- Jagiello, A., Economic efficiency of sustainable public transport: A literature review on electric and diesel buses. *Energies*, 18(6), 1352, 2025
- Janczewski, J., & Janczewska, D., Zrównoważony rozwój z perspektywy mikromobilności. *Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie*, (2/29), 165-187, 2019
- Krawiec, S., Wyzwania dotyczące kształtowania zrównoważonej mobilności w miastach i aglomeracjach. *Regional Barometer. Analyses & Prognoses*, 14(4), 129-138, 2016
- Machado, C. A. S., de Salles Hue, N. P. M., Berssaneti, F. T., & Quintanilha, J. A., An overview of shared mobility. *Sustainability*, 10(12), 4342, 2018
- Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A., Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*, 36(5), 409-419, 2021
- Martinez, L. M., Pritchard, J. P., & Crist, P., Shared Mobility's Role in Sustainable Mobility: Past, Present, and Future. *Annual Review of Environment and Resources*, 49, 2024
- Radzinski, A.: Accessibility of Vulnerable Populations to Essential Opportunities: a Multi-modal Approach with Application to Four Polish Cities. *Networks and Spatial Economics*, 1-28, 2024
- Sánchez Toledano, J., Duarte Monedero, B., Flores Ureba, S. i Simón de Blas, C., Efektywność miejskiego transportu publicznego i jego wpływ na zrównoważony rozwój środowiska., 2025
- Schwinger, F., Tanriverdi, B., & Jarke, M., Comparing micromobility with public transportation trips in a data-driven spatio-temporal analysis. *Sustainability*, 14(14), 8247, 2022
- Sygut, E., Advertising Fee—Spatial Order Or Fiscal Objective?. *Mind Journal*, (16), 1-13, 2023
- Toledano, JS, Monedero, BD, Flores-Ureba, S. i de Blas, CS, Efektywność miejskiego transportu publicznego i jej wpływ na zrównoważony rozwój środowiska. *Zrównoważone technologie i przedsiębiorczość*, 4 (2), 100097, 2025
- Vidan, L., Slavulj, M., Grgurević, I., & Sikirić, M., An Overview of Shared Mobility Operational Models in Europe. *Applied Sciences*, 15(7), 4045, 2025
- Wtorek, K., & Piersiala, L., Modele organizacji miejskiego transportu publicznego pod kątem skutecznych mechanizmów zarządzania. *Management & Quality/Zarządzanie i Jakość*, 7(1), 2025
- Żochowska, R., Kłos, M. J., Soczówka, P., & Pilch, M., Assessment of accessibility of public transport by using temporal and spatial analysis. *Sustainability*, 14(23), 16127, 2022

Adres do korespondencji: urszula.malaga-tobola@urk.edu.pl

ORCID: Urszula Malaga-Toboła: 0000-0001-7918-8699

ORCID: Maciej Kuboń 0000-0003-4847-8743

ORCID: Dariusz Kwaśniewski 0000-0002-1873-1456

SYSTEMY WIZYJNE JAKO ŹRÓDŁO DANYCH W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ PRODUKCJI

Andrzej Sioma¹

¹ Katedra Automatyzacji Procesów, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki,
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

Wprowadzenie

Wraz ze rozwojem obserwowanym w zakresie technologii wytwarzania oraz w zakresie rozwoju metod kontroli jakości wytwarzania produktów wzrasta znacząco udział systemów wizyjnych w realizacji zadań kontrolnych i pomiarowych. Zwiększenie wydajności produkcji oraz zakresu kontrolowanych parametrów coraz częściej wyklucza możliwość jej prowadzenia przez operatorów. Wraz ze wzrostem obciążenia i jednocześnie zmęczenia operatora prowadzącego kontrolę jakości następuje spadek jego sprawności i w efekcie skuteczności procesu kontroli. Spadek skuteczności kontroli prowadzonej przez operatora powiązany jest również godzinami pracy oraz częstotliwością i zakresem realizowanych zadań kontrolnych. Temat ten szczegółowo został omówiony w pracy Reiner 2003, prezentującej przegląd badań obejmujących opis koncentracji operatora i czynników oddziałujących na operatora¹. Na podstawie przeprowadzonych badań szacuje się, że skuteczność prowadzenia kontroli wizualnej osiąga maksymalnie poziom 80%. Jednak doświadczenia przemysłowe wskazują na to, że wynik ten może być znacząco niższy. Operatorzy pracujący na stanowisku kontrolnym realizujący monotonne i powtarzalne zadania szybko tracą koncentrację lub wręcz przerywają operacje kontrole, aby odpocząć. Inspekcje wizualne prowadzące do zaburzeń widzenia np. w wyniku obserwacji dużych i szybko transportowanych produktów bez możliwości obserwacji w polu widzenia elementów nieruchomych.

Wymusza to konieczność wprowadzenia zautomatyzowanych systemów kontrolnych lub pomiarowych na linii produkcyjnej. Jednym ze stosowanych rozwiązań są systemy wizyjne. Systemy te umożliwiają realizację operacji kontrolnych ze znacząco większą częstotliwością niż operator co pozwala na realizację zadań kontrolnych na wszystkich wytwarzanych produktach. Dodatkowo możliwa jest kontrola zbioru parametrów w jednym systemie na podstawie analizy obrazu produktu. Systemy wizyjne umożliwiają jednocześnie powiązanie parametrów opisujących jakość produktu z numerami seryjnymi produktu oraz parametrami

¹ Reiner J.: Identyfikacja i modelowanie optyczne systemów wizyjnej kontroli jakości wytwarzania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2003

technologicznymi, przy których wykonano produkt. Zbór danych opisujących jakość wykonania produktu oraz powiązane ich z jakością parametry procesu wytwarzania przesyłane są bezpośrednio do systemów TQM (ang. *Total Quality Managment*). Wyniki pomiarów wykorzystywane są w procesie zarządzania produkcją umożliwiając reakcję na zmiany w nim zachodzące.

W systemach wizyjnych wykorzystywane są metody obrazowania dwuwymiarowego (2D - płaskiego) oraz obrazowania trójwymiarowego (3D). W zakresie obrazowania 2D rejestrowany jest rzut płaski sceny na matrycy sensorów systemu wizyjnego. Matryce sensorów umożliwiają aktualnie rejestrację promieniowania elektromagnetycznego od zakresu ultrafiolet do podczerwieni. Dobór matrycy i projekt systemu obrazowania należy zrealizować pod kątem cech i parametrów wskazanych w specyfikacji pomiarowej dla każdego zadania kontrolnego indywidualnie. Systemy wizyjne 3D umożliwiają dodatkowe rozszerzenie zakresu parametrów, które mogą być kontrolowane na podstawie analizy trójwymiarowego obrazu produktu. Metody obrazowania trójwymiarowego umożliwiają budowę trójwymiarowej reprezentacji kontrolowanego produktu i analizę parametrów niewidocznych na obrazach 2D produktu.

Analiza obrazu i opis produktu w postaci zestawu parametrów w systemach zautomatyzowanych realizowany jest bez udziału operatorów zapewniając ciągłą kontrolę procesu. Ważnym aspektem działania tak zaprojektowanego systemu jest wyeliminowanie konieczności zbierania, analizy i raportowania danych przez operatorów i kierowników produkcji. Monitorowania parametrów parku maszynowego, procesu oraz produktu jest domeną systemów klasy MES (*Manufacturing Execution System*). Jest to system łączący wprost systemy automatyki maszyn i linii produkcyjnych z systemami nadrzędnymi ERP (*Enterprise Resource Planning*). Parametry opisujące proces produkcji pobierane są bezpośrednio z układów sterowania maszyn oraz z systemów kontrolnych pracujących na liniach produkcyjnych. Pozwala to na archiwizację danych historycznych o produkcji i wykorzystaniu ich w procesie optymalizacji i poprawy efektywności prowadzenia procesu.

Systemy wizyjne

Proces projektowania systemu wizyjnego powinien być ściśle ukierunkowany pod realizowane zadanie kontrolne lub pomiarowe. Podejście takie wymaga opracowania szczegółowej specyfikacji kontrolnej, w której będą uwzględnione i opisane parametry produktu podlegające kontroli. Dodatkowo należy przyjąć założenia dla metody kontroli oraz specyfikacji zabudowy systemu obrazowania na linii produkcyjnej lub w przestrzeni roboczej maszyn technologicznych. Aby zrealizować opisane powyżej zadania należy w pierwszym kroku projektu opracować „katalog wad produktu”. Będzie on podstawą przygotowania specyfikacji kontroli produktu.

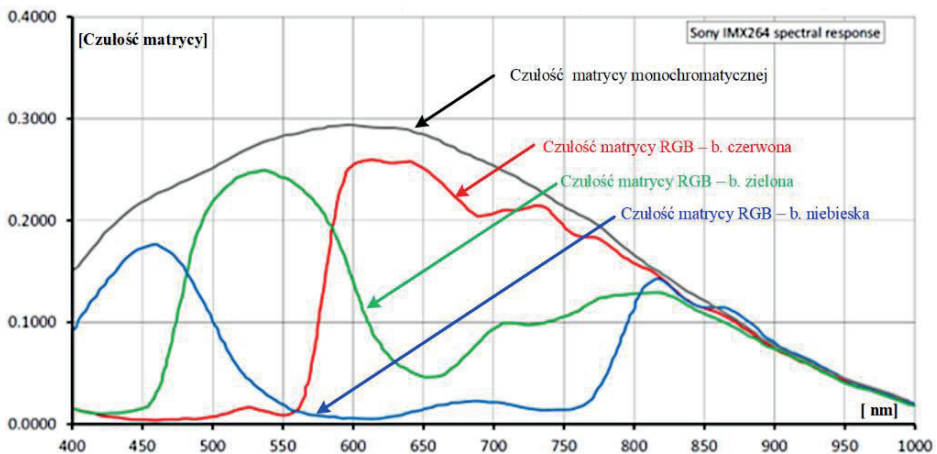
Katalog wad zawiera opis wszystkich parametrów i cech produktu, które będą kontrolowane i zdefiniują jakość wykonania produktu. Wady te powinny być opisane w sposób parametryczny. Opis ten będzie wykorzystany do doboru: metody obrazowania, parametrów toru optycznego, parametrów matrycy sensorów oraz parametrów akwizycji obrazu. Przykładowo w systemach logistycznych należy zdefiniować prędkość transportu kontrolowanych wyrobów. Część metod obrazowania wymaga zatrzymania wyrobu na czas akwizycji obrazu. Inne umożliwiają rejestrację obrazu w czasie ruchu obrazowanego obiektu w systemach transpor-

towych. Wybór metody obrazowania zależy dodatkowo od oczekiwanej wydajności produkcji powiązanej z częstotliwością realizacji operacji kontrolnych oraz zakresu i typu kontrolowanych parametrów.

Bardzo ważnym parametrem obrazowania jest zdefiniowana w specyfikacji kontrolnej rozdzielczość obrazowania. W przypadku systemów wizyjnych 2D rozdzielczość obrazowania definiowana jest jako wymiar najmniejszej możliwej do rejestracji i rozpoznania cechy obrazu np. szerokości mikropęknięcia. Realizacja tego zadania wymaga uwzględnienia w projekcie takich parametrów jak: wymiar pola obrazowania, rozdzielczości matrycy sensorów, dobór toru optycznego oraz wybór zakresu promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego na matrycy.

Obraz w systemach wizyjnych 2D, jak i systemach 3D rejestrowany jest na matrycach sensorów wykonanych w technologii CMOS (ang. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) lub CCD (ang. *Charge-Coupled Device*). Różnice w budowie oraz w procesie przetwarzania informacji na matrycach wpływają na parametry obrazu rejestrowanego przy użyciu obu typów matryc. Parametrem umożliwiającym porównanie różnego typu matryc jest parametr QE (ang. *Quantum Efficiency*) opasujący wydajność zamiany energii fotonów odbieranych na powierzchni sensorów na ładunki elektryczne gromadzoną w sensorze.

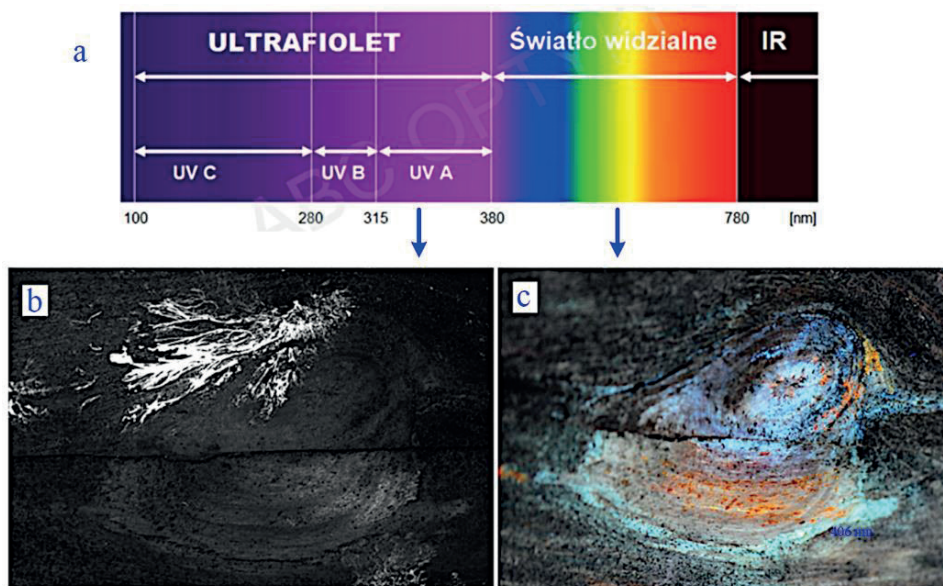
Parametr ten określany jest również jako czułość matrycy zależna od długości rejestrowanej fali elektromagnetycznej. Matryce sensorów charakteryzują się różnymi czułościami w zakresie rejestracji barw oraz rejestracji obrazów monochromatycznych. Zmianę charakterystyki czułości w funkcji długości rejestrowanych fal dla matrycy IMX264 prezentowana na rysunku poniżej.



Rysunek 1. Charakterystyka zmian czułości matrycy w funkcji długości fal promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego na matrycy

Obrazowanie 2D

W przykładzie opisanym poniżej celem obrazowania jest rejestracja cech powierzchni i identyfikacja infekcji grzybiczych obecnych na powierzchni drewna, niewidocznych dla ludzkiego oka. W celu rejestracji obrazu tego typu cech powierzchni wykorzystano połączenie obrazowania w zakresie światła widzialnego oraz promieniowania w zakresie ultrafioletu². Założono, że takie podejście umożliwi rejestrację dwóch różnych obrazów tej samej infekcji i jednocześnie pozwoli na wzmocnienie cech i różnic pomiędzy obszarem zainfekowanego a powierzchnią bez infekcji. W przypadku rejestracji obrazu w zakresie ultrafioletu należy w projekcie systemu wizyjnego uwzględnić dobór kamery o zakresie pracy od 200 do 400 nm. Typowe kamery pracujące w zakresie widzialnym nie umożliwiają rejestracji tego zakresu promieniowania z uwagi na budowę matrycy sensorów. Na rysunku numer 2 prezentowany jest obraz zarejestrowany z wykorzystaniem dwóch kamer i dwóch różnych zakresów rejestracji obrazu. Oba obrazy zostały zarejestrowane dla tego samego obszaru na powierzchni drewna. Rysunek 1b prezentuje obraz zarejestrowany z wykorzystaniem promieniowania z zakresu UV-A a rysunek 1c tą samą powierzchnię oświetloną światłem z zakresu widzialnego z wykorzystaniem matrycy RGB.



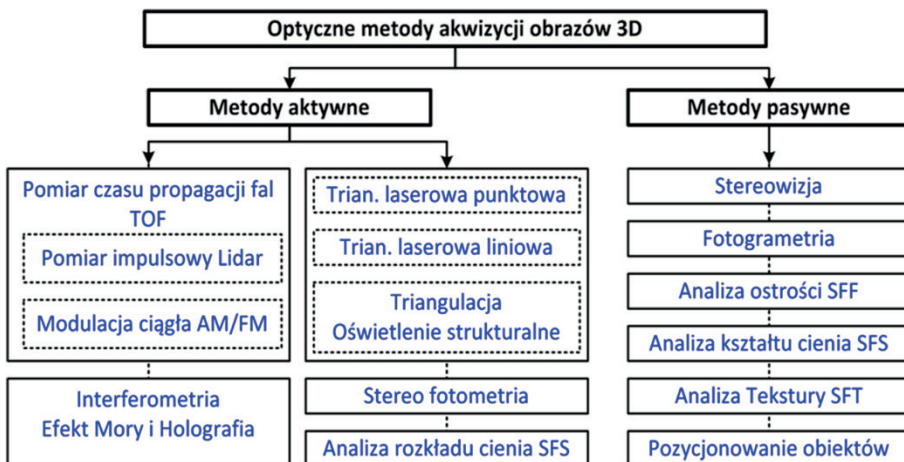
Rysunek 2. Obrazowanie 2D: a – zakres wykorzystanego promieniowania, b – obraz zarejestrowany z wykorzystaniem promieniowania z zakresu UV-A, c – obraz zarejestrowany z wykorzystaniem światła z zakresu widzialnego

² Sioma, A., Lentz, B.: Imaging Fungal Infections on Wood Surfaces Based on a Vision System *Drewno* 68(215), 2025

Powyższy przykład prezentuje obrazowanie powierzchni drewna z infekcjami grzybiczymi. W zależności od wykorzystanej długości promieniowania elektromagnetycznego możliwe jest obrazowanie i identyfikację obecności różnego typu gatunków grzybów rozwijających się na drewnie. Obrazowanie tą metodą umożliwia obserwacji różnych barw odpowiadających różnym gatunkom grzybów rozwijających się na drewnie. Barwy te generowane są przez zjawisko fotoluminescencji aktywowanej oświetlaczem UV. Energia dostarczona na powierzchnie zainfekowane w zakresie ultrafioletu jest emitowana z materiału w zakresie widzialnym w postaci fal o różnych długościach. Rejestracja obrazu RGB w zakresie widzialnym umożliwia rejestrację obrazu promieniowania i „kolorowanie” obszarów zainfekowanych przez różne gatunki grzybów na barwy zależne od gatunku. Metoda ta pozwala na identyfikację obecności infekcji grzybiczych i będzie rozwijana w kierunku identyfikacji gatunku grzybów zasiedlających drewno.

Obrazowanie 3D

Równoległe z rozwojem obrazowania dwuwymiarowego rozwijane są również metody obrazowania trójwymiarowego. Akwizycja obrazu trójwymiarowego obserwowanej sceny może być realizowana metodami bazującymi na wykorzystaniu różnych technik odczytu informacji przestrzennej. Wybór metody budowy obrazu 3D uzależniony jest od parametrów opisujących zadanie kontrolne w zakresie wymaganych rozdzielczości, typu kontrolowanego obiektu, liczby parametrów kontrolowanych na obrazie oraz parametrów opisujących przestrzeń roboczą linii produkcyjnej, dla której projektowany jest system wizyjny. Przykładowo, wizyjne systemy pomiarowe będą rejestrowały obraz innymi metodami niż systemy lokalizacji obiektów z uwagi na różnicę kosztu budowy systemu oraz możliwą do uzyskania rozdzielczość obrazu 3D. W wyborze metody należy dodatkowo uwzględnić czas potrzebny na akwizycję obrazu 3D oraz czas potrzebny na analizę tego obrazu i wyznaczenie parametrów opisujących cechy jakości produktu lub badaną przestrzeń. Na rysunku poniżej przedstawiono zestawienie metod rejestracji obrazów 3D.



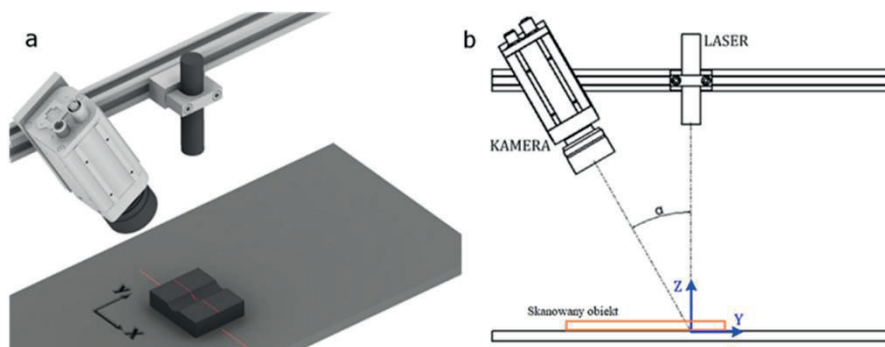
Rysunek 3. Metody obrazowania trójwymiarowego

Tylko część metod obrazowania 3D umożliwia rejestrację obrazu w warunkach przemysłowych. Wynika to z sposobu pomiaru informacji przestrzennej i odporności na warunki panujące na liniach produkcyjnych. Do najczęściej stosowanych metod pomiarowych zaliczamy triangulację laserową oraz stereowizję z oświetleniem strukturalnym. Metody te umożliwiają rejestrację obrazu z rozdzielczościami rzędu 20-40 μm dla pola widzenia rzędu 100-200 mm. Metoda SFF (*Shape from Focus*) jest stosowana do obrazowania na bardzo małych polach powierzchni w zastosowaniach mikroskopowych. Metoda ToF (*Time of Flight*) wykorzystana jest do obrazowania na dużych przestrzeni 18-30 metrów, ale z niewielkim rozdzielczościami rzędu 20-40 mm. Rysunek 4 prezentuje metody obrazowania trójwymiarowego najczęściej stosowane w zadaniach przemysłowych.



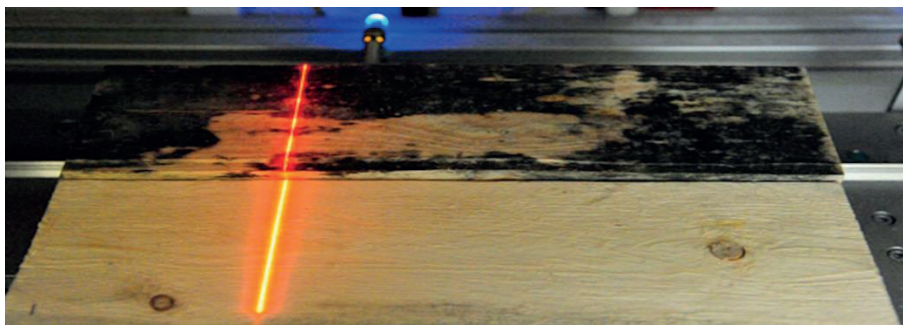
Rysunek 4. Metody obrazowania trójwymiarowego wykorzystywane w aplikacjach przemysłowych

Przykładowo w zadaniach kontroli półfabrykatów wykonanych z drewna wykorzystywanych w procesach produkcyjnych możliwe jest użycie obrazowania triangulacyjnego. W omawianym przykładzie rejestrowany jest obraz powierzchni desek przez system wizyjny, w ramach którego deska oświetlana jest liniową wiązką lasera a obraz rejestrowany jest przez kamerę ustawioną kątowno do powierzchni. W konfiguracji tej oś optyczna lasera ustawiona jest prostopadłe do powierzchni obrazowanego materiału. Jednocześnie oś optyczna kamery odchylona jest o kąt α względem płaszczyzny lasera i o kąt $90 - \alpha$ względem płaszczyzny transportującego obrazowany materiał. Konfiguracja systemu wizyjnego prezentowana jest na rysunku 5.



Rysunek 5. Konfiguracja triangulacyjnego systemu obrazowania 3D powierzchni: widok ustawienia kamery i lasera względem obrazowanego obiektu, b – geometria systemu wizyjnego 3D

W czasie badań wstępnych zauważono na powierzchni drewna dużą różnicę w odbiciu wiązki lasera od powierzchni zainfekowanej oraz od powierzchni nie zasiedlonej przez grzyby. Widoczne jest to w postaci zmiany intensywności odbicia linii lasera i wynika z rozpraszania i pochłaniania energii wiązki lasera na powierzchniach zainfekowanych w większym stopniu niż na powierzchniach czystego drewna. Odbicie wiązki lasera na obu powierzchniach prezentowane jest na rysunku poniżej³.



Rysunek 6. Obraz odbicia liniowej wiązki lasera od powierzchni drewna

Obrazowanie trójwymiarowe powierzchni desek wykorzystano do kontroli wad powierzchniowych oraz wymiarowych zidentyfikowanych na tego typu półfabrykatach.

Do wad powierzchniowych wykrytych podczas badań eksperymentalnych przypisano:

- obliny/oflisy widoczne na krawędziach desek,
- pozostałości kory widoczne na krawędziach oraz na powierzchniach desek,
- sęki widoczne na powiedzeniach,
- pęknięcia widoczne na powierzchni drewna.

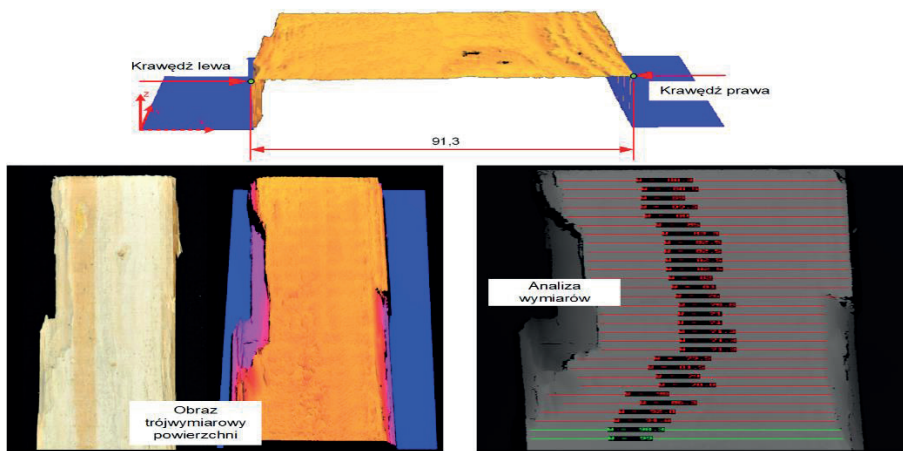
Kolejną grupą wad podlegających kontroli z wykorzystaniem systemu wizyjnego są wady wymiarowych desek. Każdy z półfabrykatów drewna opisany jest w dokumentacji technicznej lub w normach branżowych w postaci wymiarów i dopuszczalnych odchyłek. Na rysunku poniżej prezentowany jest pełny trójwymiarowy obraz powierzchni deski z naniesionymi liniami pomiarowymi wskazującymi przekrój, w którym został wykonany pomiar szerokości deski. Na rysunku oznaczono również kolorem czerwonym obszary deski, w których szerokość deski nie mieści się w założonej tolerancji jej wykonania.

Na powierzchni desek mogą wystąpić również różnego typu uszkodzenia mechaniczne, które zmieniają dopuszczalne wymiary deski stanowiącej półfabrykat do produkcji palet⁴. Liczba profili pomiarowych jest zależna od definicji minimalnej długości uszkodzenia krawędzi, na którym występuje zaburzenie wymiaru nominalnego szerokości deski. Niezależnie od przyczyny wystąpienia wady wymiarowej, deski takie powinny być usuwane z procesu

³ Sioma A., Lentz B.: Detection of fungal infections on the wood surface using LTM imaging. Applied Sciences, ISSN 2076-3417, 2023

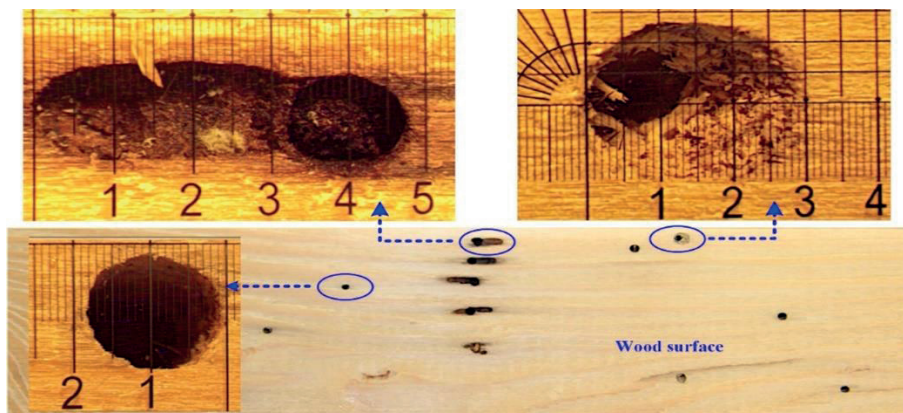
⁴ Cinal M., Sioma A., Lentz B.: The quality control system of planks using machine vision. Applied Sciences. ISSN 2076-3417. 2023

produkcji. Obraz trójwymiarowy umożliwia realizację zbioru pomiarów opisujących szerokość, długość oraz grubości desek. Umożliwia również wykonanie przekrojów w wybranych miejscach i szczegółowy opis zgodności wymiarów z przyjętą dokumentacją techniczną. Rysunek poniżej prezentuje trójwymiarowy obraz powierzchni drewna, wady obróbki drewna widoczne na krawędziach oraz widok przekrojów z oznaczonym wymiarem szerokości w poszczególnych przekrojach.



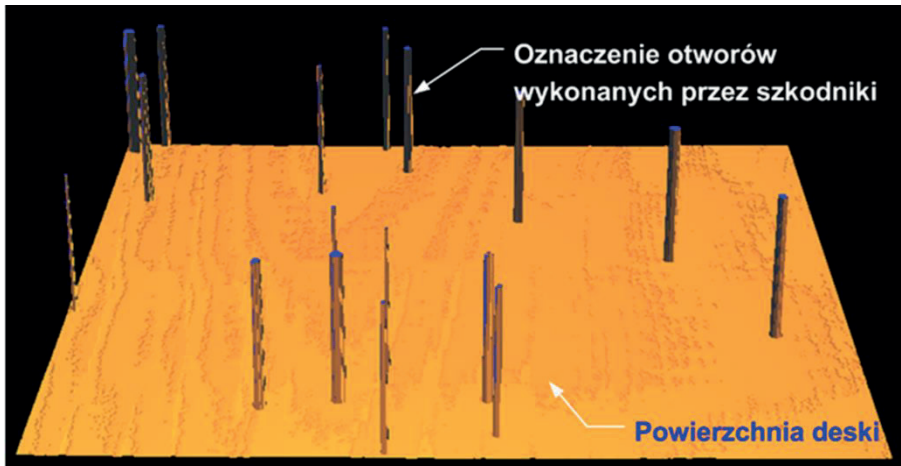
Rysunek 7. Obrazowanie trójwymiarowe powierzchni desek prezentujące pomiary szerokości i opis wymiarów na kolejnych przekrojach obrazu trójwymiarowego

Kolejnym przykładem wykorzystania obrazu trójwymiarowego powierzchni drewna jest kontrola obecności chodników wykonanych przez szkodniki żerujące w drewnie. Rysunek poniżej przedstawia chodniki o wymiarach od 2 do 5 milimetrów widoczne na powierzchni drewna. Zadaniem systemu kontroli powierzchni jest wykrywanie obecności chodników na materiałach transportowanych z prędkością do 1500 mm/s. W zadaniu tym wykorzystano również obrazowanie trójwymiarowe metodą triangulacji laserowej.



Rysunek 8. Obraz chodników widocznych na powierzchni drewna

Obraz trójwymiarowy powierzchni poddano analizie wstępnej w celu segmentacji obszarów odpowiadających otworom. Przygotowany algorytm analizy obrazu 3D umożliwia wykrycie obszarów widocznymi uszkodzeniami powierzchni w postaci: pęknięć, sęki oraz otworów wykonanych przez szkodniki. W ramach analizy wstępnej wykorzystywane są przekształcenia punktowe, kontekstowe oraz analiza wysokości powierzchni. Rysunek poniżej prezentuje obraz powierzchni po operacji filtrowania i segmentacji otworów. Są one oznaczone walcami o średnicy wykrytego otworu. Obraz taki pozwala na ocenę liczby i rozłożenia tego typu wad na powierzchni drewna⁵.



Rysunek 9. Wynik identyfikacji otworów widocznych na powierzchni wykonanych przez szkodniki żerujące w drewnie

Podsumowanie

Zarządzanie jakością produktu wiąże się ściśle z kontrolą jakości parametrów półfabrykatów wprowadzanych na produkcję. Obejmuje również oceną parametrów wyrobów gotowych opuszczających linie produkcyjne. Obserwuje się również duży nacisk na kontrolę między operacyjną wykonywaną po każdej operacji technologicznej. Kontrola taka ma na celu usunięcie wad powstałych podczas realizacji operacji co eliminuje koszty wykonywania kolejnych operacji na uszkodzonych półfabrykatch.

Systemy kontroli parametrów wytwarzanych wyrobów wykorzystują systemy wizyjne i rejestrowany przez nie obraz jako źródło opisu parametrów wyrobu. Wybór metody obrazowania oraz algorytmów analizy obrazu jest ściśle dopasowanych do realizowanego zadania kontrolnego lub pomiarowego. Opracowanie skutecznego systemu umożliwiającego rejestrację kluczowych cech ocenianego produktu wymaga opracowania katalogu wad i opracowania dla każdej z wad w nim ujętych metody kontroli.

⁵ Sioma A., Nagashima K., Lenty B., Hebda A., Nakata Y., Harada H.: Detection of pest feeding traces on industrial wood surfaces with 3D imaging. Applied Sciences ISSN 2076-3417, 2024

c

1 9 0 0 1

LEAN MANUFACTURING

JAKO METODA ZWIĘKSZANIA EFEKTYWNOŚCI W ZARZĄDZANIU PROCESAMI PRODUKCYJNYMI

Katarzyna Szwedziak¹, Adam Busławski², Marcin Pieczyński², Klaudia Russek²

¹ Akademia Nauk Stosowanych Angelusa Silesiusa w Wałbrzychu

² Uniwersytet WSB Merito we Wrocławiu

Wprowadzenie

Lean Manufacturing jest strategią zarządzania procesami produkcyjnymi, której celem jest maksymalizacja wartości dostarczanej klientowi przy jednoczesnej minimalizacji marnotrawstwa. Koncepcja ta wywodzi się z japońskiego Systemu Produkcyjnego Toyoty (*Toyota Production System* – TPS) i stanowi przedmiot licznych analiz w literaturze zagranicznej, m.in. w pracach J.K. Likera oraz J.P. Womacka i D.T. Jonesa, jak również w literaturze polskiej, w tym opracowaniach E. Pajaka oraz T. Króla. Lean Manufacturing obejmuje zbiór zasad i narzędzi, takich jak Kaizen, 5S, Just-in-Time, Kanban czy Value Stream Mapping (VSM), które znajdują zastosowanie w doskonaleniu procesów wytwórczych. W warunkach postępującej cyfryzacji oraz rosnących oczekiwań klientów koncepcja Lean coraz częściej integrowana jest z systemami ERP i MES oraz rozwiązaniami z zakresu Internetu Rzeczy (IoT), co potwierdzają zarówno badania zagraniczne, jak i krajowe. Zastosowanie narzędzi Lean Manufacturing pozwala zatem na systematyczne eliminowanie strat, co bezpośrednio przekłada się na zwiększenie efektywności operacyjnej przedsiębiorstwa. Wykorzystanie mapowania strumienia wartości (VSM) umożliwia identyfikację wąskich gardeł oraz optymalizację przepływu materiałów i informacji. Metoda 5S poprawia organizację stanowisk pracy, skracając czas realizacji zadań i zmniejszając liczbę przestojów. System Kanban wspiera płynność procesów, ograniczając nadprodukcję i zapewniając lepsze dopasowanie zapasów do rzeczywistego zapotrzebowania. Just-in-Time redukuje koszty magazynowania i zwiększa elastyczność reakcji na zmienne potrzeby klientów. Ciągłe doskonalenie (*Kaizen*) wzmacnia kulturę organizacyjną nastawioną na usprawnienia, co w długim okresie prowadzi do trwałego wzrostu produktywności.

Metodyka badań

W pracy zastosowano podejście jakościowe, oparte na studium przypadku wybranych przedsiębiorstw produkcyjnych wdrażających zasady Lean Manufacturing i narzędzia cyfrowe. Dane pozyskano poprzez analizę dostępnych raportów branżowych, przegląd literatury przedmiotu oraz studia przypadków firm produkcyjnych, w których wdrożono systemy ERP, MES oraz narzędzia Lean, takie jak Kaizen, Just-in-Time, 5S i Kanban. W przedsiębiorstwach analizowano przede wszystkim dane dotyczące czasu realizacji zleceń, poziomu zapasów oraz częstotliwości występowania przestojów produkcyjnych. Badaniu podlegały również wskaźniki jakości, takie jak liczba reklamacji, odsetek braków oraz stabilność procesów. Uwzględniono także dane związane z efektywnością wykorzystania zasobów, w tym maszyn, materiałów i energii. Dodatkowo analizowano informacje dotyczące kosztów operacyjnych, aby ocenić wpływ wdrożonych narzędzi Lean i systemów informatycznych na ogólną rentowność procesów.

W przedsiębiorstwach analizowano przede wszystkim dane dotyczące czasu realizacji zleceń, poziomu zapasów oraz częstotliwości występowania przestojów produkcyjnych. Badaniu podlegały również wskaźniki jakości, takie jak liczba reklamacji, odsetek braków oraz stabilność procesów. Uwzględniono także dane związane z efektywnością wykorzystania zasobów, w tym maszyn, materiałów i energii. Dodatkowo analizowano informacje dotyczące kosztów operacyjnych, aby ocenić wpływ wdrożonych narzędzi Lean i systemów informatycznych na ogólną rentowność procesów. Badania miały na celu ocenę skuteczności tych rozwiązań w eliminacji marnotrawstwa, usprawnieniu procesów oraz zaangażowaniu pracowników w działania doskonalące.

Analiza i dyskusja

Lean Manufacturing w przedsiębiorstwie produkcyjnym

Średnie wypełnienie kontenerów i naczep w transporcie międzynarodowym w ostatnich latach jawiło się jako kluczowy miernik sprawności w sektorze logistycznym. Lean Manufacturing to podejście do zarządzania procesami wytwórczymi, którego głównym założeniem jest eliminacja strat oraz dążenie do maksymalizacji wartości oferowanej odbiorcy. Sama idea wywodzi się z "Systemu Produkcyjnego Toyoty (TPS)", który narodził się w Japonii w latach pięćdziesiątych XX wieku. Początkowy zamysł polegał na usprawnieniu procesów produkcji, poprzez ograniczenie niepotrzebnych wydatków, czasu realizacji oraz nadmiaru zasobów. Kluczowym elementem koncepcji Lean Manufacturing jest jednak filozofia nieustannego doskonalenia, znana jako Kaizen to ona prowadzi do trwałych usprawnień i zwiększenia efektywności organizacji¹. Nowoczesne firmy, implementujące Lean, koncentrują się na optymalizacji procesów, redukując stany magazynowe, przyspieszając proces wytwórczy i podnosząc standard oferowanych produktów. Metody Lean znajdują zastosowanie nie tylko

¹ Imai, M.: Gemba Kaizen: Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania. Wydawnictwo MT Biznes, 2006

w sektorze produkcyjnym, ale również w logistyce, usługach oraz w szeroko pojętym zarządzaniu. Skuteczne wdrożenie tej filozofii wymaga transformacji kultury organizacyjnej oraz bezwzględne poparcie ze strony kierownictwa. Mapowanie strumienia wartości (*Value Stream Mapping*) to fundament w podejściu Lean, umożliwiający namierzanie i likwidację obszarów, gdzie procesy tracą na efektywności. Zatem możemy powiedzieć, że mapowanie strumienia wartości to kluczowe narzędzie w eliminowaniu marnotrawstwa i optymalizacji procesów, umożliwiające organizacjom identyfikację i eliminację nieefektywności w przepływie wartości².

Zastosowanie tej metody daje organizacjom większą elastyczność w reagowaniu na zmiany w otoczeniu rynkowym i sprzyja budowaniu przewagi konkurencyjnej. W dzisiejszych realiach, nacechowanych cyfryzacją i globalizacją, Lean Manufacturing jawi się jako krytyczna strategia dla przedsiębiorstw, których ambicją jest trwały sukces.

Celem opracowania jest analiza wpływu metodologii Lean Manufacturing i cyfryzacji na optymalizację procesów produkcyjnych oraz zwiększenie efektywności operacyjnej przedsiębiorstw. Praca ma również na celu zbadanie, jak narzędzia Lean Management i nowoczesne technologie wspierają eliminację marnotrawstwa i angażowanie pracowników w ciągłe doskonalenie.

Eliminacja marnotrawstwa w procesie produkcyjnym

Filozofia eliminacji marnotrawstwa stanowi fundament „szczupłego” wytwarzania (*Lean Manufacturing*). Polega ona na identyfikowaniu i eliminowaniu czynności, które nie wnoszą wartości w procesie produkcji. Podstawą działania jest zwiększenie wartości dla odbiorcy przez zmniejszenie wydatków, czasu oraz zasobów, które generują nieefektywne operacje. Marnotrawstwo w ujęciu Lean może przejawiać się na wiele sposobów: nadprodukcją, zbędnymi ruchami pracowników, przesadnymi zapasami albo niepotrzebnymi przestojami maszyn. Pierwszym etapem redukcji marnotrawstwa jest wnikliwa ocena procesów wytwórczych. Oznacza to szczegółowe przeanalizowanie każdego etapu produkcji w celu zidentyfikowania czynności, które nie dodają wartości z perspektywy klienta. Taka diagnoza pozwala określić, gdzie powstają straty, jakie są ich przyczyny oraz jak często się pojawiają. Dzięki temu przedsiębiorstwo może precyzyjnie wskazać obszary wymagające usprawnień i dobrać odpowiednie narzędzia Lean do ich eliminacji. Wnikliwa analiza procesów stanowi więc fundament dalszych działań optymalizacyjnych i umożliwia wdrażanie zmian w sposób świadomy, ukierunkowany i mierzalny.

Pomocna w tym procesie będzie analiza z wykorzystaniem metodologii Value Stream Mapping – czyli mapowania strumienia wartości. Można zatem wyróżnić kilka rodzajów marnotrawstw dla przykładu można tutaj przytoczyć stwierdzenie Edwarda Pajaka, który szczegółowo omawia siedem rodzajów marnotrawstwa w ujęciu Lean oraz znaczenie mapowania strumienia wartości (VSM) jako narzędzia diagnozującego nieefektywności procesów³. Takie podejście pozwala na zlokalizowanie „wąskich gardeł” oraz miejsc, gdzie konieczne są udoskonalenia. Kolejnym bardzo ważnym działaniem jest wprowadzenie

² Locher, D. A.: *Value Stream Mapping for Lean Development: A How-To Guide for Streamlining Time to Market*. Productivity Press, 2008

³ Pajak, E.: *Lean management. Teoria i praktyka*. PWE, Warszawa, s. 88-90, 2016

koncepcji just-in-time, która pozwala na ograniczenie stanów magazynowych i dostarczanie surowców dokładnie wtedy, gdy są one potrzebne w procesie produkcji, co stanowi fundament eliminacji marnotrawstwa⁴. Dzięki temu przedsiębiorstwo może znacząco zmniejszyć koszty związane z magazynowaniem oraz uniknąć zamrażania kapitału w nadmiernych zapasach. Just-in-time poprawia również płynność przepływu materiałów, co przekłada się na bardziej stabilny i przewidywalny przebieg procesów produkcyjnych.

Metody Lean to również ujednolicanie procesów, co sprzyja minimalizowaniu pomyłek i uzyskiwaniu regularnie wysokiej jakości wytworów. Nie bez znaczenia jest również uporządkowanie stanowisk pracy wedle reguł 5S, co prowadzi do podniesienia ergonomii i sprawności działań. Jednak to personel odgrywa kluczową funkcję w procesie usuwania strat, gdyż jego udział w projektach Kaizen stale wspiera udoskonalanie czynności. Ciągłe monitorowanie rezultatów modyfikacji procesu produkcji oraz adaptacja procedur do zmiennej koniunktury rynkowej umożliwia zachowanie wysokiego poziomu sprawności wytwarzania. Usprawnianie obiegu zadań minimalizuje zbędne czynności transportowe i niepotrzebne przemieszczanie surowców, co redukuje wydatki i podnosi produktywność. Nowoczesne przedsiębiorstwa implementujące Lean, coraz chętniej wykorzystują automatyzację oraz analizę danych, co pozwala na jeszcze precyzyjniejsze identyfikowanie strat. Reasumując, usunięcie marnotrawstwa stanowi fundament filozofii Lean Manufacturing, wpływając fundamentalnie na wzrost efektywności, podniesienie jakości oraz zwiększenie konkurencyjności przedsiębiorstwa. Organizacje, które z powodzeniem zaimplementują ten paradygmat, mają szansę zdobyć istotną przewagę rynkową, dostarczając klientom wyższej klasy produkty w niższych kosztach operacyjnych. W nadchodzących latach rozwój technologiczny i połączenie Lean z rozwiązaniami cyfrowymi będą dalej stymulować skuteczną redukcję strat i optymalizację procesów wytwórczych co z kolei rozwijać będzie zasadę nieustannego doskonalenia wskazując na zaangażowanie wszystkich pracowników w optymalizację przepływu procesów i tworzenie wartości dla klienta⁵. Badania empiryczne potwierdzają, że przedsiębiorstwa stosujące Lean odnotowują średnio kilkunastoprocentowy spadek kosztów operacyjnych oraz skrócenie czasu realizacji zamówień. Liczne studia przypadków wskazują również na wyraźny wzrost wskaźników jakości, w tym redukcję braków nawet o 30–50% po wdrożeniu narzędzi takich jak 5S czy Kaizen. Analizy porównawcze pokazują, że firmy integrujące Lean z systemami ERP i MES osiągają wyższy poziom transparentności procesów, co ułatwia identyfikację źródeł strat i ich szybkie eliminowanie. Dowody te jednoznacznie wskazują, że Lean Manufacturing, wspierany technologiami cyfrowymi, stanowi skuteczną i mierzalną drogę do trwałej poprawy wyników operacyjnych.

Kluczowe zasady Lean Manufacturing

Produkcja odchudzona (*Lean Manufacturing*) bazuje na trzech filarach: nieustannym ulepszaniu, kreowaniu wartości dla klienta i usprawnianiu przepływu procesów. Stałe doskonalenie, czyli filozofia Kaizen sprowadza się do systematycznego wdrażania ulepszeń na wszystkich szczeblach organizacji. Celem jest zwiększenie efektywności oraz eliminacja

⁴ Womack, J. P., & Jones, D. T.: *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation* (Revised and Updated). New York: Simon & Schuster, s. 15-20, 2005

⁵ Liker, J. K.: *The Toyota Way. 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer* (Updated 2nd ed.). New York: McGraw-Hill, s. 105-110, 2021

strat. Pracownicy są motywowani do aktywnego udziału w procesie doskonalenia, co sprzyja budowaniu kultury innowacyjności i poczucia odpowiedzialności. Drugą fundamentalną zasadą Lean jest wartość dla odbiorcy, skoncentrowana na dostarczaniu wyrobów i usług, które odpowiadają jego zainteresowaniom i pragnieniom, przy jednoczesnym ograniczaniu kosztów. Zatem można powiedzieć, że znaczenia nabiera identyfikacja wartości z perspektywy klienta oraz potrzeba pełnego przepływu procesów jako kluczowych filarów Lean⁶. Przedsiębiorstwa wykorzystujące Lean eliminują działania zbędne, nie wpływające bezpośrednio na jakość finalnego produktu, co skutkuje wzrostem konkurencyjności na rynku. Pojmowanie potrzeb klienta to podstawa decyzji w Lean Manufacturing, a analiza wartości dodanej umożliwia ukierunkowanie zasobów na najbardziej efektywne etapy produkcji. Trzecia reguła, czyli optymalizacja toku działań, ma na celu osiągnięcie płynnego i bezproblemowego procesu wytwarzania, niwelując przestoje oraz nadmierne składowanie. Metody takie jak Just-in-Time czy Kanban wspomagają w koordynacji czynności i unikaniu niepotrzebnych przestojów. Zatem zastosowanie systemu Kanban umożliwia synchronizację produkcji z rzeczywistym zapotrzebowaniem, minimalizując zapasy i przestoje⁷. Natomiast sprawny przebieg procesów minimalizuje czas wytwarzania, obniża nakłady operacyjne a także zwiększa elastyczność w organizacji. Użycie tych zasad umożliwia przedsiębiorstwom osiągnięcie wyższego poziomu skuteczności i sprawia, że Lean Manufacturing staje się zasadniczą strategią w zarządzaniu procesami produkcyjnymi.

Narzędzia Lean Manufacturing w procesie produkcji

Lean Manufacturing obejmuje wdrażanie szeregu technik, których celem jest usprawnienie procesów wytwórczych oraz usunięcie strat. Dla przykładu Kanban to system wizualnego nadzoru przepływu pracy, pozwalający na kontrolę stanów magazynowych i skuteczne zarządzanie wytwarzaniem poprzez informowanie o zapotrzebowaniu na kolejne elementy. Metoda 5S skupia się natomiast na organizacji przestrzeni roboczej, dbając o jej ład i porządek, co z kolei zwiększa wydajność operacyjną⁸. Regularne stosowanie tej zasady pomaga przedsiębiorstwom ograniczyć czas poświęcony na poszukiwanie narzędzi, poprawić bezpieczeństwo i ergonomię pracy. Kaizen, czyli sposób na nieustanne ulepszanie, włącza wszystkich, od szeregowego pracownika po kierownictwo, w działania optymalizacyjne. Umożliwia to wprowadzanie drobnych zmian, które jednak przynoszą znaczące rezultaty, krok po kroku. Metoda ta buduje kulturę organizacji, która ceni innowacyjność i zaangażowanie każdego członka zespołu. Natomiast system Just-in-Time, pozwala na wytwarzanie tylko takiej liczby produktów, jaka aktualnie jest wymagana, niwelując nadmiarowe stany magazynowe i obniżając wydatki związane z ich magazynowaniem. Każde z wymienionych narzędzi odgrywa kluczową funkcję w optymalizacji produkcji, eliminując straty i usprawniając wykorzystanie dostępnych zasobów. Ich efektywność jest uwarunkowana przez poprawne wdrożenie oraz zaangażowanie wszystkich osób w strukturze organizacyjnej. Przedsiębiorstwa wdrażające Lean Manufacturing mogą dostrzec konkretne profity, takie jak wzrost jakości wyrobów, skrócenie czasu realizacji zleceń oraz większą zdolność adaptacji do fluktuacji

⁶ Rother, M., & Shook, J.: *Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA* (2nd ed.). Cambridge, MA: Lean Enterprise Institute, s. 7-10, 2009

⁷ LEI Polska: *Kanban, czyli sterowanie produkcją według zasad Lean Manufacturing*, s. 5, 2021

⁸ Król T.: *Lean Management po polsku*. Wydanie II, Onepress, s. 85, 2021

rynkowych. Wdrażanie tych rozwiązań pozwala na konstruowanie konkurencyjnych i wytrzymałych systemów wytwórczych.

Efektywność operacyjna Lean Manufacturing w produkcji

Produkcja Lean wywiera bezpośredni wpływ na poprawę wydajności operacyjnej, skutkując redukcją wydatków oraz skróceniem cyklu produkcyjnego. Fundamentalną zasadą Lean jest minimalizacja strat, co prowadzi do efektywniejszego użycia dostępnych środków i wzrostu produktywności. Wprowadzenie technik, takich jak Just-in-Time, umożliwia dostarczanie surowców dokładnie w momencie zapotrzebowania, eliminując nadmiarowe stany magazynowe oraz redukując koszty związane z przechowywaniem. Następnym elementem Lean, sprzyjającym efektywności, stanowi standaryzacja czynności. To ona właśnie czyni proces wytwórczy bardziej przewidywalnym i kontrolowanym. Wykorzystanie wielu rozwiązań, pozwala na sprawne zarządzanie przepływem pracy, co z kolei redukuje przestoje i nieefektywność operacyjną. Firmy implementujące Lean notują również poprawę jakości swoich wyrobów. Skutkuje to ograniczeniem kosztów związanych z reklamacjami i naprawami. Kultura ciągłego doskonalenia zachęca pracowników do aktywnego współudziału w usprawnianiu procesów, co pozytywnie wpływa na ich zaangażowanie oraz podnosi wydajność. Dzięki Lean Manufacturing firmy potrafią sprawnie reagować na fluktuacje rynkowe, jak również dostosowywać produkcję do bieżących wymagań klientów. W rezultacie organizacje, które wdrażają Lean, zyskują na konkurencyjności, osiągając większą efektywność operacyjną przy redukcji kosztów.

Lean Manufacturing a narzędzia cyfryzacji produkcji

Digitalizacja produkcji, połączona z koncepcją Lean Manufacturing, otwiera drogę do jeszcze bardziej zaawansowanej optymalizacji procesów i minimalizacji strat. Systemy ERP (Planowanie Zasobów Przedsiębiorstwa) oferują wszechstronne zarządzanie zasobami, koordynując przepływ materiałów oraz danych w czasie rzeczywistym, co znacząco poprawia efektywność operacyjną. Możemy powiedzieć, że integracja systemów ERP z koncepcją Lean Manufacturing umożliwia efektywne zarządzanie zasobami, koordynując przepływ materiałów oraz danych w czasie rzeczywistym, co znacząco poprawia efektywność operacyjną⁹. Systemy MES (Systemy Realizacji Produkcji) monitorują i kontrolują procesy wytwórcze, zapewniając pełną transparentność operacyjną i redukując niepotrzebne przestoje, co w konsekwencji skutkuje wyższą jakością i niższymi kosztami wytwarzania. Dlatego połączenie systemów MES z filozofią Lean pozwala na monitorowanie i kontrolowanie procesów wytwórczych, zapewniając pełną transparentność operacyjną i redukując niepotrzebne przestoje¹⁰. Narzędzia bazujące na Internet of Things (IoT) udostępniają ciągły nadzór nad maszynami oraz urządzeniami, co przekłada się na błyskawiczne reagowanie na ewentualne usterki, a także optymalizację produktywności w czasie rzeczywistym. Rozwiązania Big

⁹ Stadnicka, D., Pacana, A., Antosz, K., Zielecki, W.: Lean Manufacturing. Doskonalenie produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 112, 2015

¹⁰ Stadnicka, D., Pacana, A., Antosz, K., Zielecki, W.: Lean Manufacturing. Doskonalenie produkcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 118, 2015

Data w połączeniu z analityką predykcijną stanowią fundament prognozowania potrzeb produkcyjnych, minimalizując prawdopodobieństwo gromadzenia nadmiernych zapasów czy też podejmowania nietrafnych decyzji. Efektem jest znaczący wzrost efektywności operacyjnej. Cyfrowe systemy Kanban automatyzują sterowanie procesami, eliminując konieczność manualnego aktualizowania stanów magazynowych i tym samym podnosząc wydajność. Robotyzacja i automatyzacja w Lean Manufacturing przyczyniają się do skrócenia czasu realizacji, redukcji kosztów oraz podniesienia jakości produkcji dzięki eliminacji błędów wynikających z czynnika ludzkiego. Oprogramowanie do modelowania procesów biznesowych (BPM) wspiera optymalizację przepływu pracy poprzez analizę i doskonalenie procedur, co z kolei wpływa na zwiększenie przewidywalności i efektywności operacyjnej. Z kolei chmura obliczeniowa umożliwia łatwy dostęp do danych oraz podnosi elastyczność operacyjną, umożliwiając zdalne zarządzanie produkcją niezależnie od lokalizacji. Zaawansowane rozwiązania, takie jak sztuczna inteligencja (AI), ułatwiają proces podejmowania decyzji, identyfikując schematy danych produkcyjnych i przewidując możliwe problemy. Technologia łańcucha blockchain może być zastosowana do zagwarantowania przejrzystości w łańcuchu dostaw, zapewniając bezpieczeństwo i autentyczność transakcji pomiędzy podmiotami. Systemy zarządzania jakością (SZJ – Systemy Zarządzania Jakością) pozwalają utrzymać wysokie standardy wytwarzania, poprzez stałą obserwację i ocenę danych. Narzędzia cyfrowe w kontekście Lean Manufacturing otwierają dodatkowo szanse na integrację pomiędzy komórkami organizacyjnymi, wzmacniając współpracę oraz koordynację realizowanych działań. Wdrożenie cyfryzacji związane jest natomiast z koniecznością odpowiedniego przeszkolenia zespołów oraz modyfikacją procedur w celu ich dopasowania do nowych technologii, co rodzi istotne trudności natury organizacyjnej. Połączenie Lean i rozwiązań cyfrowych prowadzi do istotnego wzrostu efektywności operacyjnej oraz wzmocnienia pozycji konkurencyjnej firm na rynku.

W nadchodzących latach, technologia okaże się być kluczowym sprzymierzeńcem dla koncepcji Lean Manufacturing, oferując dostęp do jeszcze bardziej wyrafinowanych narzędzi. Umożliwią one precyzyjną analizę danych, zaawansowaną automatyzację oraz inteligentne zarządzanie całością procesów produkcyjnych. Implementacja sztucznej inteligencji (AI) w sektorze produkcyjnym ma potencjał do rewolucji, pozwalając na kompleksową optymalizację operacji oraz znaczne obniżenie kosztów działalności do niezbędnego minimum. Wdrożenie cyfryzacji, jako kluczowy element w Lean Manufacturing, staje się zatem fundamentem dla firm, które aspirują do utrzymania wysokiej pozycji w konkurencyjnym i dynamicznie zmieniającym się środowisku gospodarczym.

Narzędzia Lean w zarządzaniu i angażowaniu pracowników w ciągłe doskonalenie

Podejście Lean w sferze zarządzania kładzie nacisk na pracowników w procesie nieustannego doskonalenia. Ten model postępowania prowadzi do zwiększenia wydajności, tak w produkcji, jak i w łańcuchu dostaw. Kluczowym elementem tego podejścia jest kreowanie kultury Kaizen, gdzie personel jest inspirowany do stałego identyfikowania i redukowania marnotrawstwa. Zaangażowanie pracowników w Lean opiera się na jasnej komunikacji oraz precyzyjnie określonych celach związanych z modernizacją procesów. Uruchomienie systemów zbierania sugestii, na przykład skrzynek na pomysły lub platform cyfrowych ułatwiających wymianę usprawnień, pozwala na skuteczne wdrażanie innowacji. W podejściu Lean, pracownicy dostają możliwość uczestnictwa w zespołach projektowych,

gdzie wspólnie analizują dane operacyjne i wypracowują strategie optymalizacyjne. W logistyce, zaangażowanie pracowników jest absolutnie kluczowym elementem, aby ulepszyć obieg materiałów oraz maksymalizować wykorzystanie dostępnej przestrzeni magazynowej. Zastosowanie metod takich jak 5S prowadzi do poprawy ergonomii pracy oraz redukuje straty czasu wynikające z chaotycznej organizacji stanowisk roboczych. Efektywna współpraca pomiędzy zespołami produkcyjnymi a logistycznymi umożliwia lepsze planowanie dostaw, co z kolei minimalizuje ryzyko opóźnień. Pracownicy zaangażowani w metodologię Lean zaczynają lepiej rozumieć, jak ich codzienna praca wpływa na wydajność całej firmy, co skutkuje poprawą jakości wytwarzanych produktów i oferowanych usług. Regularne audyty Lean i analizy przyczyn źródłowych umożliwiają identyfikację i natychmiastowe eliminowanie problemów w procesach produkcyjnych oraz logistycznych. Przedsiębiorstwa, które z sukcesem wykorzystują Lean w zarządzaniu zasobami ludzkimi, tworzą zespoły cechujące się dużym zaangażowaniem, co prowadzi do trwałych zysków dla całej organizacji.

Monitorowanie i doskonalenie

Kluczowym aspektem implementacji Lean Management jest kontrolowanie i usprawnianie, co pozwala przedsiębiorstwom osiągać długotrwałe profity. Systematyczne śledzenie wyników zakłada regularne gromadzenie danych i analizę kluczowych wskaźników efektywności, na przykład czasu realizacji zleceń lub stopnia marnotrawstwa¹¹. To umożliwia organizacjom natychmiastowe namierzanie fragmentów wymagających poprawy i błyskawiczną reakcję na pojawiające się trudności. Metoda ta obejmuje także wprowadzanie korekt oraz modyfikowanie obecnych rozwiązań, aby lepiej korespondowały ze zmiennymi wymaganiami rynku oraz oczekiwaniami klientów. Istotną rolę pełni tu udział zespołów w poszukiwaniu nowatorskich rozwiązań i czynny udział w procesie stałego udoskonalania. Zaangażowanie tych zespołów w poszukiwanie innowacji oraz aktywny udział w procesie stałego ulepszania są kluczowe dla osiągnięcia doskonałości operacyjnej i umacniania konkurencyjnej pozycji przedsiębiorstwa¹². Ostatecznie, permanentne monitorowanie i doskonalenie umożliwiają firmie dążenie do perfekcji operacyjnej oraz wzmacnianie swojej konkurencyjności.

Podsumowanie

Implementacja Lean Manufacturing w zarządzaniu procesami wytwórczymi przynosi konkretne rezultaty, jeśli chodzi o optymalizację wykorzystania zasobów, redukcję strat i wzrost efektywności operacyjnej. Decydującym elementem powodzenia jest nie tylko zastosowanie sprawdzonych narzędzi Lean, ale również połączenie ich z nowoczesnymi technologiami wspomagającymi proces produkcji. Sztuczna inteligencja (AI) odgrywa coraz istotniejszą rolę w automatyzacji analizy danych, prognozowaniu popytu i optymalizacji

¹¹ Parmenter, D.: Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI). Tworzenie, wdrażanie i stosowanie. Onepress, s. 104, 2015

¹² Król, T.: Lean management po polsku. O dobrych i złych praktykach. Onepress, 2021, s. 68

przepływu materiałów. Istotnym kierunkiem przyszłych badań jest rozwój systemów bazujących na AI, które skutecznie zarządzają łańcuchem dostaw i procesami produkcyjnymi w czasie rzeczywistym. Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego umożliwia znaczące usprawnienie zarządzania zapasami, minimalizując ryzyko nadprodukcji i koszty związane z magazynowaniem. Kluczowe jest także pogłębianie możliwości cyfryzacji w kontekście Lean Manufacturing, poprzez integrację zaawansowanych systemów ERP i technologii IoT.

Kolejnym ważnym aspektem jest oddziaływanie automatyzacji na stopień uczestnictwa pracowników w procesach Lean, gdzie technologie wspierające podejmowanie decyzji w operacjach mogą zwiększać skuteczność zespołów produkcyjnych. Badania powinny również koncentrować się na powiązaniach pomiędzy metodykami Lean a rozwijającymi się technologiami cyfrowymi, jak na przykład robotyka oraz analizy predykcyjne. Przyszłość Lean Manufacturing jest uzależniona od efektywnego połączenia filozofii ciągłego doskonalenia z dostosowywaniem się do innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Współczesne podejście do optymalizacji produkcji powinno uwzględniać zarówno kwestie ludzkie, jak i cyfrowe, kreując zintegrowane ekosystemy Lean wspomagane przez sztuczną inteligencję.

Bibliografia

- Imai M., Gemba Kaizen: Zdroworozsądkowe, niskokosztowe podejście do zarządzania, Wyd. MT Biznes, 2006.
- Król T.: Lean Management po polsku. O dobrych i złych praktykach, Onepress, s. 68, 2021.
- LEI Polska, Kanban, czyli sterowanie produkcją według zasad Lean Manufacturing, s. 5, 2021.
- Liker J.K.: The Toyota Way. 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer (wyd. 2), McGraw-Hill, New York, s. 105–110, 2021.
- Locher D.A.: Value Stream Mapping for Lean Development: A How-To Guide for Streamlining Time to Market, Productivity Press, 2008.
- Paják E.: Lean management. Teoria i praktyka, PWE, Warszawa, s. 88-90, 2016.
- Parmenter D.: Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI). Tworzenie, wdrażanie i stosowanie, Onepress, s. 104, 2015.
- Rother M., Shook J., Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate MUDA (wyd. 2), Lean Enterprise Institute, Cambridge (MA), s. 7-10, 2009.
- Stadnicka D., Pacana A., Antosz K., Zielecki W.: Lean Manufacturing. Doskonalenie produkcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 112, 2015.
- Stadnicka D., Pacana A., Antosz K., Zielecki W.: Lean Manufacturing. Doskonalenie produkcji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 118, 2015.
- Król T.: Lean Management po polsku (wyd. 2), Onepress, s. 85, 2021.
- Womack J.P., Jones D.T.: Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation (wyd. poprawione i uaktualnione), Simon & Schuster, New York, s. 15–20, 2005

Adres do korespondencji: adam.buslawski@opole.merito.pl

ORCID: Katarzyna Szwedziak 0000-0003-1104-5143

ORCID: Adam Busłowski 0000-0002-6329-278X

ORCID: Marcin Pieczyński 0000-0002-6329-278X

ORCID: Klaudia Russek 0009-0000-8052-8240



WIR
WYDAWNICTWO

ISBN 978-83-64377-71-6