WYBRANE ASPEKTY ZARZĄDZANIA JAKOŚCIĄ

Pod redakcją Mariusza Giemzy

SELECTED ASPECTS OF QUALITY MANAGEMENT

edited by Mariusz Giemza



UNIWERSYTET EKONOMICZNY W KRAKOWIE

Kraków 2026

Wybrane Aspekty Zarządzania Jakością

pod redakcją Mariusza Giemzy

Selected Aspects of Quality Management

edited by Mariusz Giemza

Kraków 2026

Recenzenci:
dr hab. Joanna Dziadkowiec, prof. UEK
dr inż. Urszula Balon
dr inż. Magdalena Niewczas-Dobrowolska

Komitet Organizacyjny Konferencji:
Aleksandra Tomsa – przewodnicząca Komitetu Organizacyjnego
Agata Saguła – członek Komitetu Organizacyjnego
Eryk Wybraniec – członek Komitetu Organizacyjnego

Skład materiałów:
Zakład Poligraficzny Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie
31-510 Kraków, ul. Rakowicka 27

Wydawca:
MG Publikacje

Nakład:
50 egzemplarzy

ISBN 978-83-954179-7-9

ORGANIZATORZY

Monografia dofinansowana ze środków Rady Kół Naukowych
Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie

SPIS TREŚCI

WPROWADZENIE 7

Joanna M. Dziadkowiec

ZNACZENIE JAKOŚCI I INNOWACYJNOŚCI W BUDOWANIU PRZEWAGI KONKURENCYJNEJ I PROMOCJI PRODUKTU 9

Piero Guadagnino, Agata Matarazzo, Antonio Zerbo

LIFE CYCLE INVENTORY FOR THE ANALYSIS OF INNOVATIVE ELECTROCATALYSTS BASED ON NON-CRITICAL RAW MATERIALS FOR GREEN ELECTROLYTIC HYDROGEN 17

Piotr Kafel

SYSTEMY POMIAROWE W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ - PRZEGLĄD LITERATURY 35

Sylwia Kurzeja

EFEKTYWNE ZARZĄDZANIE SKARGAMI KLIENTÓW JAKO ELEMENT BUDOWANIA SATYSFAKCJI KLIENTÓW W KONTEKŚCIE WYMAGAŃ NORMY PN-ISO 10002:2020. PARADOKS REKLAMACJI 41

Aleksandra Kurzyna

WYBRANE METODY POMIARU SATYSFAKCJI KLIENTA JAKO KLUCZOWY ELEMENT DOSKONALENIA JAKOŚCI USŁUG NA PRZYKŁADZIE POLSKIEJ BRANŻY E-COMMERCE 51

Igor Ludwikowski

CZYNNIK LUDZKI I DYSFUNKCJE ORGANIZACYJNE ORAZ PATOLOGIE W PODEJŚCIU DO SYSTEMÓW JAKOŚCI 61

Wiktoria Małecka

METODYKA LEAN SIX SIGMA JAKO NARZĘDZIE DOSKONALENIA PROCESÓW W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM 71

Magdalena Niewczas-Dobrowolska

ZARZĄDZANIE KRYZYSOWE W PRZYPADKU BRAKU BEZPIECZEŃSTWA PRODUKTU 79

Kamila Padjasek

ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII BLOCKCHAIN ORAZ IOT W ZAPEWNIENIU JAKOŚCI ŻYWNOŚCI 89

Amelia Przeklasa

SZTUCZNA INTELIGENCJA W ZARZĄDZANIU RYZYKIEM W SYSTEMACH JAKOŚCI 99

Justyna Pustelak

JAKOŚĆ OBSŁUGI JAKO ELEMENT PRZEWAGI KONKURENCYJNEJ W BRANŻY GASTRONOMICZNEJ 109

Agata Saguła

CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH KONCEPCJI PODEJŚCIA DO JAKOŚCI W KONTEKŚCIE ZAŁOŻEŃ PRZEMYSŁU 4.0 119

Ottavio Spadaro, Tiziana Cataldo, Agata Matarazzo

Sonia Azzaro, Rosa Caponetto

LCA FOR ENVIRONMENTAL QUALITY ASSESSMENT IN CONSTRUCTION: A SICILIAN CASE STUDY 127

Anna Świątek

SYSTEM ZARZĄDZANIA CYBERBEZPIECZEŃSTWEM W ORGANIZACJI WEDŁUG WYMAGAŃ NORMY ISO/SAE 21434:2021 - POJAZDY DROGOWE - INŻYNIERIA CYBERBEZPIECZEŃSTWA 137

WPROWADZENIE

Pierwsza wersja norm ISO serii 9000 została opublikowana w 1987 roku. W ówczesnej normie ISO 9001 położono ogromny nacisk na restrykcyjne procedury biurokratyczne i drobiazgową dokumentację. Z biegiem lat zarządzanie jakością przestało być jedynie domeną wypełniania biurokratycznych procedur, a stało się interdyscyplinarną strategią rozwoju, która łączy w sobie najnowsze osiągnięcia technologiczne, zaawansowaną analitykę danych, rygorystyczne normy bezpieczeństwa oraz głębokie zrozumienie psychologii organizacji i potrzeb klienta.

Współczesne zarządzanie jakością to zintegrowany system wzajemnie powiązanych elementów organizacji. Sukces organizacji zależy od zdolności do harmonijnego łączenia twardych inżynieryjnych standardów (ISO 9001, ISO/SAE 21434, Lean Management, Six Sigma) i nowoczesnych technologii (IoT, Blockchain, AI) z miękkimi aspektami zarządzania, takimi jak orientacja na klienta i eliminacja dysfunkcji ludzkich. Cyfryzacja dostarcza narzędzi i danych, ale to kultura organizacyjna oparta na ciągłym doskonaleniu i otwartej komunikacji decyduje o tym, czy te dane zostaną przekształcone w realną wartość dla klienta i stabilną pozycję rynkową organizacji.

W niniejszej monografii zamieszczono artykuły przedstawiające niewielki wycinek podstaw nowoczesnego zarządzania jakością, od cyfrowej rewolucji w zarządzaniu jakością, przez automatyzację systemów doskonałości, aż po krytyczną rolę kultury organizacyjnej.

Składam podziękowania wszystkim osobom oraz organizacjom, które przyczyniły się do organizacji konferencji i wydania niniejszej monografii. Wyrazy podziękowania kieruję także do Rady Kół Naukowych UEK za wsparcie finansowe konferencji. Dziękuję członkom Koła Naukowego Zarządzania Jakością za zaangażowanie w realizację tego projektu. Szczególne podziękowania należą się Prelegentom za wygłoszenie interesujących referatów oraz wszystkim Uczestnikom, którzy wzięli udział w edycji tegorocznej konferencji i przygotowali artykuły naukowe.

Mariusz Giemza

Kraków, czerwiec 2026 r.

Joanna M. Dziadkowiec

Katedra Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

ZNACZENIE JAKOŚCI I INNOWACYJNOŚCI W BUDOWANIU PRZEWAGI KONKURENCYJNEJ I PROMOCJI PRODUKTU

THE IMPORTANCE OF QUALITY AND INNOVATION IN CREATING COMPETITIVE ADVANTAGE AND SUPPORTING PRODUCT PROMOTION

Streszczenie

Współczesne przedsiębiorstwa funkcjonują w warunkach rosnącej konkurencji, co wymusza poszukiwanie trwałych źródeł przewagi konkurencyjnej. Szczególne znaczenie w tym zakresie mają jakość i innowacyjność produktów, które wpływają na postrzeganą wartość oferty oraz decyzje zakupowe konsumentów. Celem artykułu jest analiza znaczenia jakości i innowacyjności w budowaniu przewagi konkurencyjnej oraz wskazanie ich implikacji dla promocji produktu. W opracowaniu przedstawiono teoretyczne podstawy jakości i innowacyjności oraz omówiono mechanizm oddziaływania tych czynników na zachowania konsumentów, uwzględniając ich wpływ na zaufanie, satysfakcję i lojalność klientów. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że skuteczna promocja produktu wymaga nie tylko komunikowania wysokiej jakości i innowacyjnych cech oferty, lecz także integrowania tych elementów w spójną propozycję wartości dla klienta. Synergia jakości, innowacyjności i działań promocyjnych stanowi istotny czynnik budowania trwałej przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa.

Abstract

Contemporary enterprises operate in increasingly competitive markets, which compels them to seek sustainable sources of competitive advantage. In this context, product quality

and innovation play a particularly important role, as they influence the perceived value of an offering and consumers' purchasing decisions. The aim of this paper is to analyse the importance of quality and innovation in building competitive advantage and to identify their implications for product promotion. The study presents the theoretical foundations of quality and innovation and discusses the mechanisms through which these factors influence consumer behaviour, with particular emphasis on their impact on trust, customer satisfaction, and loyalty. The findings indicate that effective product promotion requires not only communicating high quality and innovative product features but also integrating these elements into a coherent customer value proposition. The synergy between quality, innovation, and promotional activities constitutes an important factor in building a sustainable competitive advantage for enterprises.

Wstęp

Charakterystyka współczesnych rynków, cechujących się wysokim stopniem konkurencyjności oraz wzrastającą świadomością konsumentów, sprawia, że tradycyjne konkurowanie ceną staje się dla przedsiębiorstw niewystarczające. W literaturze podkreśla się, że trwała konkurencyjność przedsiębiorstw jest coraz silniej związana ze zdolnością do tworzenia i wdrażania innowacji oraz dostarczania klientom wysokiej wartości (Agazu & Kero, 2024; Kotler & Keller, 2017). W takich warunkach organizacje muszą budować wartość dla klienta poprzez oferowanie wysokiej jakości oraz wprowadzanie innowacyjnych rozwiązań produktowych, które pozwalają uzyskać przewagę trudną do imitacji przez konkurentów (Farida & Setiawan, 2022; Kotler & Keller, 2017).

Należy jednak zaznaczyć, że samo oferowanie produktu o wysokich parametrach technicznych nie gwarantuje sukcesu rynkowego, jeśli jego wartość nie zostanie właściwie zakomunikowana odbiorcy. W tym kontekście promocja przestaje być jedynie narzędziem wspierającym sprzedaż, a staje się kluczowym kanałem informacyjnym i perswazyjnym, kształtującym percepcję klienta. Komunikacja marketingowa pełni obecnie istotną funkcję w budowaniu świadomości, wartości i preferencji wobec marki (Percy, 2018).

Celem niniejszego opracowania jest analiza znaczenia jakości i innowacyjności w procesach promocyjnych oraz określenie mechanizmów, za pomocą których te dwa czynniki determinują decyzje zakupowe.

Jakość jako wielowymiarowa kategoria wartości

Jakość stanowi jedno z centralnych pojęć w naukach o zarządzaniu i jakości, a jej rozumienie ewoluowało na przestrzeni lat od ujęcia technicznego do podejścia procesowego i relacyjnego. Zgodnie z normą PN-EN ISO 9000:2015 jakość definiowana jest jako stopień, w jakim zbiór inherentnych właściwości obiektu spełnia wymagania.

Garvin (1987) wskazywał na wielowymiarowość jakości, obejmującą między innymi niezawodność, trwałość, funkcjonalność, zgodność z wymaganiami czy estetykę produktu. Z kolei Juran (1988) definiował jakość jako „przydatność do użycia", podkreślając zdolność produktu do zaspokajania potrzeb użytkownika. Zarządzanie jakością wpływa

więc nie tylko na satysfakcję klientów, lecz również wspiera rozwój innowacji produktowych i procesowych oraz przyczynia się do poprawy wyników przedsiębiorstw (García-Fernández et al, 2022).

Współcześnie kluczowe staje się rozpatrywanie jakości w kontekście doświadczenia klienta oraz subiektywnej percepcji wartości. Z punktu widzenia marketingu szczególne znaczenie ma jakość postrzegana, definiowana jako subiektywna ocena produktu dokonywana przez konsumenta (Zeithaml, 1988). Ocena ta nie zawsze wynika z obiektywnych parametrów technicznych. Konsumenci często wykorzystują uproszczone schematy poznawcze i oceniają jakość na podstawie marki, ceny, komunikatów reklamowych czy opinii innych użytkowników.

Jakość postrzegana jest więc jednym z głównych determinantów intencji zakupowych oraz fundamentem budowania wartości produktu. Wpływa także pozytywnie zarówno na satysfakcję klienta, jak i jego lojalność wobec organizacji (Gálvez-Ruiz et al., 2023).

Innowacyjność jako źródło unikalnej wartości rynkowej

Innowacyjność jest drugim filarem budowania przewagi konkurencyjnej. Schumpeter (1934) definiował ją jako tworzenie nowych kombinacji czynników produkcji. W praktyce gospodarczej wyróżnia się przede wszystkim innowacje produktowe i procesowe. Współcześnie innowacyjność jest jednym z najważniejszych czynników wspierających budowę przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw, niezależnie od branży i wielkości organizacji (Farida & Setiawan, 2022; Agazu & Kero, 2024).

Podobnie jak w przypadku jakości, dla skuteczności promocji kluczowe znaczenie ma innowacyjność postrzegana przez klienta. Obejmuje ona ocenę funkcjonalności, atrakcyjności oraz użyteczności oferowanego rozwiązania. Innowacyjność nie tylko zwiększa atrakcyjność oferty, lecz również kształtuje postrzeganą wartość produktu. Dzięki niej przedsiębiorstwa mogą skuteczniej wyróżniać się na rynku i budować bardziej atrakcyjne propozycje wartości dla klientów.

Rozwój technologii cyfrowych zmienia sposób komunikowania wartości, wzmacniając znaczenie innowacji marketingowych. Innowacyjny produkt wymaga nowoczesnych form promocji, które pozwalają w prosty sposób przedstawić jego unikalne korzyści.

Mechanizm oddziaływania jakości i innowacyjności na konsumenta

Skuteczność działań promocyjnych jest ściśle związana z tym, jak jakość i innowacyjność odpowiadają na potrzeby klientów. Można wyróżnić następujący mechanizm oddziaływania:

Jakość → Zaufanie → Satysfakcja → Lojalność → Rekomendacje

Komunikowanie wysokiej jakości umożliwia budowanie zaufania, które ogranicza niepewność klienta i stanowi podstawę trwałych relacji. Między jakością a satysfakcją klientów istnieje silne powiązanie. Satysfakcja pełni jednocześnie rolę mechanizmu

pośredniczącego między jakością a lojalnością – wyższa jakość zwiększa zadowolenie klientów, które następnie prowadzi do wzrostu lojalności wobec marki (Yum & Yoo, 2023). Satysfakcja klientów jest więc silnie związana zarówno z zachowaniami lojalnościowymi klientów, jak i wynikami finansowymi przedsiębiorstw (Mittal et al., 2023). Brak rzetelnego komunikowania parametrów jakościowych produktu prowadzi do osłabienia wiarygodności marki, a w konsekwencji ogranicza skuteczność działań promocyjnych.

Z kolei innowacyjność pełni funkcję stymulatora uwagi. Podczas gdy jakość odpowiada za stabilność relacji z klientem, innowacyjność zwiększa zainteresowanie ofertą i buduje dystans wobec konkurentów. Znaczenie sygnałów jakościowych potwierdzają również badania wskazujące, że reputacja, wiarygodność przedsiębiorstwa oraz niezawodność oferty należą do najważniejszych determinant satysfakcji i lojalności klientów (Lei et al., 2022).

Synergia i komplementarność w strategii promocyjnej

Jakość i innowacyjność nie powinny być rozpatrywane jako rozłączne cele, lecz jako wzajemnie wzmacniające się elementy przewagi konkurencyjnej. Przedsiębiorstwa osiągające najlepsze wyniki rynkowe najczęściej rozwijają oba obszary równolegle (García-Fernández et al., 2022). Innowacja często służy podniesieniu standardów jakościowych, natomiast wysoka jakość zapewnia trwałość i wiarygodność efektów innowacyjnych. Zaobserwować więc można wzajemne wzmacnianie się praktyk zarządzania jakością i działalności innowacyjnej przedsiębiorstw (García-Fernández et al., 2022). W praktyce rynkowej zauważyć można szereg zależności między tymi konstruktami:

- wysoka jakość pozbawiona innowacyjności może być postrzegana jako stabilna, lecz mało atrakcyjna,
- innowacyjność pozbawiona jakości prowadzi do rozczarowania klientów;
- połączenie jakości i innowacyjności wzmacnia przewagę konkurencyjną oraz skuteczność działań promocyjnych.

Tabela 1. Rola jakości i innowacyjności w promocji

Wymiar	Jakość	Innowacyjność
Funkcja	Budowanie zaufania	Przyciąganie uwagi
Charakter przekazu	Racjonalny	Emocjonalny
Rola dla klienta	Redukcja ryzyka	Zwiększenie atrakcyjności
Efekt	Stabilność	Przewaga konkurencyjna

Źródło: opracowanie własne na podstawie Garvin (1987), García-Fernández et al. (2022) oraz Farida i Setiawan (2022).

Jakość i innowacyjność pełnią odmienne, lecz komplementarne funkcje w procesie promocji produktu (tabela 1). Jakość oddziałuje przede wszystkim poprzez mechanizmy racjonalne, wspierając redukcję ryzyka zakupowego oraz budowanie zaufania do marki. Innowacyjność natomiast zwiększa atrakcyjność oferty, przyciąga uwagę konsumentów i

wzmacnia percepcję wyjątkowości produktu. Oznacza to, że skuteczna komunikacja marketingowa powinna jednocześnie eksponować zarówno wymierne korzyści wynikające z jakości produktu, jak i jego nowatorskie cechy. Takie połączenie umożliwia nie tylko zainteresowanie potencjalnego nabywcy, lecz również budowanie podstaw długotrwałej relacji z klientem, co w konsekwencji sprzyja umacnianiu przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa (Garvin, 1987; García-Fernández et al., 2022; Farida & Setiawan, 2022).

Synergia jakości i innowacyjności w praktyce

Analizując działania współczesnych liderów rynkowych można zauważyć, że przedsiębiorstwa osiągające trwałą przewagę konkurencyjną nie bazują wyłącznie na wysokiej jakości lub wyłącznie na innowacyjności. Kluczowe znaczenie ma umiejętne łączenie obu tych elementów oraz ich skuteczne komunikowanie w działaniach promocyjnych. Jakość buduje zaufanie i ogranicza ryzyko postrzegane przez klientów, natomiast innowacyjność przyciąga uwagę odbiorców i wzmacnia atrakcyjność oferty. Dzięki temu przedsiębiorstwa mogą jednocześnie pozyskiwać nowych klientów oraz utrzymywać długookresowe relacje z dotychczasowymi nabywcami.

Apple jest przykładem przedsiębiorstwa, które skutecznie wykorzystuje zarówno jakość, jak i innowacyjność w procesie budowania wartości marki. Wprowadzane przez firmę rozwiązania technologiczne są zazwyczaj postrzegane jako nowoczesne i wyróżniające się na tle konkurencji, co zwiększa zainteresowanie konsumentów. Jednocześnie marka konsekwentnie komunikuje wysoką jakość wykonania produktów, dbałość o szczegóły oraz niezawodność ekosystemu urządzeń. W rezultacie działania promocyjne Apple nie koncentrują się wyłącznie na parametrach technicznych produktów, lecz podkreślają również doświadczenia użytkowników i korzyści wynikające z korzystania z całego systemu rozwiązań marki. Przykład ten dobrze ilustruje przedstawiony wcześniej mechanizm: innowacyjność przyciąga uwagę klienta, natomiast postrzegana jakość wzmacnia zaufanie, satysfakcję i lojalność.

Tesla stanowi przykład organizacji, która swoją pozycję rynkową zbudowała przede wszystkim na innowacyjności produktowej. Rozwiązania związane z elektromobilnością, autonomicznymi systemami wspomagania kierowcy oraz cyfrową integracją pojazdów pozwoliły firmie wyróżnić się na tle tradycyjnych producentów samochodów. Jednocześnie przypadek Tesli pokazuje, że sama innowacyjność nie jest wystarczającym warunkiem sukcesu rynkowego. Klienci podejmujący decyzje o zakupie produktów zaawansowanych technologicznie poszukują również potwierdzenia ich jakości, bezpieczeństwa i niezawodności. Z tego względu komunikacja marketingowa Tesli obejmuje nie tylko prezentację nowych rozwiązań technologicznych, ale również eksponowanie wyników testów bezpieczeństwa, osiągów pojazdów oraz parametrów użytkowych. Przykład ten potwierdza, że innowacyjność wymaga wsparcia w postaci wiarygodnych sygnałów jakościowych ograniczających postrzegane ryzyko zakupu.

Dyson to firma, która skutecznie łączy innowacje techniczne z doskonaleniem jakości użytkowej produktów. Rozwiązania stosowane przez firmę nie mają charakteru wyłącznie technologicznej nowości, lecz służą poprawie funkcjonalności, ergonomii i wygody użytkowania. W efekcie innowacyjność staje się narzędziem podnoszenia jakości

postrzeganej przez nabywców. W działaniach promocyjnych Dyson wykorzystuje zarówno argumenty racjonalne, odnoszące się do parametrów technicznych i efektywności produktów, jak i argumenty emocjonalne związane z nowoczesnym wzornictwem oraz innowacyjnym charakterem marki. Podejście to odpowiada przedstawionej wcześniej koncepcji komplementarności jakości i innowacyjności, zgodnie z którą oba elementy wzajemnie wzmacniają swoją skuteczność.

Podsumowanie

Jakość i innowacyjność należą do najważniejszych czynników budowania przewagi konkurencyjnej współczesnych przedsiębiorstw. W warunkach rosnącej konkurencji organizacje powinny tworzyć wartość dla klientów poprzez oferowanie produktów odpowiadających zarówno wysokim standardom w zakresie jakości, jak i oczekiwaniom związanym z nowoczesnością i użytecznością. Jakość i innowacyjność oddziałują jednak na zachowania konsumentów za pomocą odmiennych, lecz wzajemnie uzupełniających się mechanizmów. Jakość przyczynia się do budowania zaufania, ograniczania postrzeganego ryzyka oraz zwiększania satysfakcji klientów, natomiast innowacyjność wzmacnia atrakcyjność oferty i pozwala wyróżnić ją na tle konkurencji. W efekcie oba czynniki wpływają na lojalność klientów i długookresowe wyniki przedsiębiorstw.

Kluczową rolę w tym procesie odgrywa jednak promocja produktu. Nawet produkt charakteryzujący się wysoką jakością i innowacyjnością może nie osiągnąć sukcesu rynkowego, jeśli jego najważniejsze cechy i korzyści nie zostaną właściwie zakomunikowane potencjalnym nabywcom. Promocja pełni zatem funkcję łącznika pomiędzy przedsiębiorstwem a klientem, umożliwiając budowanie świadomości produktu, kształtowanie jego wizerunku oraz komunikowanie wartości oferowanej odbiorcom.

Wnioski płynące z analizy przykładów Apple, Tesli i Dysona potwierdzają, że skuteczne działania promocyjne integrują przekazy dotyczące zarówno jakości, jak i innowacyjności. Oznacza to, że trwała przewaga konkurencyjna jest rezultatem nie tylko tworzenia wartości, ale również efektywnego komunikowania jej klientom. Współczesne przedsiębiorstwa powinny zatem traktować jakość, innowacyjność i promocję jako wzajemnie powiązane elementy jednej strategii rynkowej.

Summary

Quality and innovation are among the most important factors in building the competitive advantage of contemporary enterprises. In increasingly competitive markets, organizations should create customer value by offering products that meet both high quality standards and customers' expectations regarding modernity and usefulness. However, quality and innovation influence consumer behaviour through different yet complementary mechanisms. Quality contributes to building trust, reducing perceived risk, and enhancing customer satisfaction, whereas innovation increases the attractiveness of an offer and helps differentiate it from competing products. As a result, both factors contribute to customer loyalty and the long-term performance of enterprises.

Product promotion, however, plays a crucial role in this process. Even a product characterized by high quality and innovation may fail to achieve market success if its key features and benefits are not effectively communicated to potential customers. Therefore, promotion serves as a link between the enterprise and the customer, facilitating product awareness, shaping product image, and communicating the value offered to consumers.

The conclusions drawn from the analysis of Apple, Tesla, and Dyson confirm that effective promotional activities integrate messages related to both quality and innovation. This suggests that sustainable competitive advantage results not only from creating value but also from communicating that value effectively to customers. Consequently, contemporary enterprises should treat quality, innovation, and promotion as interrelated elements of a single market-oriented strategy.

Bibliografia

[1] Agazu, B. G., & Kero, C. A. (2024). Innovation strategy and firm competitiveness: A systematic literature review. Journal of Innovation and Entrepreneurship, 13(1), 1-17.

[2] Farida, I., & Setiawan, D. (2022). Business strategies and competitive advantage: The role of performance and innovation. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 8(3), 163.

[3] Gálvez-Ruiz, P., Calabuig, F., Grimaldi-Puyana, M., González-Serrano, M. H., & García-Fernández, J. (2023). The effect of perceived quality and customer engagement on the loyalty of users of Spanish fitness centres. Academia Revista Latinoamericana de Administración, 36(4), 445–462.

[4] García-Fernández, M., Claver-Cortés, E., & Tarí, J. J. (2022). Relationships between quality management, innovation and performance: A literature systematic review. European Research on Management and Business Economics, 28(1), 1-20.

[5] Garvin, D. A. (1987). Competing on the eight dimensions of quality. Harvard Business Review, 65(6), 101–109.

[6] Juran, J. M. (1988). Juran on planning for quality. New York: Free Press.

[7] Kim, S. H., & Yang, Y. R. (2025). The effect of digital quality on customer satisfaction and brand loyalty under environmental uncertainty: Evidence from the banking industry. Sustainability, 17(8), 3500.

[8] Kotler, P., & Keller, K. L. (2017). Marketing management (15th ed.). Pearson.

[9] Lei, Z., Duan, H., Zhang, L., Ergu, D., & Liu, F. (2022). The main influencing factors of customer satisfaction and loyalty in city express delivery. Frontiers in Psychology, 13, 1044032.

[10] PN-EN ISO 9000:2015. Systemy zarządzania jakością — Podstawy i terminologia.

[11] Percy, L. (2018). Strategic integrated marketing communications. Routledge.

[12] Mittal, V., Han, K., Frennea, C., Blut, M., Shail, M., Bosukonda, M., & Sridhar S. Customer satisfaction, loyalty behaviors, and firm financial performance: what 40 years of research tells us. Marketing Letters 34, 171–187

[13] Schumpeter, J. A. (1934). The theory of economic development. Harvard University Press.

[14] Yum, K., & Yoo, B. (2023). The impact of service quality on customer loyalty through customer satisfaction in mobile social media. Sustainability, 15(14), 11214.

[15] Zeithaml, V. A. (1988). Consumer perceptions of price, quality, and value: A means-end model and synthesis of evidence. Journal of Marketing, 52(3), 2–22.

Piero Guadagnino, Agata Matarazzo, Antonio Zerbo

Department of Economics and Business
University of Catania, Italy

LIFE CYCLE INVENTORY FOR THE ANALYSIS OF INNOVATIVE ELECTROCATALYSTS BASED ON NON-CRITICAL RAW MATERIALS FOR GREEN ELECTROLYTIC HYDROGEN

Abstract

Hydrogen produced by water electrolysis powered by renewable energy is increasingly considered a strategic vector for the decarbonization of hard-to-electrify industrial and transport sectors and for the integration of renewable sources into energy systems. However, the large-scale deployment of green hydrogen technologies depends not only on electrolyzer efficiency and cost, but also on the sustainability, availability, and efficient management of the materials and manufacturing processes used for key electrochemical components. In this context, alkaline electrolysis is particularly relevant because it enables the use of non-noble electrocatalysts, potentially reducing dependence on critical and supply-sensitive materials.

This work develops a cradle-to-gate Life Cycle Inventory (LCI) for the fabrication of innovative non-noble electrodes for alkaline electrolysis, consisting of a Mo-based cathode for the hydrogen evolution reaction and a Ni-Fe-based anodic counterpart for operation in alkaline environment. The inventory reconstructs the main material, energy, solvent, auxiliary, and process-loss flows associated with the foreground manufacturing process, including catalyst nanostructuring, ink preparation, electrode deposition, and auxiliary laboratory operations. Beyond its environmental relevance, the LCI is interpreted as a decision-support tool for sustainable technology management, quality-oriented process optimization, and circular economy-oriented scale-up.

The results highlight that manufacturing-related flows can play a significant role in the overall resource profile of non-noble electrode production. In the nanostructuring phase, ball milling represents the dominant electricity-consuming operation, accounting for 1.20 kWh out of 1.43 kWh per batch. In the electrode fabrication phase, solvent use, auxiliary materials, substrate selection, and deposition inefficiencies, including ink losses during spray coating, emerge as relevant aspects for process improvement. These findings show that the sustainability of non-noble electrocatalysts cannot be assessed only through

material substitution, but must also consider manufacturing efficiency, process yield, and resource management.

The proposed inventory provides a quantitative and replicable basis for future Life Cycle Assessment studies and supports managerial decision-making in process optimization, resource allocation, quality control, waste reduction, and scale-up planning for green hydrogen technologies.

Introduction

Hydrogen produced through water electrolysis powered by renewable electricity is increasingly considered a strategic energy carrier for the transition toward low-emission energy and industrial systems. Green hydrogen can contribute to the decarbonization of hard-to-electrify sectors, support the integration of variable renewable energy sources, and provide a flexible link between the energy, industrial, and transport sectors. The growing strategic relevance of hydrogen is also reflected in recent international energy scenarios, which identify renewable hydrogen as a key technology for industrial decarbonization, energy security, and long-term climate neutrality (International Energy Agency, 2025). However, the sustainability of green hydrogen cannot be assumed only on the basis of the renewable origin of electricity. It also depends on electrolyzer efficiency, durability, material availability, supply-chain resilience, and the environmental profile of the manufacturing processes used for key electrochemical components (Acar and Dincer, 2014; Bhandari et al., 2014; Sebbahi et al., 2024).

Among the available electrolysis technologies, alkaline electrolysis represents a mature and potentially cost-effective option for large-scale hydrogen production. One of its main advantages is the possibility of using non-noble electrocatalysts in alkaline environments, thereby reducing dependence on platinum-group metals and other supply-sensitive materials. Comparative life cycle studies of electrolyzer technologies have shown that both manufacturing and operation can significantly influence the environmental profile of hydrogen production systems, depending on system boundaries, electricity supply, equipment lifetime, and component modelling assumptions (Zhao et al., 2020; Wei et al., 2024). Similarly, recent analyses of hydrogen production by alkaline electrolyzer technologies powered by renewable energy confirm that technological configuration and design choices may affect the environmental performance of green hydrogen systems even when the same renewable energy source is assumed (Ajeeb et al., 2024a).

In this context, the selection of electrocatalytic materials is a relevant issue not only from an electrochemical perspective, but also from the standpoint of material availability, critical raw material management, supply-chain resilience, and circular economy-oriented technology development. Ni-Mo-based materials are widely investigated as cathodic catalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline media, while Ni-Fe-based materials are commonly considered promising anodic counterparts for the oxygen evolution reaction. Recent studies have confirmed the potential of NiMo systems for alkaline hydrogen evolution, including foam-based electrodes and mechanochemical synthesis routes, while NiFe-based systems, including layered double hydroxides, are increasingly discussed in relation to both performance and industrial prospects (Bazan-

Aguilar et al., 2024; Iqbal et al., 2024; Urso et al., 2025). Broader reviews on noble metal-free electrocatalysts also highlight the importance of developing efficient and scalable alternatives for alkaline water splitting (Jamesh et al., 2024).

Nevertheless, replacing noble metals with more abundant materials does not automatically guarantee a sustainable or resource-efficient technology. The overall profile of an electrocatalyst-based component also depends on the manufacturing process used to produce it. Nanostructuring, ink preparation, sonication, deposition, substrate selection, cleaning operations, solvent use, and material losses can all influence the material and energy intensity of the final electrode. This is particularly important for emerging technologies developed at laboratory or pre-industrial scale, where processes are often optimized primarily for functional performance, while manufacturing efficiency, reproducibility, solvent management, and waste reduction are less systematically addressed. In this sense, non-noble catalyst development should be considered not only as a materials challenge, but also as a process management challenge, because the transition from laboratory synthesis to scalable manufacturing requires the control of resource flows, yields, losses, and operational variability. Recent work on scalable NiFe-layered double hydroxide synthesis for anion exchange membrane electrolysis further confirms that manufacturing scalability is becoming a central issue in the development of next-generation water electrolysis technologies (Seijas-Da Silva et al., 2025).

Life Cycle Assessment is an internationally standardized methodology used to evaluate the environmental aspects and potential impacts associated with products, processes, and systems throughout their life cycle. Within this framework, Life Cycle Inventory analysis represents the phase in which input and output flows are systematically quantified according to defined goal and scope assumptions, system boundaries, and reference flows (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). The methodological relevance of ISO 14040 has also been discussed in relation to its role in consolidating LCA as a structured environmental management tool for organizations and practitioners (Pryshlakivsky and Searcy, 2013). In the field of hydrogen technologies, LCA studies have been used to compare conventional and emerging production routes, including electrolysis, while also showing that environmental results are highly dependent on inventory assumptions, electricity mix, system boundaries, and methodological choices (Mehmeti et al., 2018).

Recent literature reviews on LCA of green hydrogen production through electrolysis further confirm that the robustness and comparability of results depend strongly on the quality and granularity of inventory data (Ajeeb et al., 2024b). In particular, simplified modelling of electrolyzer components or foreground manufacturing processes may limit the usefulness of LCA results for technology development and industrial planning. Detailed LCI data are therefore essential not only for future impact assessment, but also for identifying environmental hotspots, comparing alternative manufacturing routes, and supporting process improvement. This is especially relevant for innovative electrode systems, where laboratory-scale operations may involve relevant electricity consumption, solvent use, auxiliary materials, and material losses that are often overlooked in system-level studies.

The relevance of LCI, however, is not limited to environmental accounting. When primary inventory data are collected at the process level, they can also support managerial

decision-making by identifying energy-intensive operations, material losses, inefficient resource use, and critical steps that may affect production planning, quality control, and scale-up strategies. In this perspective, LCI can be linked to Life Cycle Management and sustainable business management, since it provides structured information that can support design optimization, eco-efficiency, resource allocation, and continuous improvement along the product life cycle (Remmen et al., 2007; Sonnemann et al., 2015). Life Cycle Assessment has also been explicitly discussed as a decision-making tool, with managerial relevance for product design, strategic planning, environmental communication, and organizational sustainability practices (Pryshlakivsky and Searcy, 2021).

From a management perspective, a detailed LCI can therefore help transform experimental process data into information useful for operational and strategic decision-making. Quantifying electricity consumption, solvent demand, auxiliary material use, substrate requirements, and deposition losses allows researchers and managers to identify where improvement actions should be prioritized. For instance, if a specific unit operation dominates energy demand, management efforts can be directed toward reducing processing time, increasing batch size, improving equipment efficiency, or evaluating alternative process configurations. Similarly, if deposition losses represent a major material inefficiency, process redesign and quality control strategies can be introduced to improve yield, reduce waste, and increase reproducibility. Thus, LCI data can support not only environmental analysis, but also production management, resource allocation, and technology scale-up planning.

From a quality management perspective, the explicit reconstruction of process flows also contributes to greater traceability and control. Emerging electrocatalyst technologies often involve laboratory procedures characterized by small batch sizes, manual handling, and process conditions that may be difficult to reproduce at larger scales. In this context, the identification of critical inputs and operations is a prerequisite for developing standardized, repeatable, and quality-assured manufacturing routes. Energy use, material loading, solvent quantities, sonication conditions, coating efficiency, and cleaning operations can all become relevant process variables affecting both the environmental profile and the functional consistency of the final electrode. Therefore, LCI can support the definition of key performance indicators related to material productivity, process yield, resource efficiency, waste minimization, and batch-to-batch reproducibility.

At the same time, the circular economy perspective requires that green hydrogen technologies be designed not only for high performance during operation, but also for efficient use of resources throughout their value chain. Material losses, solvent consumption, auxiliary flows, and end-of-life considerations are central aspects for reducing environmental burdens and increasing resource security. Although non-noble electrocatalysts may reduce dependence on platinum-group metals, their production can still involve relevant material and energy requirements. Critical and strategic raw materials for electrolyzers, fuel cells, hydrogen separation technologies, and related systems are increasingly recognized as a key issue for the sustainable deployment of hydrogen technologies (Eikeng et al., 2024; Xun et al., 2025). For this reason, circular economy-oriented strategies should include waste prevention, recovery of unused catalytic ink, solvent reuse, optimization of cleaning operations, and improved deposition efficiency.

The need for circularity in hydrogen technologies is increasingly discussed at both component and value-chain level. Recent contributions have highlighted the relevance of recycling, reuse, and recovery strategies for electrolyzers and fuel cells, showing that end-of-life management and material recovery can contribute to reducing environmental impacts and improving resource efficiency (Uekert et al., 2024; Hoppe and Minke, 2025). More broadly, a circular hydrogen technology value chain requires that resource efficiency principles be integrated not only at the end-of-life stage, but also during material selection, component design, manufacturing, and process optimization (Axt et al., 2025). By making material and energy flows explicit, LCI can provide an analytical basis for linking technological development with circular economy principles and sustainable resource management.

Despite the growing literature on green hydrogen, electrolysis technologies, and non-noble electrocatalysts, detailed cradle-to-gate inventories of foreground processes for electrocatalyst nanostructuring and electrode fabrication are still limited. Many studies focus primarily on the operational phase of hydrogen production or on the electrochemical performance of catalytic materials, while fewer contributions explicitly quantify the manufacturing flows associated with catalyst preparation, electrode deposition, auxiliary materials, solvent use, and process losses. Moreover, the managerial interpretation of such inventory data, especially in relation to resource allocation, production management, quality control, and scale-up planning, remains insufficiently developed. This represents a relevant gap because the environmental and managerial performance of future hydrogen technologies will depend not only on the selection of active materials, but also on the ability to transform laboratory-scale processes into efficient, reproducible, and scalable production systems.

This study addresses this gap by developing a cradle-to-gate Life Cycle Inventory for the fabrication of a non-noble electrode set for alkaline electrolysis, consisting of a Ni-Mo-based cathode and a N-Fe-based anodic counterpart. The inventory reconstructs the foreground material, energy, solvent, auxiliary, and process-loss flows associated with catalyst nanostructuring and electrode fabrication. Beyond providing a quantitative basis for future environmental assessment, the study interprets the LCI as a decision-support tool for sustainable technology management, quality-oriented process optimization, and circular economy-oriented scale-up.

The specific objectives of the work are: (i) to quantify the main material and energy flows associated with the production of non-noble electrodes for alkaline electrolysis; (ii) to identify process hotspots and inefficiencies related to electricity consumption, solvent use, auxiliary materials, and deposition losses; and (iii) to discuss how LCI data can support managerial decisions concerning process optimization, resource allocation, quality control, waste reduction, and scalable manufacturing strategies for green hydrogen technologies.

Materials and Methods

The analysis was based on a cradle-to-gate Life Cycle Inventory (LCI) approach, following the general Life Cycle Assessment framework described by ISO 14040 and ISO 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). The study focuses on the foreground

manufacturing processes involved in the preparation of non-noble catalytic materials and their transformation into functional electrodes for alkaline electrolysis. The objective of the inventory is not to provide a complete Life Cycle Assessment, but to generate a transparent and process-specific dataset that can support future environmental assessment, process optimization, quality-oriented manufacturing improvement, and circular economy-oriented scale-up.

The cradle-to-gate perspective was selected because the study investigates the production stage of innovative electrodes, from material input to ready-to-use electrode fabrication. This boundary is appropriate for early-stage technology assessment, where laboratory-scale and pre-industrial processes need to be described in sufficient detail before being integrated into complete hydrogen production models. Recent LCA studies on electrolyzer technologies have shown that component manufacturing, material intensity, and inventory assumptions can significantly influence the environmental profile of hydrogen production systems and should therefore be explicitly documented (Zhao et al., 2020; Wei et al., 2024; Ajeeb et al., 2024).

The reference flow was defined as one ready-to-use electrode set for alkaline electrolysis, consisting of one Ni-Mo-based cathode and one Ni-Fe-based anode, each with an active area of 35.89 cm^2. All material and energy inputs reported in the inventory tables were referred to this reference flow or to the corresponding laboratory batch from which the reference flow was obtained.

The system boundary includes two main foreground phases. Phase 1 refers to the nanostructuring of the Ni-Mo catalytic material through ball milling and subsequent separation, dispersion, and cleaning operations. Phase 2 refers to electrode fabrication, including Ni-Mo cathode preparation through catalytic ink formulation, sonication, spray coating, substrate use, and auxiliary operations, as well as Ni-Fe anode preparation from nickel and iron precursors in alkaline conditions.

The inventory includes metallic precursors, solvents, water, auxiliary reagents, substrates, ionomer or binder materials, electricity consumption of laboratory equipment, and process losses associated with deposition and handling. The production of capital equipment, laboratory infrastructure, human labour, packaging, transport, electrochemical testing, use phase, hydrogen production during operation, and end-of-life treatment were excluded from the system boundary. These exclusions are consistent with the objective of the study, which is focused on the cradle-to-gate reconstruction of the foreground electrode manufacturing process.

Primary foreground data were collected directly by the authors during laboratory-scale catalyst nanostructuring and electrode fabrication activities. These data include measured or directly recorded material inputs, solvent and water consumption, electricity consumption of the main unit operations, auxiliary materials, substrate use, and process losses. The use of primary process-specific data is particularly relevant in LCI modelling because inventory quality, transparency, and process representativeness strongly affect the robustness and usefulness of subsequent Life Cycle Assessment studies (ISO 14044, 2006; Ajeeb et al., 2024).

The inventory was structured according to the actual process sequence in order to preserve traceability between laboratory operations and inventory flows. Material and

energy inputs were assigned to the corresponding unit operation, such as ball milling, centrifugation, sonication, ink preparation, spray coating, hot-plate treatment, cleaning, and anode synthesis. Process losses were explicitly included in the modelling because they affect both environmental performance and manufacturing efficiency. This approach allows the inventory to be used not only as a basis for future Life Cycle Assessment, but also as a tool for identifying process improvement priorities.

No environmental impact assessment was performed at this stage of the work. Therefore, the study is limited to the inventory phase and does not provide impact-category results such as global warming potential, cumulative energy demand, acidification potential, or resource depletion. The focus is instead placed on the transparent quantification and interpretation of foreground flows that are often simplified or omitted in system-level assessments of hydrogen technologies.

Phase 1: Ni-Mo catalyst nanostructuring

Phase 1 was dedicated to the nanostructuring of the nickel–molybdenum catalytic material intended for the hydrogen evolution reaction in alkaline environment. The choice of a ball milling route is consistent with recent literature showing the potential of optimized mechanochemical synthesis for producing efficient NiMo bimetallic electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction under alkaline conditions (Urso et al., 2025).

The process started from nickel and molybdenum powders, which were treated through ball milling. Ethylene glycol was used in a controlled amount as a dispersant and lubricant during the milling operation. From an inventory perspective, the nanostructuring phase includes the input of metallic powders, ethylene glycol, electricity consumption associated with ball milling, electricity consumption for subsequent centrifugation and sonication operations, and auxiliary materials used for cleaning.

The cleaning operations were included because they contribute to the actual material and resource requirements of the laboratory process and are relevant for evaluating possible improvement strategies related to solvent use, water consumption, and operational efficiency. Ball milling was modelled as a separate unit operation because it represents a potentially critical step in terms of energy demand and scale-up relevance. The subsequent centrifugation and sonication steps were also accounted for separately in order to preserve the resolution of the inventory and to identify their relative contribution within the overall nanostructuring phase. The detailed inventory data for Phase 1 are reported in Table 1.

Phase 2: electrode fabrication

Phase 2 was dedicated to the transformation of the catalytic materials into functional electrodes for alkaline electrolysis. This phase includes the preparation of the Ni-Mo cathode and the Ni-Fe anode, both referred to the defined active area of 35.89 cm^2. Electrode fabrication was modelled separately from catalyst nanostructuring because it introduces additional flows related to substrates, ionomer or binder materials, solvents, deposition operations, heating, gas use, and material losses.

This distinction is relevant because the environmental and managerial performance of non-noble electrodes does not depend only on catalyst composition. It is also affected by the efficiency of ink preparation, coating yield, substrate selection, auxiliary material use, and process reproducibility. For this reason, electrode fabrication was explicitly included in the LCI rather than being treated as a simplified or negligible step.

Phase 2.2.1 Fabrication of the Ni-Mo cathode

The Ni-Mo cathode was fabricated by preparing a catalytic ink containing the Ni-Mo powder, solvent, and ionomer or binder material. The ink was sonicated to improve dispersion and reduce agglomeration before deposition. The resulting suspension was deposited onto a conductive substrate by spray coating over an active area of 35.89 cm^2. Heating and auxiliary operations associated with the deposition process were included in the inventory as direct process inputs.

Material losses during spray coating were explicitly modelled because they directly affect the material efficiency of the cathode fabrication process. In particular, the inventory accounts for ink losses associated with overspray and deposition inefficiencies. These losses are relevant not only for environmental assessment, but also for process yield, production cost, quality control, and circular economy strategies aimed at reducing waste and improving resource efficiency. The detailed inventory data for the Ni-Mo cathode fabrication are reported in Table 2.

Phase 2.2.2 Fabrication of the Ni-Fe anode

The Ni-Fe anode was modelled as the anodic counterpart for alkaline electrolysis. The use of a Ni-Fe anodic system is consistent with the role of NiFe-based materials as widely investigated non-noble catalysts for the oxygen evolution reaction in alkaline water electrolysis (Iqbal et al., 2024; Jamesh et al., 2024).

The preparation route included nickel and iron precursors, distilled water, NaOH, and thermal treatment on a hot plate under controlled conditions. The porous transport layer or conductive support was included as a material input, together with the auxiliary flows required for the preparation of the anode. A process margin associated with synthesis and handling inefficiencies was included in the inventory in order to represent material losses and operational variability at laboratory scale. This assumption allows the inventory to better reflect the actual production route and to identify possible improvement areas related to material yield, process control, and standardization. The detailed inventory data for the Ni-Fe anode fabrication are reported in Table 3.

The inventory was developed using primary laboratory data whenever available. When direct measurements were not available, inputs were estimated from the amount of materials used, equipment operating time, nominal power, or experimentally defined process assumptions. All assumptions were documented in the inventory tables in order to ensure transparency and reproducibility.

The study deliberately focuses on laboratory-scale foreground processes. Therefore, the reported inventory should not be interpreted as directly representative of industrial-scale electrode manufacturing. However, laboratory-scale inventories are useful for early-stage technology assessment because they make it possible to identify critical flows and inefficiencies before scale-up. In future work, the inventory can be expanded through sensitivity analyses, alternative manufacturing scenarios, solvent recovery assumptions, improved deposition yields, and scale-up modelling.

The main limitations of the study are related to the laboratory scale of the process, the exclusion of the electrolyzer use phase, the exclusion of end-of-life treatment, and the absence of impact assessment results. Nevertheless, the inventory provides a transparent basis for future Life Cycle Assessment and supports the identification of process hotspots relevant to sustainable technology management, quality-oriented optimization, and circular economy-oriented design of non-noble electrodes for green hydrogen production.

Results & Discussion

This section presents the Life Cycle Inventory results for the alkaline electrolysis electrode manufacturing process. The inventory data are organized according to the two foreground phases described in the methodological section, in order to maintain a direct correspondence between the laboratory process sequence and the structure of the inventory. This organization allows the identification of the main material, energy, solvent, auxiliary, and substrate flows associated with the production of the non-noble electrode set.

The results are reported in three inventory tables. Table 1. refers to Phase 1, namely the nanostructuring of the Ni-Mo catalytic material through ball milling and the subsequent separation, dispersion, and cleaning operations. Tables 2. and 3. refer to Phase 2 and describe, respectively, the flows associated with the fabrication of the Ni-Mo cathode and the Ni-Fe anode. The separate presentation of the two phases makes it possible to identify the contribution of each unit operation and to distinguish between catalyst preparation, cathode fabrication, and anode fabrication.

Life Cycle Inventory results for Ni-Mo nanostructuring

Table 1. reports the inventory data for the Ni-Mo nanostructuring phase. The process starts from 1 g of nickel powder and 1 g of molybdenum powder, with the addition of 100 µL of ethylene glycol used as a dispersing medium during ball milling. From an energy perspective, the total electricity consumption of Phase 1 is 1.43 kWh per batch. Ball milling represents the dominant operation, accounting for 1.20 kWh, corresponding to approximately 84% of the total electricity consumption of this phase. Centrifugation and sonication account for 0.13 kWh and 0.10 kWh, corresponding to approximately 9% and 7%, respectively.

This result shows that the nanostructuring phase is mainly driven by the energy demand of the mechanochemical milling operation. From an environmental inventory perspective, this makes ball milling the main hotspot of Phase 1. From a production-

management perspective, the same information is relevant because it identifies the first unit operation to be considered in future optimization activities. Potential improvement actions may include reducing milling time, increasing batch size, improving equipment efficiency, or evaluating alternative milling conditions able to maintain catalyst performance while reducing energy demand.

The inventory also includes auxiliary flows associated with jar cleaning, namely absolute ethanol, demineralized water, sea sand, and tap water. Although these inputs are not directly incorporated into the final catalytic material, their inclusion is important because they represent actual resource requirements of the laboratory process. This aspect is relevant for future scale-up considerations, since repeated cleaning operations can increase solvent and water consumption and may therefore become a target for process standardization, solvent reduction, and circular economy-oriented improvement strategies.

Table 1. LCI - Nanostructuring

Process phase	Input	Qty	Unit	Type	Notes and assumptions
Reagent preparation	Nickel powder	1	g	Material input	Metallic nickel, Foreground date
Reagent preparation	Molybdenum powder	1	g	Material input	Metallic molybenum, foreground date
Reagent preparation	Ethylene glycole	100	µL	Solvent input	Used as a dispersing medium
Ball milling	Electrical energy	1,20	kWh	Energy input	4 h of mechanochemical milling
Centrifugation	Electrical energy	0,13	kWh	Energy input	40-minute operation
Sonication	Electrical energy	0,10	kWh	Energy input	20-minute operation
Total electricity (Phase E)	Electrical energy	1,43	kWh	Energy input	Sum of the operation consumption
Jar cleaning	Absolute ethanol	100	mL	Solvent input	Cleaning of the milling jars
Jar cleaning	Demineralized water	200	mL	Water input	Intermediate washing

Jar cleaning	Sea sand	3	mL	Auxiliary material	Abrasive support for cleaning
Jar cleaning	Tap water	500	mL	Water input	Final rinsing

Source: own elaboration based on primary foreground data

3.2 Life Cycle Inventory results for Ni-Mo cathode fabrication

Table 2. reports the inventory data for the fabrication of the Ni-Mo cathode. The cathode fabrication process includes catalytic ink preparation, sonication, and spray coating onto a carbon paper substrate with an active area of 35.89 cm^2. The main material input is 0.203 g of Ni-Mo powder derived from Phase 1. The ink preparation step also includes 100 mL of ethanol as dispersion solvent and 0.255 g of FAA3 ionomer as ionic binder.

The direct electricity consumption reported for cathode fabrication is 0.83 kWh, consisting of 0.20 kWh for sonication and 0.63 kWh for the heated plate used during spray coating. Within the cathode fabrication process, the heated plate therefore represents the main electricity-consuming operation, accounting for approximately 76% of the electricity consumption of this phase. Sonication accounts for the remaining 24%, reflecting its role in ink homogenization and dispersion.

The cathode inventory highlights that electrode fabrication introduces critical flows that are not captured when the analysis is limited to catalyst synthesis alone. In particular, solvent use, ionomer use, substrate selection, heating energy, and deposition operations all contribute to the material and energy profile of the final functional electrode. These flows are relevant not only for future environmental assessment, but also for process optimization and manufacturing quality. The reproducibility of ink preparation, the control of coating conditions, and the efficiency of material deposition are key aspects for transforming laboratory-scale electrode preparation into a more standardized and scalable manufacturing route.

Nitrogen was used as auxiliary gas during spray coating but was reported as not determined in the inventory. This represents a data-quality improvement area for future inventory refinement. Quantifying the nitrogen flow would increase the completeness of the LCI and support a more accurate assessment of auxiliary inputs during deposition.

Table 2. LCI - Fabrication Cathode NiMo

Process phase	Input	Qty	Unit	Type	Notes and assumptions
Ink preparation	Ni–Mo Powder	0.203	g	Material input	Derived from phase 1
Ink preparation	Ethanol	100	mL	Solvent input	Ink dispersion

Ink preparation	Ionomer FAA3	0.255	g	Material input	Ionic binder
Ink preparation	Electrical energy (sonicator)	0.2	kWh	Energy input	Homogenization
Spray coating	Carbon paper Sigracet 39 BB	35.89	cm^2	Substrate	Deposition area
Spray coating	Electrical energy (plate)	0.63	kWh	Energy input	Drying/adhesion
Spray coating	Nitrogen	not determined	-	Auxiliary	Nebulizing gas
Spray coating	Ink loss	65	%	Process loss	Overspray and deposition inefficiency

Source: own elaboration based on primary foreground data

3.3 Life Cycle Inventory results for Ni-Fe anode fabrication

Table 3. reports the inventory data for the fabrication of the Ni-Fe anode. The anode preparation route includes nickel nitrate hexahydrate, iron nitrate nonahydrate, sodium hydroxide, distilled water, electricity for hot-plate treatment, and the anodic porous transport layer. The main material inputs are 5 g of nickel nitrate hexahydrate, 1.22 g of iron nitrate nonahydrate, and 30 g of sodium hydroxide. Distilled water is used as reaction medium, with a reported amount of 2 L.

The electricity consumption associated with the hot-plate synthesis step is 3.78 kWh for a 6-hour operation. This is the largest single electricity input reported in the inventory tables. The anode fabrication process therefore appears particularly relevant from an energy-management perspective, especially if the process is repeated over multiple batches or transferred toward larger-scale production. Future optimization may focus on reducing synthesis time, improving thermal efficiency, increasing batch productivity, or evaluating alternative preparation conditions.

The anode inventory also highlights the importance of precursor and reagent management. The use of nickel and iron salts, sodium hydroxide, and water contributes to the material intensity of the anodic component. From a circular economy and quality-management perspective, this suggests the need to control precursor use, reduce excess reagent consumption, standardize washing and handling operations, and improve process yield. These actions would not only reduce resource use and waste generation, but also support more reproducible and quality-assured electrode fabrication.

Table 3. LCI – Fabrication Anode Ni-Fe

Process phase	Input	Qty	Unit	Type	Notes and assumptions
Precursor preparation	Nickel nitrate hexahydrate	5	g	Material input	Ni(NO3)2·6H2O

Precursor preparation	Iron nitrate nonahydrate	1.22	g	Material input	Fe(NO3)3·9H2O
Precursor preparation	Sodium hydroxide	30	g	Material input	Alkaline precipitaion
Precursor preparation	Distilled water	2	L	Water input	Reaction medium
Synthesis	Electrical energy (plate)	3.78	kWh	Energy input	6 h
Support	PTL anodic	1	pc	Substrate	Porous Transport Layer

Source: own elaboration based on primary foreground data

Considering the direct electricity inputs reported in the three inventory tables, the overall electricity consumption of the foreground manufacturing process is 6.04 kWh. The Ni–Fe anode fabrication step accounts for 3.78 kWh, corresponding to approximately 63% of the total electricity demand. Ni–Mo nanostructuring accounts for 1.43 kWh, corresponding to approximately 24%, while Ni–Mo cathode fabrication accounts for 0.83 kWh, corresponding to approximately 14%.

This distribution indicates that the main energy hotspot of the investigated electrode set is the thermal treatment associated with Ni-Fe anode fabrication. The second most relevant contribution is the ball milling operation used for Ni-Mo nanostructuring. The heated plate used during cathode spray coating also represents a relevant contribution within the cathode fabrication route, although its contribution to the overall electricity demand is lower than that of anode synthesis and ball milling.

The inventory results show that the production of non-noble electrodes for alkaline electrolysis cannot be assessed only through the choice of catalytic materials. Although the use of Ni-Mo and Ni-Fe systems can reduce dependence on noble metals, the manufacturing route itself introduces relevant material, energy, solvent, auxiliary, and substrate flows. Therefore, the sustainability of the electrode set depends not only on material substitution, but also on manufacturing efficiency, process yield, solvent management, deposition efficiency, and energy use during unit operations.

Solvent and water use also represent relevant inventory flows. Ethanol is used both in cathode ink preparation and in the cleaning operations of Phase 1, while water is used in the anode synthesis and in jar cleaning. These inputs are important because they identify possible areas for circular economy-oriented improvements, including solvent reduction, solvent recovery, reuse of cleaning media where technically feasible, and optimization of washing procedures.

The inventory further shows that auxiliary and substrate materials are relevant for the final electrode set. Carbon paper, ionomer, nitrogen, and the anodic PTL are necessary to transform catalytic powders into functional electrodes. This confirms that electrode fabrication should not be treated as a negligible step in the LCI of green hydrogen technologies. Component-level manufacturing routes must be explicitly modelled, especially when the objective is to support future scale-up and process improvement.

The developed LCI can be interpreted as a decision-support tool for sustainable technology management. By converting laboratory-scale operations into quantified material and energy flows, the inventory provides information that can support decisions related to process design, production planning, resource allocation, quality control, and scale-up strategies.

The identification of energy-intensive steps is particularly relevant for production management. The hot-plate treatment used for Ni-Fe anode synthesis accounts for the largest share of direct electricity consumption in the investigated process, while ball milling dominates the electricity demand of the Ni-Mo nanostructuring phase. These findings can guide managerial decisions concerning equipment selection, batch size, process duration, and energy-efficiency improvements. Rather than distributing improvement efforts uniformly across all process steps, the LCI allows the prioritization of interventions on the operations with the highest contribution to the inventory.

The inventory also provides useful information for resource allocation. Reducing the energy demand of anode synthesis, improving the efficiency of ball milling, optimizing the heated plate operation during cathode deposition, and reducing solvent use may have a stronger effect than focusing only on minor auxiliary flows. This prioritization is important for early-stage technologies, where resources for process development are often limited and must be directed toward the most influential operations.

From a quality-management perspective, the LCI supports greater process traceability. The explicit quantification of material inputs, energy consumption, substrates, solvents, auxiliary materials, and process assumptions helps identify critical process variables that may affect both environmental performance and manufacturing consistency. In particular, ink formulation, sonication, spray coating, thermal treatment, and cleaning operations are all steps that may influence batch-to-batch reproducibility. Their inclusion in the inventory supports the definition of future quality indicators related to process yield, material productivity, coating efficiency, and waste minimization.

The circular economy relevance of the inventory lies in its ability to make resource flows and inefficiencies visible. Solvent use, water consumption, auxiliary materials, cleaning operations, and deposition-related inefficiencies represent potential intervention areas for waste prevention and resource-efficiency improvement. Therefore, the LCI does not only provide a dataset for future environmental assessment, but also supports the design of more circular and scalable manufacturing routes for non-noble electrodes.

Overall, the results demonstrate that primary LCI data can support the transition from laboratory-scale electrode fabrication to more controlled and sustainable manufacturing processes. The inventory allows the identification of process hotspots, supports quality-oriented optimization, and provides a quantitative basis for managerial decisions related to the scale-up of green hydrogen technologies.

Summary

This work developed a cradle-to-gate Life Cycle Inventory for a non-noble electrode set for alkaline electrolysis, consisting of a Ni-Mo-based cathode and a Ni-Fe-based anodic counterpart. The inventory was based on primary foreground data collected during

laboratory-scale catalyst nanostructuring and electrode fabrication, including material inputs, electricity consumption, solvents, auxiliary flows, substrates, and process-related operations.

The results show that the sustainability of non-noble electrodes cannot be evaluated only through the replacement of noble metals. The manufacturing route itself plays a relevant role in defining the resource profile of the electrode set. In particular, the inventory identified energy-intensive operations such as ball milling during Ni-Mo nanostructuring and hot-plate treatment during Ni-Fe anode fabrication, together with relevant contributions from solvent use, water consumption, substrates, and auxiliary materials.

From a management and quality perspective, the developed LCI provides a quantitative basis for identifying process hotspots and supporting decisions related to process optimization, resource allocation, energy-efficiency improvement, and scale-up planning. The explicit reconstruction of foreground flows also improves process traceability and can support the future definition of quality indicators related to process yield, material productivity, coating efficiency, waste minimization, and batch-to-batch reproducibility.

The study therefore contributes not only to future environmental assessment of green hydrogen technologies, but also to sustainable technology management and circular economy-oriented process improvement. Its main limitation is that the inventory refers to laboratory-scale processes and does not include the use phase, electrochemical testing, end-of-life treatment, or impact assessment results. Future work should extend the analysis toward a full Life Cycle Assessment, include sensitivity and scale-up scenarios, and evaluate improvements such as solvent recovery, deposition efficiency, and alternative manufacturing routes.

References

[1] Acar C., Dincer I., *Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources*, International Journal of Hydrogen Energy, n. 39(1), pp. 1–12, 2014.

[2] Ajeeb W., Baptista P., Costa Neto R., *Life cycle analysis of hydrogen production by different alkaline electrolyser technologies sourced with renewable energy*, Energy Conversion and Management, n. 316, 118840, 2024.

[3] Ajeeb W., Costa Neto R., Baptista P., *Life cycle assessment of green hydrogen production through electrolysis: A literature review*, Sustainable Energy Technologies and Assessments, n. 69, 103923, 2024.

[4] Axt M., Baldassarre B., Kirchherr J., *Towards greater circularity in the hydrogen technology value chain*, Ecological Economics, n. 236, 108679, 2025.

[5] Bazan-Aguilar A., García G., Pastor E., Baena-Moncada A.M., *Highly active NiMo foam-based electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction in alkaline media*, Electrochimica Acta, n. 479, 143881, 2024.

[6] Bhandari R., Trudewind C.A., Zapp P., *Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis — A review*, Journal of Cleaner Production, n. 85, pp. 151–163, 2014.

[7] Eikeng E., Makhsoos A., Pollet B.G., *Critical and strategic raw materials for electrolysers, fuel cells, metal hydrides and hydrogen separation technologies*, International Journal of Hydrogen Energy, n. 71, pp. 433–464, 2024.
[8] Hoppe A.C., Minke C., *Reducing Environmental Impacts of Water Electrolysis Systems by Reuse and Recycling: Life Cycle Assessment of a 5 MW Alkaline Water Electrolysis Plant*, Energies, n. 18(4), 796, 2025.
[9] International Energy Agency, *Global Hydrogen Review 2025*, IEA, 2025.
[10] Iqbal S., Ehlers J.C., Hussain I., Zhang K., Chatzichristodoulou C., *Trends and industrial prospects of NiFe-layered double hydroxide for the oxygen evolution reaction*, Chemical Engineering Journal, n. 499, 156219, 2024.
[11] ISO, *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*, ISO 14040:2006, International Organization for Standardization, 2006.
[12] ISO, *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines*, ISO 14044:2006, International Organization for Standardization, 2006.
[13] Jamesh M.I., Hu D., Wang J., Naz F., Feng J., Yu L., Cai Z., Colmenares J.C., Lee D.J., Chu P.K., Hsu H.Y., *Recent advances in noble metal-free electrocatalysts to achieve efficient alkaline water splitting*, Journal of Materials Chemistry A, n. 12, pp. 11771–11820, 2024.
[14] Mehmeti A., Angelis-Dimakis A., Arampatzis G., McPhail S.J., Ulgiati S., *Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies*, Environments, n. 5(2), 24, 2018.
[15] Pryshlakivsky J., Searcy C., *Fifteen years of ISO 14040: a review*, Journal of Cleaner Production, n. 57, pp. 115–123, 2013.
[16] Pryshlakivsky J., Searcy C., *Life Cycle Assessment as a decision-making tool: Practitioner and managerial considerations*, Journal of Cleaner Production, n. 309, 127344, 2021.
[17] Remmen A., Jensen A.A., Frydendal J., *Life Cycle Management: A Business Guide to Sustainability*, UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, 2007.
[18] Sebbahi S., Assila A., Alaoui Belghiti A., Laasri S., Kaya S., Hlil E.K., Rachidi S., Hajjaji A., *A comprehensive review of recent advances in alkaline water electrolysis for hydrogen production*, International Journal of Hydrogen Energy, n. 82, pp. 583–599, 2024.
[19] Seijas-Da Silva A., Hartert A., Oestreicher V., Romero J., Jaramillo-Hernández C., Muris L.J.J., Thorez G., Vieira B.J.C., Ducourthial G., Fiocco A., Legendre S., Huck-Iriart C., Mizrahi M., López-Alcalá D., Freiberg A.T.S., Waerenborgh J.C., Baldoví J.J., Cherevko S., Varela M., Thiele S., Lloret V., Abellán G., *Scalable synthesis of NiFe-layered double hydroxide for efficient anion exchange membrane electrolysis*, Nature Communications, n. 16, 6138, 2025.
[20] Sonnemann G., Gemechu E.D., Remmen A., Frydendal J., Jensen A.A., *Life Cycle Management: Implementing Sustainability in Business Practice*, in Sonnemann G., Margni M. (eds.), Life Cycle Management, Springer, pp. 7–21, 2015.
[21] Uekert T., Wikoff H., Badgett A., *Electrolyzer and Fuel Cell Recycling for a Circular Hydrogen Economy*, Advanced Sustainable Systems, n. 8(4), 2300449, 2024.
[22] Urso M., Gholamiarjenaki N., Iacono V., Pulvirenti L., Scandurra A., Bruno E., Condorelli G.G., Mirabella S., *Optimized ball milling synthesis of efficient NiMo bimetallic electrocatalysts for hydrogen evolution reaction in alkaline conditions*, International Journal of Hydrogen Energy, n. 162, 150722, 2025.
[23] Wei X., Sharma S., Waeber A., Wen D., Sampathkumar S.N., Margni M., Maréchal F., Van Herle J., *Comparative life cycle analysis of electrolyzer technologies for hydrogen production: Manufacturing and operations*, Joule, n. 8(12), pp. 3347–3372, 2024.
[24] Xun D., Liu M., Hao H., Sun X., Geng Y., You F., Dou H., Li H., Dong Z., *Sustainable supply of critical materials for water electrolysers and fuel cells*, Communications Earth & Environment, n. 6, 627, 2025.

[25] Zhao G., Kraglund M.R., Frandsen H.L., Wulff A.C., Jensen S.H., Chen M., Graves C.R., *Life cycle assessment of H2O electrolysis technologies*, International Journal of Hydrogen Energy, n. 45(43), pp. 23765–23781, 2020.

Piotr Kafel

Katedra Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

SYSTEMY POMIAROWE W ZARZĄDZANIU JAKOŚCIĄ - PRZEGLĄD LITERATURY

MEASUREMENT SYSTEMS IN QUALITY MANAGEMENT - A LITERATURE REVIEW

Streszczenie

Istotnym elementem wspomagającym system zarządzania jakością w organizacjach jest system pomiarowy. W szczególności w obszarze produkcji wiarygodność uzyskanych wyników pomiaru stanowi element niezbędny, aby spełnić wymagania klientów. Celem opracowania jest analiza aktualnie prowadzonych badań naukowych w obszarze zarządzania jakością związanych z wykorzystaniem systemów pomiarowych. W przeprowadzonych badaniach zastosowana została metoda przeglądu literatury pod kątem publikacji wskazujących na wykorzystanie systemów pomiarowych w organizacjach w odniesieniu do zarządzania jakością. Przeglądu dokonano z wykorzystaniem bazy Scopus. Wyniki wykazały, że problematyka systemów pomiarowych stanowi relatywnie rzadko podejmowany obszar badań, a najbardziej rozwinięte wymagania dotyczące oceny, spójności i zdolności systemów pomiarowych występują przede wszystkim w normach specjalistycznych, takich jak ISO/IEC 17025 oraz IATF 16949.

Abstract

A measurement system is an important element supporting the quality management system in organizations. Particularly in the manufacturing sector, the reliability of measurement results is essential for meeting customer requirements. The aim of this study is to analyze current scientific research in the field of quality management related to the use of measurement systems. The research employed a literature review method focusing on publications that address the application of measurement systems in organizations in the context of quality management. The review was conducted using the Scopus database.

The results indicate that measurement systems constitute a relatively infrequently explored research area. Furthermore, the most developed requirements concerning the assessment, consistency, and capability of measurement systems are primarily found in specialized standards, such as ISO/IEC 17025 and IATF 16949.

Wstęp

W wielu obszarach produkcji wymagania klientów związane są bezpośrednio z właściwościami fizycznymi produktów, co stanowi o konieczności ich odpowiedniego pomiaru. W obszarze kontroli jakości stosować można zarówno niszczące jak i nieniszczące badania jakościowe. Biorąc pod uwagę koszty oraz czas oczekiwania na wynik, zdecydowanie bardziej korzystne jest stosowanie nieniszczących metod pomiarowo-badawczych, pozwalających na szybką inspekcję całych partii produkowanych wyrobów (Garstka, 2008).

System pomiarowy (Measuring system) definiowany jest jako zestaw jednego lub więcej przyrządów pomiarowych oraz innych urządzeń, połączonych i przystosowanych do wykonywania określonych pomiarów (Słownik VIM, 2026). Systemy pomiarowe mogą obejmować zarówno bardzo proste przyrządy jak np. suwmiarka do złożonych systemów składających się z wielu elementów realizujących analizę i zapis danych.

Podstawowe wymagania dotyczące systemu zarządzania jakością powszechnie wykorzystywane w praktyce gospodarczej opisane zostały w normach ISO serii 9000. Zarówno obecnie obowiązujące wydanie z roku 2015 jak i opublikowany projekt normy z 2025 roku zawierają elementy odnoszące się do pomiarów w szczególności w punkcie 7.1.5. Wymagania te odnoszą się m.in. do zapewnienia spójności pomiarowej dla przyrządów wykorzystywanych w pomiarach mających istotne znaczenie w ostatecznym spełnieniu wymagań klienta (ISO 9001, 2015; ISO/DIS 9001:2025). Zdecydowanie więcej wymagań związanych z systemami pomiarowymi oraz ich oceny w ramach funkcjonującego systemu zarządzania jakością można zidentyfikować w systemach branżowych, np. dla branży motoryzacyjnej i lotniczej.

Ocenę jakości pomiaru można wykonać stosując m.in. takie wartości jak: dokładność, poprawność, precyzja, niepewność pomiaru i błąd pomiaru. Natomiast ocena jakości systemu pomiarowego możliwa jest przy zastosowaniu m.in. kalibracji, spójności pomiarowej, weryfikacji, walidacji oraz właściwości systemu (np. w ramach MSA).

Celem opracowania jest wskazanie aktualnych badań w obszarze zarządzania jakością nawiązujących do zagadnień związanych z systemem pomiarowym oraz wskazania aktualnych trendów w tym obszarze.

Metodyka

W artykule zastosowano przegląd literatury, który pozwolił na analizę publikacji w zakresie systemu zarządzania jakością zgodnego z wymaganiami normy ISO 9001 oraz systemu pomiarowego. Przegląd publikacji przeprowadzono z wykorzystaniem jednej z najpopularniejszych baz danych Scopus. Wyszukiwanie kombinacji słów kluczowych

odbywało się w tytule artykułu, abstrakcie oraz słowach kluczowych. Dokonano analizy publikacji wykazujących tematykę systemu zarządzania jakością oraz zagadnień z obszaru systemów pomiarowych.

Analizując bazę danych pod kątem systemu zarządzania jakością przeprowadzono korzystając ze słów kluczowych: „ISO 9001". W obszarze tematyki dotyczącej systemu pomiarowego wykorzystano słowo kluczowe: „Measuring system". Wyszukiwanie przeprowadzono w bazie Scopus w czerwcu 2026 roku z wykorzystaniem zapytania TITLE-ABS-KEY ("ISO 9001" AND "Measuring system"). W wyniku takiej analizy zidentyfikowano 76 publikacji do analizy. Wszystkie publikacje poddano analizie.

Wyniki

W grupie analizowanych publikacji znalazło się 34 artykuły naukowe, 33 opracowania pokonferencyjne oraz 9 innych publikacji w tym recenzje i rozdziały książkowe. Analiza krajów afiliacji autorów wskazuje, że największy udział mają Niemcy (13), Federacja Rosyjska (10), Stany Zjednoczone (9) oraz Chiny (7).

Analiza rozkładu tematycznego publikacji wskazuje na wyraźną dominację dyscyplin inżynieryjnych, które stanowią największą część badanego korpusu (45 przypadków). Świadczy to o silnym ukierunkowaniu przeglądanej literatury na zagadnienia techniczne oraz aplikacyjne. Drugą najliczniej reprezentowaną dziedziną jest informatyka (24), co sugeruje istotną rolę metod obliczeniowych, analizy danych oraz systemów informatycznych w analizowanym obszarze badawczym. Mniejszy, lecz nadal zauważalny udział mają nauki materiałowe (14), które wskazują na zainteresowanie właściwościami oraz zastosowaniami nowych materiałów, często w kontekście inżynieryjnym. Zbliżony poziom reprezentacji deklarują również fizyka i astronomia (11) oraz nauki o zarządzaniu i rachunkowości (11).

Rozkład czasowy analizowanych publikacji wskazuje na wyraźne zróżnicowanie intensywności badań w poszczególnych latach. Największą liczbę prac odnotowano w latach 2009 oraz 2019 (po 7 publikacji), a także w 2008 (6) i 2022 (6), co może sugerować okresy wzmożonego zainteresowania badaczy analizowaną tematyką.

Analiza częstości występowania słów kluczowych przypisanych do danej publikacji wskazuje na wyraźną dominację terminów związanych z zarządzaniem jakością oraz kontrolą procesów. Pomijając słowa kluczowe będące podstawą wyszukiwania, najczęściej pojawiają się w analizowanych publikacjach takie pojęcia jak: Quality Control (28) oraz Total Quality Management (22) a także Quality Assurance (12). W dalszej kolejności występują m.in. Quality Function Deployment, Customer Satisfaction, Automotive Industry oraz Security of Data (po 7 wystąpień), a także Measurements (6) i Quality Management Systems (5). Znaczącą grupę stanowią również pojęcia o umiarkowanej częstości (po 3 wystąpienia), takie jak FMEA, MSA, Gage R&R, Computer Simulation, Calibration czy Advanced Product Quality Planning, które odnoszą się do metod i narzędzi wykorzystywanych w analizie jakości oraz systemach pomiarowych.

Po wykluczeniu słów kluczowych bezpośrednio związanych z zarządzaniem jakością oraz systemami pomiarowymi, pozostałe terminy można uporządkować w kilka uzupełniających grup tematycznych. Pierwszą z nich stanowi grupa techniczno-

inżynieryjna, obejmująca zagadnienia związane z procesami produkcyjnymi, automatyką oraz infrastrukturą techniczną, w tym takie pojęcia jak production process, manufacturing process, automation, robot, sensors czy inspection.

Drugą kategorię tworzą zagadnienia informatyczne i analityczne, reprezentowane przez terminy takie jak artificial intelligence, machine learning, computer simulation, software, image processing oraz data acquisition, które wskazują na wykorzystanie narzędzi obliczeniowych i metod analizy danych.

Kolejną grupę stanowią pojęcia materiałowe i fizyczne, obejmujące m.in. thermal conductivity, vacuum technology, cement, aluminum alloys oraz kinematics, odnoszące się do właściwości materiałów i zjawisk fizycznych.

Wyróżnić można również grupę aplikacyjno-branżową, obejmującą różne sektory gospodarki, takie jak automotive industry, aerospace industry, railroads, food quality czy paper products. Uzupełniająco występuje grupa medyczna i biologiczna, związana z zastosowaniami w ochronie zdrowia, reprezentowana przez pojęcia takie jak patient care, breast cancer, mammography czy drug monitoring.

Ostatnią kategorię stanowią ogólne zagadnienia organizacyjno-ekonomiczne, niezwiązane bezpośrednio z zarządzaniem jakością, takie jak productivity, marketing, purchasing, competition oraz cost effectiveness.

Takie uporządkowanie wskazuje na szeroki, interdyscyplinarny kontekst analizowanych publikacji, wykraczający poza główny nurt badań nad jakością i systemami pomiarowymi.

Dalsza część analizy dotyczyła odwołań do systemów zarządzania oraz innych norm powiązanych, które współwystępowały z ISO 9001 w badanej literaturze.

Najczęściej identyfikowaną normą towarzyszącą była ISO/IEC 17025, występująca w siedmiu publikacjach. Odwołania do tej normy dotyczyły przede wszystkim laboratoriów badawczych i wzorcujących, zapewnienia kompetencji technicznych laboratoriów, wzorcowania wyposażenia pomiarowego, spójności pomiarowej oraz jakości wyników pomiarów.

Drugą grupę stanowiły normy związane z zarządzaniem środowiskowym i bezpieczeństwem pracy. Norma ISO 14001 została wskazana w sześciu publikacjach, natomiast OHSAS 18001 w czterech. Dodatkowo w dwóch artykułach pojawiła się norma ISO 45001, która zastąpiła OHSAS 18001 jako międzynarodowy standard zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. W większości przypadków normy te były analizowane w kontekście zintegrowanych systemów zarządzania oraz możliwości łączenia wymagań jakościowych, środowiskowych i związanych z bezpieczeństwem pracy w ramach jednej struktury organizacyjnej.

Istotne miejsce zajmowały również normy branży motoryzacyjnej. W trzech publikacjach stwierdzono odniesienia do IATF 16949 lub wcześniejszej normy ISO/TS 16949. W analizowanych pracach normy te były powiązane przede wszystkim z wymaganiami dotyczącymi analiz systemów pomiarowych (Measurement System Analysis – MSA), oceną zdolności systemów pomiarowych oraz zapewnieniem jakości procesów produkcyjnych. Potwierdza to ścisłe powiązanie systemów branżowych z koniecznością oceny systemów pomiarowych.

W pojedynczych publikacjach występowały również inne normy systemowe i branżowe. Należały do nich między innymi ISO 22000 dotycząca systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności, ISO 10018 odnosząca się do zaangażowania personelu i czynników ludzkich w systemach jakości, ISO 14031 dotycząca oceny efektów działalności środowiskowej, ISO 9004 ukierunkowana na doskonalenie organizacji oraz ISO 12207, odnosząca się do procesów cyklu życia oprogramowania.

W analizowanych publikacjach odnotowano również obecność norm i standardów związanych z oceną zgodności, takich jak EN 45001–45003, EN 9100/AS9100B dla przemysłu lotniczego oraz różnych wydań norm rodziny ISO 14000. Pojawiały się one jednak sporadycznie i zwykle stanowiły element szerszej dyskusji dotyczącej integracji systemów zarządzania lub zapewniania wiarygodności procesów pomiarowych.

Uzyskane wyniki wskazują, że w analizowanych publikacjach najczęściej współwystępującymi normami są normy dotyczące kompetencji laboratoriów (ISO/IEC 17025), zarządzania środowiskowego (ISO 14001) oraz bezpieczeństwa i higieny pracy (OHSAS 18001, ISO 45001). W obszarze bezpośrednio związanym z systemami pomiarowymi szczególne znaczenie mają natomiast ISO/IEC 17025 oraz IATF 16949, które w analizowanych pracach najczęściej odnoszono do oceny jakości pomiarów, spójności pomiarowej oraz analizy zdolności systemów pomiarowych.

Podsumowanie

Istotnym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonego przeglądu literatury jest relatywnie niewielka liczba publikacji jednocześnie odnoszących się do systemów zarządzania jakością zgodnych z ISO 9001 oraz systemów pomiarowych. Pomimo bardzo dużej popularności normy ISO 9001 w badaniach naukowych i praktyce gospodarczej, zagadnienia związane z systemami pomiarowymi stanowią jedynie wąski i wyspecjalizowany nurt badawczy. Przegląd norm współwystępujących z ISO 9001 wykazał, że największe znaczenie dla systemów pomiarowych mają wymagania normy ISO/IEC 17025 oraz branżowej specyfikacji IATF 16949. Pierwsza z nich koncentruje się na kompetencjach laboratoriów, spójności pomiarowej i zapewnieniu wiarygodności wyników badań, natomiast druga rozszerza wymagania jakościowe o obowiązek analizy zdolności systemów pomiarowych. Uzyskane wyniki potwierdzają, że najbardziej zaawansowane wymagania dotyczące oceny systemów pomiarowych występują obecnie w normach specjalistycznych i branżowych, a nie w uniwersalnych systemach zarządzania jakością.

Summary

An important conclusion drawn from the literature review is the relatively small number of publications that simultaneously address ISO 9001-compliant quality management systems and measurement systems. Despite the widespread adoption of ISO 9001 in both academic research and business practice, issues related to measurement systems remain a narrow and highly specialized research area. The review of standards

associated with ISO 9001 revealed that the most significant requirements concerning measurement systems are found in ISO/IEC 17025 and the industry-specific standard IATF 16949. The former focuses on laboratory competence, measurement traceability, and ensuring the reliability of test results, while the latter extends quality requirements by introducing the obligation to analyze measurement system analysis. The findings confirm that the most advanced requirements for the evaluation of measurement systems are currently embedded in specialized and industry-specific standards rather than in universal quality management systems.

Bibliografia

[1] Garstka, T.(2008). System pomiarowy do badań właściwości wyrobów stalowych z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena, *Pomiary Automatyka Robotyka,* 6.

[2] PN-EN ISO 9001:2015 Systemy zarządzania jakością - Wymagania.

[3] ISO/DIS 9001:2025 Quality management systems - Requirements.

Netografia

[4] Słownik VIM, https://jcgm.bipm.org/vim/en/3.2.html (data dostępu: 26.06.2026)

Sylwia Kurzeja

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

EFEKTYWNE ZARZĄDZANIE SKARGAMI KLIENTÓW JAKO ELEMENT BUDOWANIA SATYSFAKCJI KLIENTÓW W KONTEKŚCIE WYMAGAŃ NORMY PN-ISO 10002:2020. PARADOKS REKLAMACJI

EFFECTIVE COMPLAINT MANAGEMENT AS AN ELEMENT OF BUILDING CUSTOMER SATISFACTION IN THE CONTEXT OF PN-ISO 10002:2020 REQUIREMENTS. THE COMPLAINT PARADOX

Streszczenie

W artykule przedstawiono problematykę efektywnego zarządzania reklamacjami i odzyskiwania usług przez organizację. Przedstawione aspekty stanowią kluczowy element w strategii utrzymania klienta. W niniejszej pracy dokonano analizy wymagań normy PN-ISO 10002:2020 Zarządzanie jakością - Zadowolenie klienta - Wytyczne dotyczące postępowania z reklamacjami w organizacjach jako podstawowego narzędzia wspierającego procesy reklamacyjne. Rozważania teoretyczne dotyczą również teorii sprawiedliwości oraz paradoksu odzyskiwania usług. Przedstawiono także, w jakich okolicznościach u klienta kształtuje się lojalność wobec organizacji oraz poczucie satysfakcji wywołane pozytywnym rozwiązaniem procesu reklamacyjnego.

Abstract

This paper addresses the issues of effective complaint management and service recovery within an organization. These aspects are considered key elements of a customer

retention strategy. The paper provides an analysis of the standard PN - ISO 10002:2020 *Quality management – Customer satisfaction – Guidelines for complaints handling in organizations* as a fundamental tool for supporting complaint processes. The theoretical framework also encompasses justice theory and the service recovery paradox. The theoretical section explains the circumstances under which customer loyalty and satisfaction are fostered through the successful resolution of the complaint process.

Wstęp

Współczesny rynek musi mieć przestrzeń na popełnianie błędów w relacji organizacja-klient. Rzecz w tym, jak dany problem zostanie rozwiązany. Celem pracy jest analiza procesów zarządzania reklamacjami na podstawie normy PN-ISO 10002:2020 Zarządzanie jakością – Zadowolenie klienta – Wytyczne dotyczące postępowania z reklamacjami w organizacjach, która określa wytyczne dotyczące efektywnego postępowania reklamacyjnego. Analiza teoretyczna wzbogacona zostanie o ujęcie teorii sprawiedliwości w kontekście działań organizacji, a także koncepcja paradoksu odzyskiwania usług (service recovery paradox). Celem pracy jest przybliżenie mechanizmów tworzących efektywny proces reklamacyjny, które wpływają na wzrost satysfakcji i lojalności klienta.

Charakterystyka wytycznych normy PN-ISO 10002:2020

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna ISO jest światową organizacją zrzeszającą krajowe instytucje normalizacyjne. W celu opracowania Norm Międzynarodowych należy zaangażować komitety techniczne ISO. Każdy członek, który jest zainteresowany tematem, przez który komitet techniczny został powołany, ma prawo do bycia reprezentowanym w tym komitecie. We wspomnianych wyżej pracach biorą również udział organizacje międzynarodowe, rządowe i pozarządowe współpracujące z ISO. Warto także wspomnieć, że ISO współpracuje z Międzynarodową Komisją Elektrotechniczną (IEC) we wszystkich sprawach, które dotyczą normalizacji elektrotechnicznej. Normą, której wymagania stanowią jeden z głównych tematów rozważań niniejszego artykułu, jest norma PN-ISO 10002:2020 Zarządzanie jakością – Zadowolenie klienta – Wytyczne dotyczące postępowania z reklamacjami w organizacjach. Informacje zawarte w tej normie służą udoskonaleniu wyrobów, usług i procesów, a w przypadku prawidłowego przebiegu reklamacji, mogą prowadzić do poprawy postrzegania organizacji. Na rynku globalnym stosowanie tej normy budzi zaufanie, ponieważ świadczy to o spójnym traktowaniu skarg. Skuteczny proces skarg jest odzwierciedleniem potrzeb organizacji oraz jednostki składającej reklamację. Według zapisów normy PN-ISO 10002:2020 obsługa skarg może zwiększyć satysfakcję klienta. Ważne jest to, aby zachęcać klientów do informacji zwrotnej oraz do składania reklamacji w przypadku niedogodności, ponieważ jest to dobra okazja do zwiększenia lojalności i poprawy konkurencyjności krajowej i międzynarodowej.

Wdrożenie procesu reklamacyjnego na podstawie wymagań normy PN-ISO 10002:2020 może:

- zapewnić dostęp osobie składającej skargę do otwartego i responsywnego procesu obsługi skarg,
- zwiększyć zdolność organizacji do spójnego, systematycznego i terminowego rozwiazywania skarg,
- zwiększyć zdolność organizacji do eliminowania przyczyn powstawania reklamacji i poprawiania działania organizacji,
- pomóc organizacji w stworzeniu podejścia zorientowanego na klienta oraz zmobilizować pracowników do podnoszenia umiejętności w pracy z konsumentami,
- stanowić podstawę do analizy procesu obsługi reklamacji, rozwiązywania skarg oraz wprowadzania usprawnień procesu (PN-ISO 10002:2020).

Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna (ISO) opublikowała szereg norm dotyczących istotnych obszarów zarządzania w organizacjach. Są one podzielone na te, których system wymaga certyfikacji: PN-EN ISO 9001:2015 czy PN-EN ISO 14001:2015, a także na te, które jej nie podlegają certfikacji, ale są podstawą najlepszych praktyk. Należą do nich: PN-EN ISO 26000:2021, PN-ISO 31000:2018 czy PN-ISO 10002:2020. W ostatniej z wymienionych norm zawarto wytyczne dotyczące procesu obsługi skarg związanych z produktami w organizacji, które obejmują planowanie, projektowanie, obsługę, konserwację i udoskonalanie. Norma ta została opublikowana pierwotnie w 2004 roku i została uznana jako międzynarodowy standard normalizacji w kontekście rozpatrywania reklamacji. Wymagania Normy PN-ISO 10002:2020 służą jako przewodnik tym organizacjom, jak opracować dobrą politykę skarg oraz proces rozpatrywania ich. Ma ona duży związek z normą PN-EN ISO 9001:2015 i służy jej jako przewodnik pomocniczy. Norma PN-ISO 10002:2020 jest ważna w kontekście tworzenia dobrze sformułowanych zasad reklamacji, które będą korzystne zarówno dla klienta, jak i dla organizacji. Co ważne, norma ta ma wymiar międzynarodowy i ma swoje zastosowanie w handlu tradycyjnym oraz w e-commerce.

Norma PN-ISO 10002:2020 wyewoluowała z normy ISO 10018:2018, której tematyka również związana jest z rozpatrywaniem reklamacji. W 1995 roku Australia opublikowała własną normę dotyczącą rozpatrywania reklamacji AS4269. Została ona opracowana przez Standards Australia. Jest ona odpowiednikiem wcześniej wspomnianych norm ISO 10018 i ISO 10002:2018:2020 (Ang & Buttle, 2012).

W normie PN-ISO 10002:2020 zamieszczono 9 zasad postępowania z reklamacjami, które zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zasady postępowania z reklamacjami wg PN-ISO 10002:2020

Zasada	Opis
Widoczność	Informacje dotyczące reklamacji powinny być upublicznione w taki sposób, aby były widoczne dla wszystkich zainteresowanych stron
Dostępność	Proces rozpatrywania reklamacji powinien być łatwo dostępny dla strony składającej skargę. Szczegółowe informacje dotyczące składania i rozstrzygania reklamacji powinny być udostępnione. Dodatkowo powinny być one łatwe do zrozumienia i użycia.

	Zawarte informacje powinny być sformułowane w prostym języku i dostępne w językach i formatach, w których oferowane były produkty, w tym w formatach alternatywnych (np. duży druk, alfabet Braille'a, nagranie audio), aby uniknąć nieprzyjemności dla strony skarżącej
Responsywność	Otrzymanie każdej reklamacji powinno obowiązkowo i niezwłocznie zostać potwierdzone stronie skarżącej. Reklamacje powinny być rozpatrywane natychmiastowo, a skarżący powinni być traktowani z należytą uprzejmością i dokładnością w kwestii przekazywania informacji odnośnie do dalszych etapów procesu
Obiektywizm	Rozpatrywanie każdej reklamacji powinno przebiegać w sposób obiektywny, bezstronny i sprawiedliwy w ramach procesu obsługi reklamacji
Brak opłat	Możliwość dostępu do procesu rozpatrywania skargi powinna być dostępna dla strony skarżącej bezpłatnie
Poufność	Informacje umożliwiające identyfikację strony skarżącej powinny być dostępne tylko tam, gdzie jest to wymagane w celu możliwości rozpatrywania reklamacji wewnątrz organizacji. Powinny być one chronione przez ujawnieniem, jeśli strona skarżąca nie wyraziła zgody na ich udostępnienie
Podejście zorientowane na klienta	Organizacja powinna być otwarta na informacje zwrotne (w tym reklamacje) i być zaangażowana w proces rozwiązywania skarg
Odpowiedzialność	Organizacja powinna przedstawić jasny zestaw zasad dotyczących odpowiedzialności i raportowania w zakresie działań i decyzji organizacji dotyczących obsługi reklamacji
Ciągłe doskonalenie	Stałym celem organizacji powinno być ciągłe doskonalenie procesu rozpatrywania reklamacji

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ang & Buttle, 2012, s. 1025).

Teoria sprawiedliwości

Warto wspomnieć o tym, że klienci mają skłonność do oceniania swoich doświadczeń reklamacyjnych. Bardzo ważną rolę w tej kwestii odgrywa sprawiedliwość, ponieważ przez właśnie ten pryzmat konsumenci oceniają przebieg procesu reklamacji. Wyróżnić można trzy rodzaje sprawiedliwości: dystrybutywna, proceduralna oraz interakcyjna (Ang & Buttle, 2012).

Sprawiedliwość dystrybutywna wyróżnia się tym, że dotyczy efektu końcowego. Odpowiada na pytanie: Co klient otrzyma w ramach rekompensaty? Jest to zazwyczaj zwrot poniesionych kosztów, wymiana towaru, bony rabatowe lub propozycja naprawy szkody. Po stronie klienta zostaje stwierdzenie czy propozycja rekompensaty jest proporcjonalna do poniesionej straty.

Sprawiedliwość proceduralna dotyczy, natomiast, metod i procedur. Odpowiada na pytanie: Jak przebiegał proces reklamacyjny? Konsument stwierdza, czy proces jest stały i identyczny dla każdego klienta, obiektywny, wolny od uprzedzeń, a także czy konsument ma prawo głosu w całym procesie sprawy. Nawiązując do tabeli 1, zasady odpowiadające tego rodzaju sprawiedliwości to: dostępność, brak opłat i obiektywizm.

Trzecim i zarazem ostatnim rodzajem jest sprawiedliwość interakcyjna. Dotyczy ona sposobu traktowania klienta przez organizację. Odpowiada ona na pytanie: Jaka atmosfera panowała podczas procesu reklamacyjnego? Zasady obowiązujące podczas procesu skarg, patrząc przez pryzmat sprawiedliwości interakcyjnej, to uprzejmość, szacunek, jasność tłumaczeń, transparentność, udzielanie informacji zgodnych ze stanem rzeczywistym oraz brak ukrywania jakichkolwiek faktów przed klientem wnoszącym skargę (Colquitt, J. A., 2001).

Klienci patrzą na działania rekompensacyjne w sposób emocjonalny, ponieważ poczucie sprawiedliwości oraz zainteresowanie klientem od strony organizacji jest priorytetem podczas procesu reklamacyjnego. Jeśli w firmie panuje niejasność zasad oraz brak działań i terminowości ze strony organizacji, klient odczuwa mocne poczucie niesprawiedliwości, co negatywnie wpływa na postrzeganie firmy. Odbiór pracowników pierwszej linii, którzy bezpośrednio kierują procesem reklamacyjnym jest niesłychanie istotny, ponieważ to, jaki oni mają stosunek do klienta, daje pogląd na to, jak proces reklamacyjny będzie przebiegał. Jeśli pracownicy w swoim podejściu do konsumenta są uprzejmi, zmotywowani do rozwiązania problemu, kompetentni, a także potrafią aktywnie słuchać i doradzać, klient odczuwa bezpieczeństwo, które jest podstawą do budowania relacji z organizacją. O tym, jak istotne jest poczucie bezpieczeństwa, przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Piramida potrzeb Maslowa
Źródło: *"Maslow's Hierarchy of Needs: A Marketing Perspective"*, https://www.onlinevisibilityacademy.com/maslows-hierarchy-of-needs-a-marketing-perspective/, Mandy Barrow, 2021 r., data dostępu do strony: 17.05.2026 r.

Przedstawiony model hierarchii potrzeb Maslowa, który (zob. Rys.1), pozwala na zapoznanie się z naturalnymi potrzebami każdego człowieka, natomiast nie utożsamia się on z każdą pojedynczą jednostką. Model ukazuje szereg potrzeb ustawionych hierarchicznie w celu wyróżnienia wagi każdej z nich. Są to potrzeby zarówno psychologiczne jak i fizjologiczne. Pragnienia, o których wspomina Maslow to: potrzeby fizjologiczne, potrzeba bezpieczeństwa, przynależności, uznania oraz samorealizacji. Przedstawione potrzeby zostały ułożone w kolejności od najbardziej niezbędnych w życiu człowieka (King-Hill, 2015). Należy zwrócić uwagę na potrzebę widniejącą na drugim miejscu, czyli potrzebę bezpieczeństwa. Jest to pragnienie natury psychologicznej, które charakteryzuje się tym, iż człowiek potrzebuje poczucia opieki i bezpieczeństwa, co przekłada się na spokój psychiczny i możliwość zaspokajania wyżej postawionych pragnień na piramidzie (Barrow, 2021).

Paradoks odzyskiwania usług

Paradoks odzyskiwania usług znany jako Service Recovery Paradox to sytuacja, w której zadowolenie klienta po odzyskaniu usługi jest większe niż przed niedogodnością. Prowadzi to do wyższego zadowolenia w porównaniu z usługą, która została prawidłowo wykonana za pierwszym razem (de Matos et al., 2007).

Zachowania związane ze skargą zostały podzielone na dwa typy: działanie i bezczynność. Pierwszy typ wyróżnia się tym, że klient może podjąć działanie publiczne lub prywatne. Pierwsze z nich charakteryzuje się tym, że konsument może złożyć skargę bezpośrednio do firmy, do osoby trzeciej lub może podjąć kroki prawne. Działanie prywatne, natomiast, objawia się osobistym bojkotem i negatywnym marketingiem szeptanym. Drugi typ zachowań związany ze skargą, a mianowicie bezczynność, oznacza, że konsument nie podejmuje żadnego działania i założenia organizacji są takie, że wróci.

Postrzegana sprawiedliwość jest to indywidualne postrzeganie słuszności reakcji jednostki w sytuacjach konfliktowych. W kontekście odzyskiwania usług postrzegana sprawiedliwość jest kluczowym punktem w procedurze podejmowanej przez usługodawcę w celu odzyskania usług. Istnieją trzy wymiary postrzeganej sprawiedliwości wysiłków odzyskiwania usług: postrzegana sprawiedliwość dystrybutywna (wyniki odzyskiwania usług), proceduralna (procedury i polityka odzyskiwania usług) oraz interakcyjna (traktowanie interpersonalne w trakcie procesu odzyskiwania usług). Wynik oceny sprawiedliwości wpływa na psychologiczne oraz behawioralne reakcje. Do psychologicznych reakcji zaliczyć można satysfakcję i lojalność, natomiast do behawioralnych: ponowny zakup, rekomendacje ustne.

Sprawiedliwość dystrybutywna w kontekście odzyskiwania usług cechuje się tym, że jest postrzegana jako sprawiedliwość w kontekście wymiany wynikającej z niepowodzenia usługi. Jest to porównanie otrzymanego wynagrodzenia z tytułu porażki organizacji z wkładem klienta (strata czasu, pieniędzy, energii).

Postrzegana sprawiedliwość proceduralna jest określana jako uczciwość procedury i polityki stosowanych w procesie rozwiązywania problemu (Nuansi i Ngamcharoenmongkol, 2021). Istnieje pięć zasad, które czynią procedurę efektywniejszą i zostały one przedstawione w tabeli 2.

Tabela 2. Czynniki efektywności procedury

Zasada	Definicja
Dostępność procesu	Jest to łatwość zaangażowania się lub uczestnictwa w procesie
Szybkość	Jest to postrzegana ilość czasu na reakcję na problem
Kontrola procesu	Jest to swoboda komunikowania poglądów na temat procesu decyzyjnego
Kontrola decyzji	Jest to stopień, w jakim dana osoba ma swobodę zaakceptowania lub odrzucenia wyniku decyzji. Zależy ona od prawdopodobieństwa, że klient może wpłynąć na wynik odzyskiwania usługi
Elastyczność	Jest to adaptowalność procedur, tak aby odzwierciedlały one indywidualne okoliczności

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Nuansi i Ngamcharoenmongkol, 2021).

W kontekście odzyskiwania usług, sprawiedliwość interakcyjna to uczciwość w stosunku do interakcji z organizacją w trakcie procesu reklamacji (Nuansi i Ngamcharoenmongkol, 2021). Obejmuje maniery i interakcje płynące od usługodawcy podczas procedury odzyskiwania usługi. Istnieją cztery elementy postrzegania sprawiedliwości interakcyjnej, które widnieją w tabeli 3.

Tabela 3. Wymiary sprawiedliwości interakcyjnej

Zasada	Definicja
Uprzejmość	Jest to sposób, w jaki przebiega proces rozwiązywania problemu
Uczciwość	Jest to rzeczywiste zainteresowanie rozwiązaniem problemu
Zainteresowanie uczciwością	Są to próby uzyskania informacji od usługodawcy przed zajęciem się problemem
Wysiłek	Jest to stopień, w jakim pracownik usług bierze pod uwagę punkt widzenia klienta

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Nuansi i Ngamcharoenmongkol, 2021).

Satysfakcja klienta zaczęła być postrzegana jako wskaźnik efektywności procesu reklamacyjnego. Jest ona odzwierciedleniem efektywności odzyskiwania usług z różnych perspektyw teoretycznych. Badania dowodzą, iż wspomniana satysfakcja pojawia się w momencie, gdy proces reklamacyjny zakończył się sprawiedliwym rozwiązaniem. Podzielono satysfakcję na tę uzyskaną z konkretnej transakcji oraz na tę ogólną. Satysfakcja z konkretnej transakcji jest oceną bieżącego doświadczenia z usługą bądź jej odzyskaniem. Ogólna satysfakcja, natomiast, jest definiowana jako podsumowanie wszystkich poprzednich transakcji i doświadczeń (Nuansi i Ngamcharoenmongkol, 2021).

Reklamacja jest definiowana jako niezadowolenie z firmy. Istnieją cztery powody, dla których klienci składają skargi, a są to: uzyskanie odszkodowania lub rekompensaty, danie upustu gniewowi, pomoc w ulepszeniu działań organizacji oraz pobudki altruistyczne (pomoc innym klientom). Organizacja oferująca produkty bądź usługi musi mieć umiejętność regeneracji, ponieważ to pokazuje jej rozwój oraz umiejętność osiągania

rentowności. Regeneracja w tym przypadku jest rozumiana jako odpowiedź jednostki na niepowodzenie, mając na uwadze dobro klienta.

Jeżeli organizacja wprowadzi wynagrodzenie jako reakcję na proces reklamacyjny, będzie to prowadzić do poczucia sprawiedliwości dystrybutywnej, co przełoży się na zwiększenie lojalności klientów. Poprawne zachowanie pracowników organizacji tworzy poczucie sprawiedliwości interaktywnej, co zwiększa poziom zadowolenia klientów, a to prowadzi do dużej lojalności z ich strony i pozytywnego marketingu szeptanego. Procedury organizacyjne zwiększają poczucie sprawiedliwości proceduralnej, co również przekłada się na zadowolenie klientów. Postrzeganie sprawiedliwości przez konsumentów jest fundamentalnym czynnikiem w regeneracji usług. Istnieje model zawierający kilka zmiennych przedstawiających zasady naprawy błędów oraz wpływ reakcji organizacyjnej i poczucia sprawiedliwości klienta na satysfakcję i ich zachowanie. Są nimi: rekompensata, szybkość reakcji, przeprosiny i inicjacja odzyskiwania. Podjęcie się tych kroków bezpośrednio wpływa na wizerunek organizacji, ponieważ w takiej sytuacji jest ona postrzegana za uczciwą. Wpływają one na postrzeganie sprawiedliwości, co z kolei oddziałuje na zachowanie klientów. Satysfakcja klienta jest oparta na jego ogólnym doświadczeniu zakupowym dóbr i usług na przestrzeni czasu. Brak reakcji ze strony organizacji w momencie złożenia skargi wiąże się z negatywnym jej postrzeganiem ze strony konsumentów. Podjęcie się kroków, takich jak: odzyskiwanie usług, jakość usług, koszt zmiany usług, awaria usług, gwarancja usług i postrzegana wartość usług wpływają na zadowolenie klienta i wydajność całej organizacji.

Warto zwrócić uwagę na lojalność klientów, która ma swój wkład w tworzenie trwałej przewagi konkurencyjnej organizacji. Można ją zdefiniować jako konsekwentny ponowny zakup u tego samego dostawcy w przyszłości. Aby zyskać lojalność klientów, należy zapewnić im poczucie satysfakcji, o której wspomniano wyżej. Istnieje korelacja między odzyskiwaniem usług a lojalnością klienta. Należy mieć jednak na uwadze, że obsługa reklamacyjna nie ma wpływu na lojalność klienta w odróżnieniu do poczucia satysfakcji.

Bardzo ważnym aspektem w funkcjonowaniu jednostki jest zatrzymanie przy sobie klienta. Tak jak już wspomniano, poczucie satysfakcji oraz lojalność klienta wpływają bezpośrednio na retencję konsumenta. Należy również mieć na uwadze, że jakość obsługi reklamacyjnej oraz odzyskiwanie usług także mają istotny wpływ na to, czy dany klient zostanie z daną firmą. Poczucie satysfakcji jest bardzo ważnym aspektem w kontekście retencji klienta oraz obsługi reklamacji w ramach zarządzania relacjami z klientami. Niska jakość usług przekłada się na mniejsze zainteresowanie klientów do pozostania lojalnymi danej firmie. Zadowolenie klientów jest uzależnione od obsługi reklamacji i odzyskiwania usług (Adzhigalieva i in., 2022).

Podsumowanie

Podsumowując, odpowiednie zarządzanie reklamacjami stanowi kluczowy czynnik długotrwałych relacji z klientem. Analiza zapisów normy PN-ISO 10002:2020 potwierdza, że wdrożenie ustandaryzowanych procedur jest niezbędne dla zapewnienia właściwej jakości obsługi, co bezpośrednio przekłada się na satysfakcję i lojalność konsumentów. Rozważania teoretyczne oparte na teorii sprawiedliwości i koncepcji paradoksu

odzyskiwania usług pokazują, że satysfakcja i lojalność klienta nie zależą wyłącznie od procesu reklamacyjnego, ale przede wszystkim od sposobu komunikacji i podejścia do klienta. Pokazano, że skuteczna reakcja na wniesioną skargę potrafi zamienić negatywną percepcję firmy przez klienta na satysfakcję i poczucie sprawiedliwości. Jest to ważne źródło przewagi konkurencyjnej. Efektywne i profesjonalne postępowanie organizacji w procesie reklamacyjnym podnosi jakość obsługi i pozytywny odbiór klienta, co przekłada się na zwiększenie lojalności i pozostanie z organizacją na dłużej.

Summary

In conclusion, effective complaint management is a key factor in building long-term customer relationship. The analysis of the PN-ISO 10002:2020 standard confirms that implementing standardized procedures is essential for ensuring high-quality service, which directly translates into customer satisfaction and loyalty. Theoretical considerations based on justice theory and the service recovery paradox demonstrate that customer satisfaction and loyalty depend not only on the complaint process itself but, more importantly, on the mode of communication and the organization's approach to the customer. It has been shown that an effective response to a filed complaint can transform a client's negative perception into satisfaction and a sense of justice. This constitutes an important source of competitive advantage. Efficient and professional organizational conduct in the complaint process enhances service quality and fosters a positive customer reception, which in turn leads to increased loyalty and long-term customer retention.

Bibliografia

[1] Adzhigalieva Z., Hurriyati R., Hendrayati H. (2022). The Influence of Complaint Handling and Service Recovery on Customer Satisfaction, Customer Loyalty and Customer Retention. *Advances in Economics, Business and Management Research*, 220, 281-285.

[2] Ang L., Buttle F. (2012). Complaints-handling processes and organisational benefits: An ISO 10002-based investigation. *Journal of Marketing Management*, 28(9–10), 1021–1042.

[3] Colquitt J. A. (2001). On the dimensionality of organizational justice: A construct validation of a measure. *Journal of Applied Psychology*, 86(3), 386–400.

[4] de Matos C. A., Henrique J. L., Rossi C. A. V. (2007). Service recovery paradox: A meta-analysis. *Journal of Service Research*, 10(1), 60–77.

[5] PN-ISO 10002:2020 Zarządzanie jakością - Zadowolenie klienta - Wytyczne dotyczące postępowania z reklamacjami w organizacjach.

[6] King-Hill S. (2015). Critical analysis of Maslow's hierarchy of need. *The Journal of Student Research*, 4, 54-57.

[7] Nuansi P., Ngamcharoenmongkol P. (2021). Proactive Complaint Management: Effects of Customer Voice Initiation on Perceived Justices, Satisfaction, and Negative Word-of-Mouth. *SAGE Open*, 11(3), 1–15.

Netografia

[8] Barrow M., Maslow's hierarchy of needs: A marketing perspective, https://www.onlinevisibilityacademy.com/maslows-hierarchy-of-needs-a-marketing-perspective/ (data dostępu 17.05.2026).

Aleksandra Kurzyna

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

WYBRANE METODY POMIARU SATYSFAKCJI KLIENTA JAKO KLUCZOWY ELEMENT DOSKONALENIA JAKOŚCI USŁUG NA PRZYKŁADZIE POLSKIEJ BRANŻY E-COMMERCE

SELECTED CUSTOMER SATISFACTION MEASUREMENT METHODS AS A KEY ELEMENT OF SERVICE QUALITY IMPROVEMENT: THE CASE OF THE POLISH E-COMMERCE SECTOR

Streszczenie

W artykule poddano analizie wybrane metody pomiaru satysfakcji klienta i wskazano ich rolę w doskonaleniu jakości usług w sektorze e-commerce. W przeglądzie literatury skoncentrowano się na zarządzaniu doświadczeniem klienta oraz narzędziach analitycznych (NPS, CSAT, CES, E-SERVQUAL). Studium przypadku platformy Allegro ukazuje praktyczne zastosowanie tych metod. Wykazano, że sukces platformy jest efektem integracji systemu ocen potransakcyjnych z procesami logistycznymi (Allegro Smart!) oraz systemem oceny sprzedawców (program „Super Sprzedawca"), co pozwala na bieżące reagowanie na potrzeby rynku i budowanie lojalności.

Abstract

This thesis analyzes selected customer satisfaction measurement methods and their role in improving e-commerce service quality. The literature review focuses on Customer Experience management and analytical tools (NPS, CSAT, CES, E-SERVQUAL). A case study of the Allegro platform illustrates the practical application of these methods. The

study shows that platform's success relies on integrating post-transaction rating systems with logistics (Allegro Smart!) and merchant evaluation systems (the "Super Sprzedawca" program), enabling rapid response to market needs and building loyalty.

Wstęp

E-commerce, czyli handel elektroniczny jest definiowany przez Philipa Kotlera jako pojęcie oznaczające procesy kupna i sprzedaży, które są wspierane lub obsługiwane za pomocą środków elektronicznych (Kotler, i in., 2018).

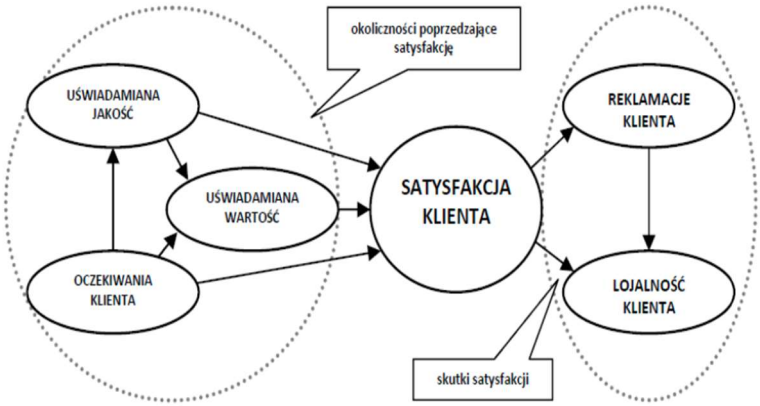
Handel w tej postaci towarzyszy konsumentom już od kilkudziesięciu lat i trwale zmienia to, jak wygląda światowa gospodarka. W Polsce jednak, początki e-commerce datuje się na przełom XX i XXI wieku. To właśnie w latach dziewięćdziesiątych XX wieku powstał sklep internetowy Komputronik, księgarnia internetowa Merlin.pl czy serwis aukcyjny Allegro. Od tego czasu polski rynek e-commerce przeszedł niewyobrażalną transformację. Teraz jest jednym z głównych filarów handlu detalicznego. Droga ta została drastycznie przyspieszona przez pandemię COVID-19. Zgodnie z danymi zaprezentowanymi w najnowszym badaniu polskiego rynku internetowego, sektor e-handlu osiągnął etap zaawansowanej dojrzałości. Przy ogólnej liczbie około 30 milionów internautów w kraju, odsetek osób, które kiedykolwiek dokonały zakupów w sieci wynosi 78%. Przekłada się to na potężna grupę blisko 24 milionów e-konsumentów. Pozycjonuje to Polskę jako lidera w regionie Europy Środkowo-Wschodniej. Raport mówi również o tym, że aż 82% internautów wykorzystuje smartfony do zakupów przez internet. Wskazuje to na niezwykle silną mobilność rynku. Wraz z doświadczeniem rosną również wymagania odbiorców, dla których priorytetem stały się bezproblemowość procesu, oszczędność czasu oraz gwarancja bezpieczeństwa. Dobitnie świadczą o tym preferowane przez krajowych nabywców rozwiązania logistyczne i finansowe. W dostawach niepodważalnie królują wygodne automaty paczkowe, natomiast w obszarze płatności góruje rodzimy system BLIK, po który sięga 72% kupujących. Ponadto otoczenie konkurencyjne branży jest stale poddawane transformacjom wynikającym z upowszechniania się sztucznej inteligencji, rozwoju handlu w mediach społecznościowych, a także silnej presji ze strony międzynarodowych gigantów typu marketplace, takich jak Amazon czy AliExpress (Gemius i in., 2025).

Zmieniło się również zachowanie klientów w internecie. Znacznie częściej oczekują oni błyskawicznej i w pełni intuicyjnej realizacji z góry założonego planu zakupowego. W takiej sytuacji przedsiębiorstwa muszą dostosować swoje strategie do zmieniającego się rynku i oczekiwań klientów. Konkurowanie, które opiera się tylko na polityce niskich cen lub szerokiej ofercie produktowej nie przynosi już pożądanych rezultatów. Jak dowodzą analizy rynkowe, powodem przerwania procesu zakupowego może być nawet z pozoru błaha bariera funkcjonalna, jak również skomplikowane i mato czytelne zasady odstąpienia od umowy. W efekcie, głównym rynkowym wyróżnikiem staje się maksymalna przejrzystość procesów operacyjnych oraz zapewnienie najwyższych standardów obsługi w każdym punkcie styku z kupującym. W związku z tym, umiejętność precyzyjnego pomiaru satysfakcji klienta i proaktywnego reagowania na jej spadki staje się dla

współczesnych przedsiębiorstw e-commerce warunkiem koniecznym do przetrwania, zachowania konkurencyjności i budowania trwałej lojalności (Gemius i in., 2025).

Teoretyczne aspekty satysfakcji klienta i jakości usług

Przez złożoną naturę satysfakcji klienta w literaturze można spotkać wiele jej interpretacji. Historyczne fundamenty pod współczesne rozumienie tego zjawiska położył już w 1960 roku T. Levitt. Wskazywał on na bezwzględna konieczność orientacji całego przemysłu na zadowolenie nabywcy. Obecnie satysfakcje najczęściej rozpatruje się jako specyficzna odpowiedź konsumenta na doświadczoną jakość produktu lub usługi (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018). Jak zauważają B. Pawłowska, A. Witkowska i L. Nieżurawski, satysfakcja jest odczuciem wysoce subiektywnym, nierozerwalnie związanym z cechami osobowościowymi każdego nabywcy. Z uwagi na fakt, że każdy konsument posiada odmienne wymagania i w różny sposób postrzega ostateczną wartość rynkową produktów czy usług, sam poziom odczuwanego zadowolenia zawsze będzie się różnił w zależności od jednostki (Nieżurawski, Pawłowska, Witkowska, 2010).



Rys. 1. Mechanizm powstawania satysfakcji klienta
Źródło: Kowalik K, Klimecka-Tatar D. (2018). Model zarządzania jakością usług w kontekście satysfakcji klienta. *Zeszyty Naukowe. Quality. Production. Improvement.*, nr 1(8), s. 35

Współczesne ujęcia teoretyczne satysfakcji podkreślają też, że proces kształtowania się jej ma charakter dualny. Obejmuje zarówno sferę poznawcza, jak również w ogromnej mierze sferę emocjonalną. Ostateczne uczucie satysfakcji to zbiór pozytywnych reakcji, jakich klient doznaje w momencie, gdy rezultat procesu usługowego pomyślnie zaspokoi jego pierwotne potrzeby (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018). W tym miejscu należy zwrócić uwagę na samą koncepcje jakości usług. Stanowi ona fundament budowania satysfakcji. Przez wielowymiarowość pojęcia oraz przez różnorodność samych usług na próżno szukać w literaturze przedmiotu jednej uniwersalnej definicji. W nowoczesnych koncepcjach podkreśla się, że klient jest aktywnym współtwórcą wartości, a sama usługa jest wynikiem

ścisłej współpracy między usługodawcą a konsumentem (Gulc A., 2020). Zależności pomiędzy oczekiwaniami, postrzeganą jakością a ostatecznym zadowoleniem doskonale ilustruje model kształtowania się satysfakcji klienta (zob. Rysunek 1) (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018).Zgodnie z zaprezentowanym modelem, satysfakcja klienta jest wynikiem konfrontacji początkowych wymagań klienta z faktycznymi doświadczeniami i uświadomioną wartością. Satysfakcja ma znaczenie rynkowe. Pozytywna weryfikacja prowadzi do budowania lojalności, natomiast negatywna generuje niezadowolenie, które często ukazuje się w postaci skarg i reklamacji (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018).

Zrozumienie tego mechanizmu jest szczególnie istotne z perspektywy handlu elektronicznego, który jak wspomniano wcześniej ewoluuje w niezwykle szybkim tempie. W tym środowisku konsument weryfikuje jakość usługi przede wszystkim przez pryzmat oszczędności czasu, całodobowej dostępności oferty (czynnik ten wskazuje 73% badanych) oraz szeroko pojętej wygody (74% wskazań). Brak namacalnego kontaktu z produktem sprawia, że ostateczna satysfakcja jest silnie uzależniona od obsługi logistycznej i pozakupowej. Najważniejszymi barierami są wysokie koszty oraz długi czas oczekiwania na dostawę. Natomiast zaufanie najsilniej buduje jasna informacja o możliwości dokonania zwrotu i reklamacji (Gemius i in., 2025).

Dbałość o te punkty styku pozwala e-przedsiębiorstwom skutecznie kreować uświadomioną jakość. Aby móc w pełni zarządzać tym procesem, organizacje muszą sięgnąć po konkretne narzędzia analityczne i metody pomiaru satysfakcji.

Przegląd wybranych metod i narzędzi pomiaru satysfakcji

Przedsiębiorstwa, które działają w branży e-commerce muszą być świadome tego, że zdobycie nowego klienta może okazać się znacznie droższe niż utrzymanie klienta już istniejącego. Co więcej, niezadowolony konsument dzieli się swoimi negatywnymi doświadczeniami częściej niż klient usatysfakcjonowany, a dzięki mediom społecznościowym jego opinia może dotrze do szerokiego grona odbiorców. Z tego powodu ciągłe kontrolowanie głosu klienta jest fundamentem strategii rynkowej (Koronowicz, 2026).

Skuteczny pomiar satysfakcji klienta wymaga doboru odpowiednich metod. W literaturze przedmiotu wyróżnia się metody bezpośrednie i pośrednie. Metody pośrednie omijają subiektywne opinie nabywców, skupiając się na mierzeniu rynkowych wyznaczników ich zachowań takich jak analiza trendów sprzedaży czy trendy udziału w rynku. Choć są one przydatne analitycznie, uważa się je za mniej efektywne w badaniu samej satysfakcji. Wynika to z faktu, że pokazują one jedynie suche fakty rynkowe. Nie obrazują one żadnych emocji, które odczuwa klient. Z tego względu znacznie lepszym miernikiem sytuacji rynkowej są metody bezpośrednie, które pozwalają na dokonanie rzeczywistego pomiaru percepcji klienta oraz wskazują, na ile przedsiębiorstwo dostarcza pożądaną przez niego wartość (Giemza, 2011).

W handlu elektronicznym najpopularniejsza forma z tej grupy są badania elektroniczne (CAWI), które są realizowane za pomocą ankiet online. Konstruując takie ankiety, dąży się do jak najmniejszej liczby pytań, ponieważ im krótsza jest ankieta, tym wyższy współczynnik uzupełnień udaje się osiągnąć. Dynamika handlu elektronicznego

wymusza na przedsiębiorstwach stosowanie zwięzłych i transakcyjnych miar satysfakcji oraz lojalności. Do najważniejszych metod, które są wykorzystywane w tym obszarze należą (Koronowicz K., 2026):

- CSAT (Customer Satisfaction Score): procentowy wskaźnik (od 0 do 100%) określający poziom ogólnego zadowolenia klienta z produktu lub usługi. Opiera się najczęściej na jednym pytaniu (np. „Jaka jest Twoja ocena satysfakcji?"), na które respondent odpowiada przy użyciu 5-stopniowej (lub 10-stopniowej) skali Likerta lub symboli graficznych (np. gwiazdek). Wynik oblicza się, dzieląc liczbę zadowolonych klientów przez sumę wszystkich odpowiedzi. Aby badanie pozwalało na skuteczne śledzenie trendów, powinno być prowadzone regularnie.
- CES (Customer Effort Score): wskaźnik określający poziom wysiłku, jaki klient musiał włożyć w osiągniecie swojego celu (np. sfinalizowanie zakupu lub proces reklamacji). Opiera się na pytaniu o stopień łatwości danej interakcji (np. „Jak łatwe było rozwiązanie problemu?"). Wynik wylicza się na podstawie różnicy między odpowiedziami z przeciwnych biegunów skali (np. odjecie odsetka ocen 4-5 od odsetka ocen 1-2). Mimo, że wskaźnik ten jest niezwykle użyteczny w monitorowaniu bieżących interakcji, nie pozwala na ocenę ogólnej lojalności wobec marki ze względu na ścisłą koncentrację na pojedynczych procesach.
- NPS (Net Promoter Score): jest używany do pomiaru długofalowej lojalności klientów na przestrzeni czasu. Wskaźnik ten opiera się na zadaniu pytania o skłonność do polecenia firmy znajomym. Odpowiedzi zbierane są w skali od 0 do 10. Wyniki pozwalają na posegregowanie klientów na trzy segmenty: promotorów oceniających firmę bardzo pozytywnie (noty 9-10), klientów bez wyraźnego entuzjazmu, jeśli chodzi o ocenę firmy (noty 7-8) oraz klientów oceniających firmę źle (noty 0-6). Umożliwia to kierowanie do określonych grup dedykowanych działań marketingowych.

O ile omówione powyżej metody doskonale sprawdzają się jako szybkie wskaźniki bieżących nastrojów konsumenckich, o tyle raczej nie pozwalają na głębsze analizy ewentualnego niezadowolenia. Kiedy przedsiębiorstwo e-commerce potrzebuje bardziej precyzyjnej analizy, zaleca się sięgniecie po bardziej rozbudowane modele, takie jak SERVQUAL czy jego cyfrowe rozwinięcie E-SERVQUAL. Klasyczna metoda SERVQUAL opiera się na koncepcji pięciu luk jakości, ze szczególnym uwzględnieniem luki 5. Mówi ona o różnicy pomiędzy oczekiwaniami klienta a jego faktycznym postrzeganiem otrzymanej usługi. Badanie to tradycyjnie weryfikuje jakość w pięciu wymiarach: materialność, niezawodność, pewność, empatia oraz zdolność reagowania (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2019).

Aby sprostać wyzwaniom stawianym przez współczesny e-commerce, tradycyjny model SERVQUAL uległ ewolucji i dał początek metodzie E-SERVQUAL. Model ten, który jest dedykowany rynkowi wirtualnemu mierzy jakość za pomocą siedmiu wyodrębnionych wymiarów. Obejmują one (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2019):

1) wydajność (efficiency): stopień łatwości i intuicyjności nawigacji, pozwalający klientowi na szybkie dotarcie do witryny/aplikacji oraz sprawne odnalezienie pożądanych informacji i produktów.

2) realizacja (fulfillment): rzetelność e-sklepu w zakresie zgodności wirtualnej oferty ze stanem faktycznym, a także gwarancja dostępności asortymentu i terminowej dostawy zamówienia.
3) niezawodność (reliability/ system availability): techniczna stabilność i bezawaryjność platformy sprzedażowej, warunkująca płynne przejście przez cały proces zakupowy.
4) prywatność (privacy): niezawodność procedur i zabezpieczeń gwarantujących ścisłą ochronę danych osobowych oraz transakcyjnych udostępnianych przez konsumenta.
5) odpowiedzialność (responsiveness): gotowość personelu do sprawnego reagowania na zapytania, udzielania bieżącej pomocy w rozwiazywaniu problemów oraz obsługi zwrotów.
6) zwrot (compensation): bezproblemowość procesu zwrotu towaru lub uzyskania rekompensaty.
7) kontakt (contact): dostępność i łatwość nawiązania komunikacji z personelem obsługi klienta.

Metoda E-SERVQUAL znajduje najszersze zastosowanie w sektorze e-commerce. W tej branży wirtualny proces zakupowy nierozerwalnie łączy się z fizyczną dostawa produktu, a jakość usług łączona jest bezpośrednio z poziomem obsługi klienta online. W literaturze przedmiotu wymienia się wiele korzyści dla przedsiębiorstw płynących z implementacji tego modelu. Przede wszystkim, narzędzie to umożliwia precyzyjne zidentyfikowanie opinii nabywców o poszczególnych wymiarach jakości. Systematyczne doskonalenie tych ocenianych parametrów bezpośrednio określa ostateczny poziom satysfakcji klienta. Ponadto na wysoce nasyconym rynku internetowym ponadprzeciętna jakość obsługi online pozwala na budowanie silnej przewagi konkurencyjnej, stając się jednym z najskuteczniejszych wyróżników marki. Niezwykle istotna jest również adaptacja do potrzeb klienta. Cykliczne pomiary umożliwiają trafne rozpoznanie preferencji konsumentów i szybkie reagowanie na ich dynamicznie zmieniające się oczekiwania. Uzyskane w ten sposób rzetelne dane z badań opinii stanowią nieocenione wsparcie strategii marketingowej. Tworzą solidny fundament do wyznaczania długoterminowych celów i optymalizacji procesów biznesowych przedsiębiorstwa (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2019).

W celu usystematyzowania wiedzy na temat zaprezentowanych narzędzi, w tabeli 1 dokonano porównania najpopularniejszych metod pomiaru satysfakcji i jakości pod kątem ich skali, konstrukcji oraz optymalnego zastosowania rynkowego.

Tabela 1. Porównanie wybranych metod badania satysfakcji i jakości usług

Metoda	Kryterium pomiaru	Zastosowana skala	Liczba pytań	Najlepsze zastosowanie rynkowe
CSAT	Bieżące spełnienie oczekiwań klienta wobec produktu/usługi.	5-stopniowa lub 10-stopniowa skala Liktera lub symbole	Zazwyczaj 1 pytanie.	Badanie natychmiast po kontakcie z firmą lub obsłudze zgłoszenia.

		graficzne. Wynik w %.		
CES	Poziom wysiłku i zaangażowania klienta podczas transakcji.	Skala oceniająca stopień łatwości (od „bardzo trudno” do „bardzo łatwo”).	1 pytanie.	Pomiar realizowany tuż po dokonanym zakupie lub finalizacji procesu.
NPS	Długofalowa lojalność i skłonność do polecenia marki.	Skala numeryczna 0-10.	1 kluczowe pytanie.	Cykl regularnego badania kondycji relacji z klientem w czasie.
E-SERVQUAL	Bada jakość usług w środowisku wirtualnym na podstawie 7 wymiarów.	Skala Liktera (zazwyczaj 1-7).	Rozbudowany kwestionariusz (w oparciu o 7 wymiarów e-commerce).	Diagnoza procesów zakupowych online i obsługi posprzedażowej.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie Kowalik i Klimecka-Tatar, 2019, s.110-112 oraz Koronowicz K., 2026 (dostęp 17.05.2026).

Praktyczne zastosowanie metod badania satysfakcji konsumentów na przykładzie platformy Allegro

Jak wspomniano wcześniej, współczesny rynek handlu elektronicznego dawno przestał opierać się wyłącznie na konkurowaniu cena. Z perspektywy konsumenta równie istotny, a niejednokrotnie ważniejszy, stał się szeroko pojęty Customer Experience. Jest to suma wszystkich doświadczeń i interakcji na linii klient-przedsiębiorstwo. Ostateczna satysfakcja nabywcy w e-commerce to wypadkowa wielu zmiennych. Są nimi na przykład: intuicyjność interfejsu, rzetelność opisów, dostępność kanałów kontaktu, ale też jakość i szybkość procesów logistycznych (Winnicki, 2022).

Praktyka rynkowa pokazuje, że do najważniejszych czynników budujących lojalność klienta i zachęcających go do ponownych zakupów należą: gwarancja darmowej lub ekspresowej dostawy, personalizacja oferty oraz transparentna polityka zwrotów. Z kolei do głównych barier, które drastycznie obniżają poziom satysfakcji zalicza się nadmierną automatyzację i bezosobowość obsługi, przymus rejestracji konta przed transakcją oraz ukryte lub wysokie koszty wysyłki. Zrozumienie tych mechanizmów jest dla platform sprzedażowych bardzo ważne. W Internecie negatywne opinie docierają do znacznie szerszego grona odbiorców. Usatysfakcjonowany klient zazwyczaj poleci sklep zaledwie kilku znajomym, podczas gdy klient niezadowolony opowie o swoim złym doświadczeniu kilkunastu osobom. W dzisiejszych realiach e-commerce i powszechnych systemów opinii, taki mechanizm może trwale zaszkodzić reputacji marki. Z tego względu platformy e-commerce stosują ankiety, dzięki którym pozyskują informacje zwrotne po zakończeniu zamówienia. Krytyczne uwagi konsumentów są uważane za cenny materiał analityczny, który stanowi podstawę do ciągłego doskonalenia jakości usług (Winnicki, 2022).

Doskonałym przykładem, w którym zidentyfikowano wspomniane bariery zakupowe i na bazie systematycznych pomiarów satysfakcji przekształcono je w przewagę konkurencyjną jest polska platforma Allegro. Jak wskazują badania rynkowe, Allegro utrzymuje pozycje lidera w zakresie obsługi klienta w polskim e-commerce. Allegro osiągnęło wskaźnik lojalności NPS na poziomie 70 punktów, pozostawiając w tyle konkurencję. Zgromadzone dane dowodzą, że decydującym czynnikiem pozytywnego doświadczenia zakupowego na polskim rynku jest niezawodność, szybkość oraz przewidywalność logistyki. W cyklicznych badaniach wykonywanych przez platformę, średnia ocena satysfakcji z samego procesu dostaw osiąga rekordowy poziom NPS wynoszący aż 89 punktów. Odpowiadając na wskazane potrzeby konsumentów, w tym zgłaszane bariery w postaci wysokich kosztów wysyłki, Allegro wprowadziło program Allegro Smart!. W ten sposób Allegro zagwarantowało darmową dostawę i bezproblemowe zwroty. Dodatkowo usługa ta, stała się najpopularniejszym tego typu mechanizmem w kraju. Dalsza optymalizacja jakości obsługi doprowadziła do uruchomienia usługi Allegro Delivery. Poprzez przejecie pełnej odpowiedzialności za łańcuch dostaw, platforma standaryzuje doświadczenia klientów, zapewniając sprawną obsługę reklamacji oraz wsparcie dedykowanego zespołu. Przełożyło się to na wysoki wynik NPS na poziomie 84 punktów po zaledwie dziewięciu miesiącach funkcjonowania usługi (Polska Agencja Prasowa, 2025).

Zarzadzanie satysfakcją na platformie Allegro opiera się na stałym monitoringu. Konsumenci mają możliwość oceny samej infrastruktury platformy za pomocą ankiet online. Jednak Allegro umożliwia również bezpośrednie ocenienie sprzedawców przez klientów za pomocą gwiazdek i komentarzy. Klienci mają również możliwość ocenienia konkretnych produktów, co często ułatwia innym nabywcom podejmowanie decyzji zakupowych (Allegro, 2020).

Ważnym programem, który bierze udział w zarządzaniu jakością na platformie Allegro jest program "Super Sprzedawca". Program ten weryfikuje jakość sprzedaży sprzedawców. Mechanizm ten opiera się na systemie punktowym, który w cyklu dobowym ocenia e-sklepy w kilkunastu zasadniczych obszarach. Do wymagań należą między innymi trzymanie wysokiej średniej ocen transakcyjnych, punktualność w obsłudze zamówień, dbałość w obsłudze klienta czy stosowanie się do regulaminu platformy Allegro. System ten ma to do siebie, że sprzedawcy, którzy przestają spełniać określone wymogi tracą status Super Sprzedawcy. Wiarygodni i profesjonalni sprzedawcy nagradzani są lepszym pozycjonowaniem ofert oraz możliwością włączenia darmowych dostaw. Dzięki temu ryzyko zakupowe obniża się, a jednocześnie buduje się trwałą lojalność konsumentów w tym ekosystemie (Jarząbek, 2025).

Podsumowanie

Współczesny e-commerce wymaga od przedsiębiorstw odejścia od samej konkurencji cenowej na rzecz zarządzania jakością i wygodą zakupów. Wskaźniki takie jak NPS, CSAT oraz model E-SERVQUAL stanowią główne narzędzia weryfikacji oczekiwań cyfrowych nabywców. Przykład Allegro udowadnia, że regularny pomiar opinii przekłada się na rzeczywiste optymalizacje procesów. Wdrożenie programów logistycznych (Allegro

Smart!) oraz oparty na ocenach system weryfikacji sprzedawców Super Sprzedawca pokazują, jak teoria znajduje zastosowanie w praktyce. Systematyczne badanie satysfakcji i szybka adaptacja do uzyskanych wyników to teraz najskuteczniejsza strategia budowania lojalności i przewagi konkurencyjnej w handlu elektronicznym.

Summary

Modern e-commerce requires companies to shift from price-only competition toward managing quality and shopping convenience. Metrics such as NPS, CSAT, and the E-SERVQUAL model are the main tools for verifying the expectations of digital buyers. The example of Allegro proves that regular feedback measurement translates into actual process optimizations. The implementation of logistics programs (Allegro Smart!) and the rating-based merchant verification system ("Super Sprzedawca") demonstrate how theory is applied in practice. Systematic satisfaction measurement and rapid adaptation to the results are now the most effective strategy for building loyalty and competitive advantage in e-commerce.

Bibliografia

[1] Giemza M., (2011). Metody określania i pomiaru satysfakcji klienta, [w]: *Funkcjonowanie i doskonalenie systemów zarządzania jakością*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Krakowie, Kraków, s. 116-121.

[2] Gulc A. M., (2020). *Relacyjny model systemu kształtowania jakości usług kurierskich w branży e-commerce*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, s. 53-59.

[3] Kotler Ph., Armstrong G., Saunders J., Wong V., (2002). *Marketing. Podręcznik europejski*, PWE, Warszawa, s. 155.

[4] Kowalik K., Klimecka-Tatar D., (2018). Model zarządzania jakością usług w kontekście satysfakcji klienta. *Zeszyty Naukowe. Quality. Production. Improvement.*, nr 1(8), s. 31-41.

[5] Kowalik K, Klimecka-Tatar D., (2019). E-Servqual jako metoda oceny jakości cyfrowej usługi pocztowej. *Zeszyty Naukowe. Quality. Production. Improvement.*, nr 1(10), s. 109-118.

[6] Nieżurawski L., Pawłowska B., Witkowska J., (2010). *Nowoczesne koncepcje strategii orientacji na klienta*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, s. 78

Netografia

[7] Allegro, (2020). Raport ESG, https://raportesg2020.allegro.pl/ulubione-miejsce/tworzymy-najlepsze-doswiadczenia-zakupowe/ (data dostępu 18.05.2026).

[8] Gemius, Polskie Badania Internetu, IAB Polska, Akademia Leona Koźmińskiego, (2025). *E-commerce w Polsce 2025*, pobrano z https://gemius.com/documents/81/RAPORT_E-COMMERCE_2025.pdf

[9] Jarząbek K., (2025). Jak zostać Super Sprzedawcą na Allegro? https://vinseo.pl/jak-zostac-super-sprzedawca-na-allegro/?srsltid=AfmBOorJuXK59YvL8W6KGPs_mwbtYuImuxB38c6dUcnR3KDmIiOUv9Dg (data dostępu 18.05.2026).

[10] Koronowicz K., (2026). Skuteczne badanie satysfakcji klienta – metody, ankieta i przykłady, https://www.interankiety.pl/blog/badanie-satysfakcji-klienta-metody-przyklady/ (data dostępu 17.05.2026).

Igor Ludwikowski

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

CZYNNIK LUDZKI I DYSFUNKCJE ORGANIZACYJNE ORAZ PATOLOGIE W PODEJŚCIU DO SYSTEMÓW JAKOŚCI

THE HUMAN FACTOR AND ORGANIZATIONAL DYSFUNCTIONS WITH PATHOLOGIES IN THE APPROACH TO QUALITY SYSTEMS

Streszczenie

W artykule podjęto problematykę czynnika ludzkiego jako kluczowego determinantu skuteczności systemów zarządzania jakością. Celem opracowania jest identyfikacja i analiza dysfunkcji organizacyjnych wynikających z niedostatecznego uwzględnienia aspektu ludzkiego w głównych podejściach do zarządzania jakością: systemu ISO 9001, Total Quality Management, modelu EFQM, filozofii Kaizen, Systemie Produkcyjnym Toyoty oraz metodyce Lean. Każde z tych podejść zostało przeanalizowane pod kątem typowych dysfunkcji generowanych przez czynnik ludzki, przy czym zaproponowano rozwiązania zmierzające do humanizacji systemów jakości. Studium przypadków firmy Toyota (kryzys 2009–2010) i Apple (warunki pracy w łańcuchu dostaw) ukazuje, że nawet organizacje uznawane za wzorce jakości strategicznej są podatne na głębokie dysfunkcje wynikające z zaniedbania aspektu ludzkiego. W artykule postulowane jest przejście od jakości jako systemu procedur do jakości jako kultury bezpieczeństwa psychologicznego i przywództwa służebnego.

Abstract

The article addresses the issue of the human factor as a key determinant of the effectiveness of quality management systems. The aim of this paper is to identify and analyze organizational pathologies resulting from insufficient consideration of the human

aspect in the main approaches to quality management: ISO 9001 system, Total Quality Management, the EFQM model, the Kaizen philosophy, the Toyota Production System, and the Lean methodology. Each of these approaches has been analyzed in terms of typical dysfunctions arising from the human factor, with solutions aimed at humanizing quality systems proposed. Case studies of Toyota (the 2009–2010 crisis) and Apple (working conditions in the supply chain) illustrate that even organizations regarded as benchmarks of strategic quality are susceptible to profound pathologies resulting from neglect of the human factor. The article advocates a shift from quality as a system of procedures to quality as a culture of psychological safety and servant leadership.

Wstęp

W literaturze zarządzania jakością przez dziesięciolecia dominowała narracja technologiczna: systemowy optymizm oparty na przekonaniu, że odpowiednio zaprojektowane normy, metodyki i narzędzia zapewnią organizacji pożądany poziom jakości. Tymczasem badania empiryczne konsekwentnie wskazują, że to nie wadliwość procedur, lecz zachowania ludzkie i kultura organizacyjna odpowiadają za zdecydowaną większość niepowodzeń systemów jakości. Deming (1986) szacował, że około 85% problemów jakościowych ma swoje źródło po stronie systemów zarządzania, a system, który nie uwzględnia złożoności natury ludzkiej, jest z definicji systemem wadliwym.

Celem niniejszego artykułu jest analiza głównych podejść do zarządzania jakością tj. ISO 9001, TQM, EFQM, Kaizen, Toyota Production System oraz Lean z perspektywy czynnika ludzkiego oraz identyfikacja typowych dysfunkcji organizacyjnych, jakie w tych systemach się pojawiają. Kluczowym pytaniem badawczym jest: jakie dysfunkcje wynikające z czynnika ludzkiego generują poszczególne podejścia do jakości i jakie rozwiązania umożliwiają ich przezwyciężenie? W artykule proponuje rozwiązania ukierunkowane na budowanie jakości zakorzenionej w kulturze organizacyjnej, a nie tylko w procedurach formalnych.

Czynnik ludzki w zarządzaniu jakością

Fundamentalnym rozróżnieniem dla zrozumienia roli czynnika ludzkiego w systemach jakości jest dychotomia błędów aktywnych i warunków utajonych zaproponowana przez Reasona (1990). Błędy aktywne to bezpośrednie działania pracownika generujące defekt jakościowy; warunki utajone natomiast to struktury organizacyjne, kulturowe i komunikacyjne, które czynią wystąpienie błędu nieuchronnym. Ta perspektywa, wywodząca się z badań nad katastrofami przemysłowymi, ma bezpośrednie zastosowanie w zarządzaniu jakością: systemy jakości skupiają się niemal wyłącznie na eliminacji błędów aktywnych, całkowicie pomijając warunki utajone, a to właśnie te drugie odpowiadają za najbardziej kosztowne awarie systemowe. Komplementarną perspektywą jest koncepcja bezpieczeństwa psychologicznego Edmondson (1999), definiowanego jako zbiorowe przekonanie członków zespołu o braku ryzyka interpersonalnego związanego z wyrażaniem opinii, zadawaniem pytań i ujawnianiem błędów. W badaniach przeprowadzonych w szpitalach i firmach technologicznych Edmondson wykazała

paradoks systemów jakości opartych na strachu: organizacje bez bezpieczeństwa psychologicznego mają mniej zgłoszonych błędów. Rzeczywiste problemy jakościowe pozostają wówczas ukryte, narastają i prowadzą do poważnych kryzysów systemowych, zamiast być wcześnie identyfikowane i eliminowane. Schein (2010) wskazuje, że kultura organizacyjna kształtuje zachowania pracownicze na poziomie głębszym niż jakiekolwiek procedury formalne. Model Scheina wyróżnia trzy poziomy kultury: artefakty (widoczne procedury i zachowania), deklarowane wartości (polityki jakości, misje) oraz podstawowe założenia: nieświadome przekonania o władzy, błędzie i współpracy, faktycznie kierujące działaniami. Systemy zarządzania jakością operują zazwyczaj wyłącznie na poziomie artefaktów i deklarowanych wartości, nie dotykając podstawowych założeń kulturowych, co czyni je podatnymi na trwałe dysfunkcje organizacyjne. Wśród najczęstszych patologii wynikających z czynnika ludzkiego w systemach jakości można wyróżnić: formalne wypełnianie procedur bez zaangażowania (jakość teatralną), instrumentalne podejście do certyfikacji i nagród (certifikatoza), kulturę obwiniania pracowników za błędy systemowe, blokowanie uczenia się organizacyjnego przez lęk przed ujawnianiem problemów oraz wypalenie zawodowe wynikające z permanentnej presji na doskonalenie. Tabela 1 systematyzuje te patologie w podziale na poszczególne podejścia do zarządzania jakością.

Tabela 1. Typologia patologii czynnika ludzkiego w systemach zarządzania jakością

Metodyka	Główna dysfunkcja/patologia	Mechanizm dysfunkcji	Propozycja rozwiązania
ISO 9001	Certifikatoza	Certyfikat jako cel; procedury bez treści	Integracja norm z kulturą org.; zaangażowanie kierownictwa
TQM	Zarządczy performatyzm	Deklaracje bez zmiany zachowań kierownictwa	Przywództwo służebne; realna autonomia pracownicza
EFQM	Polowanie na trofea	Maksymalizacja punktacji kosztem realnego doskonalenia	Samoocena oparta na analizie przyczyn źródłowych
Kaizen	Paradoks doskonalenia	Doskonalenie = zagrożenie zatrudnienia → cynizm i opór	Gwarancja bezpieczeństwa zatrudnienia; Kaizen jako realokacja
TPS / Andon	Lęk przed sygnalizacją	Brak bezpieczeństwa psychologicznego blokuje narzędzie	Kultura no-blame; oddzielenie błędu od sankcji
Lean	Dehumanizacja optymalizacji	Człowiek jako źródło marnotrawstwa do wyeliminowania	Lean zorientowany na człowieka; bezpieczeństwo psych.

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Reason (1990), Edmondson (1999), Schein (2010).

Dysfunkcje w koncepcjach ISO 9001 i TQM

Wdrożenie systemu zarządzania jakością zgodnego z wymaganiami aktualnej wersji normy ISO 9001 jest jednym z najszerzej stosowanych podejść do formalizacji jakości na świecie. Norma ta, oparta na cyklu PDCA i podejściu procesowym, dostarcza organizacjom przejrzystych ram zarządzania pod warunkiem autentycznego zaangażowania kierownictwa oraz traktowania systemu jako rzeczywistego narzędzia doskonalenia, a nie obowiązku certyfikacyjnego (Juran, 1988; PN-EN ISO 9001:2015). Jednak w praktyce wdrożenia ISO regularnie generują dysfunkcję określaną jako certifikatoza: dążenie do uzyskania certyfikatu staje się celem samym w sobie, oderwanym od faktycznej poprawy jakości procesów. Power (1997) opisuje ten mechanizm jako rytualizację weryfikacji audyty przekształcają się w spektakle zgodności, w których pracownicy uczą się odpowiadać poprawnie na pytania audytorskie, nie rozwiązując realnych problemów jakościowych. Dokumentacja jest wówczas aktualizowana wyłącznie przed audytem, a organizacja funkcjonuje równolegle w dwóch rzeczywistościach: formalnej dla auditora, i nieformalnej dla siebie. Certifikatoza rodzi trzy wymierne dysfunkcje po stronie czynnika ludzkiego. Po pierwsze, pracownicy tracą poczucie sensu dokumentowania procesów i postrzegają system jakości jako dodatkowe obciążenie biurokratyczne. Po drugie, odpowiedzialność za jakość zostaje delegowana wyłącznie do wyspecjalizowanego działu, co uniemożliwia budowanie kultury powszechnej odpowiedzialności za jakość w całej organizacji. Po trzecie, klimat audytu generuje lęk i defensywność, które w połączeniu z brakiem bezpieczeństwa psychologicznego skłaniają pracowników do ukrywania problemów zamiast ich transparentnego ujawniania (Edmondson, 1999). Total Quality Management jako filozofia zarządzania angażująca całą organizację w ciągłe doskonalenie, zakłada głęboką transformację kultury organizacyjnej (Deming, 1986). Hackman i Wageman (1995) w empirycznej analizie wdrożeń TQM wskazali, że dominującą przeszkodą jest zarządczy performatyzm: kadra kierownicza formalnie deklaruje zaangażowanie w jakość organizuje szkolenia, opracowuje polityki, inicjuje projekty doskonalenia jednak faktyczne zachowania kierownicze pozostają niezmienione. Senge (1990) opisuje tę patologię jako przesunięcie obciążenia: zamiast rozwiązać głęboki problem strukturalny, organizacja stosuje rozwiązania symptomatyczne dające chwilową ulgę, nie eliminując przyczyn źródłowych. Równoległą patologią TQM jest kulturowy imperializm jego założeń: narzędzie wywodzące się z japońskiej filozofii zarządzania zakłada horyzontalną strukturę władzy i długoterminowy horyzont działania wartości niekompatybilne z hierarchicznym zarządzaniem i krótkoterminową orientacją wynikową. Pracownicy formalnie angażowani bez realnych uprawnień decyzyjnych szybko rozwijają cynizm organizacyjny (Schein, 2010). Model EFQM z kolei systematycznie degeneruje się do polowania na trofea: organizacje maksymalizują punktację w łatwo mierzalnych kategoriach, pomijając obszary wymagające głębokiej pracy kulturowej. Pink (2009) wykazuje, że zewnętrzne systemy ocen i nagród mogą wypierać wewnętrzną motywację pracowników do doskonalenia, zastępując autentyczne zaangażowanie instrumentalną grą o punktację.

Dysfunkcje związane z czynnikiem ludzkim w Kaizen, TPS i Lean

Filozofia Kaizen, definiowana przez Imai (1986) jako ciągłe doskonalenie angażujące każdego pracownika od kierownictwa po osoby na linii produkcyjnej zakłada dobrowolność i inicjatywę oddolną jako warunki konieczne autentyczności usprawnień. W praktyce udomowiony Kaizen, przeniesiony na grunt zachodniej kultury korporacyjnej bez towarzyszącego mu filozoficznego zakorzenienia, ulega degeneracji. Liker (2004) identyfikuje tę patologię jako mechaniczne kopiowanie narzędzi bez rozumienia filozofii: organizacje wdrażają Kaizen jako narzędzie redukcji kosztów, narzucając pracownikom odgórnie zaplanowane usprawnienia pod szyldem inicjatywy oddolnej. Głębszą i bardziej destruktywną dysfunkcją jest paradoks Kaizen. Ciągłe doskonalenie, gdy jest skuteczne, zazwyczaj prowadzi do wzrostu wydajności, co w wielu organizacjach przekłada się bezpośrednio na redukcję zatrudnienia. Pracownicy obserwujący, jak kolejne Kaizen skutkują zwolnieniami kolegów, szybko kojarzą zaangażowanie w doskonalenie z zagrożeniem własnej pracy. Efektem jest cyniczny Kaizen: oficjalny udział w procesach doskonalenia przy jednoczesnym ukrywaniu potencjału usprawnień lub sabotowaniu realnych zmian (Womack i Jones, 1996). Maslach, Schaufeli i Leiter (2001) wskazują, że permanentna presja na doskonalenie bez adekwatnych zasobów, autonomii i poczucia bezpieczeństwa jest klasycznym predyktorem wypalenia zawodowego, które z kolei radykalnie obniża jakość pracy. System Andon jedno z fundamentalnych narzędzi Systemu Produkcyjnego Toyoty umożliwia każdemu pracownikowi zatrzymanie linii produkcyjnej w przypadku wykrycia błędu jakościowego. Jest modelowym przykładem empowermentu pracowniczego: zatrzymanie procesu jest lepsze niż produkcja wadliwego wyrobu (Liker, 2004). Jednak w organizacjach o niewystarczającym poziomie bezpieczeństwa psychologicznego Andon staje się narzędziem ujawniania własnych błędów przed przełożonymi co w obliczu kultury obwiniania prowadzi do jego niestosowania (Edmondson, 1999). Organizacja dysponuje wówczas doskonałym narzędziem systemowym, lecz kultura organizacyjna skutecznie uniemożliwia jego zastosowanie. Metodologia Lean, wywodząca się z TPS i koncentrująca się na systematycznej eliminacji siedmiu kategorii marnotrawstwa (Womack i Jones, 1996), niesie ze sobą specyficzne ryzyko dehumanizacji. W ekstremalnych interpretacjach, gdy Lean jest wdrażany wyłącznie jako narzędzie cięcia kosztów, człowiek staje się kolejnym źródłem marnotrawstwa do optymalizacji jego czas oczekiwania, przerwy, ruchy nieergonomiczne. Organizacje wdrażające Lean bez towarzyszącej kultury bezpieczeństwa psychologicznego generują klimat permanentnego lęku, który paradoksalnie obniża jakość w perspektywie długoterminowej: pracownicy o wysokim poziomie lęku popełniają więcej błędów, mają ograniczone zdolności twórcze i są mniej skłonni do ujawniania problemów (Reason, 1990). Senge (1990) postuluje, że autentyczna organizacja ucząca się to organizacja ciągłego poszerzania zdolności uczenia się jej członków Kaizen i Lean wdrożone bez tego fundamentu pozostają fasadą kulturową.

Studium przypadku: Toyota: kryzys zaufania jako diagnostyka patologii

Toyota, przez dekady uznawana za synonim jakości strategicznej dzięki TPS i filozofii Kaizen, w latach 2009–2010 doświadczyła jednego z największych kryzysów

reputacyjnych w historii motoryzacji. Seria masowych odwołań pojazdów związana z problemem niezamierzonego przyspieszania objęła ponad 9 milionów samochodów na całym świecie, a postępowania regulacyjne i ugody sądowe przyniosły firmie straty przekraczające miliardy dolarów (Cole, 2011). Paradoks kryzysu Toyoty polega na tym, że organizacja dysponowała wszystkimi narzędziami wczesnego wykrycia i eliminacji problemu: systemem Andon, filozofią ciągłego doskonalenia i metodologią 5 Why umożliwiającą dotarcie do przyczyny źródłowej. Jednak czynnik ludzki w postaci głębokiej patologii kulturowej zablokował działanie tych mechanizmów. Cole (2011) wskazuje, że Toyota padła ofiarą własnego sukcesu: szybka globalna ekspansja doprowadziła do rozrzedzenia kultury organizacyjnej w zagranicznych zakładach, gdzie wartości TPS były transmitowane jako techniczne procedury operacyjne, a nie jako filozofia zarządzania wymagająca zakorzenionego w wartościach przywództwa. Liker i Ogden (2011) dokumentują, że inżynierowie i menedżerowie Toyoty znali problem z mechanizmem pedału gazu znacznie wcześniej, niż stał się on publicznie znany. Kombinacja hierarchicznej presji, lęku przed przyznaniem się do wady w firmie utożsamianej globalnie z jakością oraz braku bezpiecznych kanałów eskalacji sprawiła, że informacje te nie dotarły do szczytów decyzyjnych na czas. To klasyczny przykład warunku utajonego w rozumieniu Reasona (1990): patologia jakościowa nie leżała w procedurze, lecz w klimacie organizacyjnym uniemożliwiającym jej właściwe zastosowanie. Kryzys Toyoty ilustruje centralną tezę Scheina (2010): głęboka kultura organizacyjna na poziomie podstawowych założeń jest silniejsza niż jakiekolwiek formalne procedury. Jeśli niejawne założenia organizacji zakładają, że błędy są oznaką słabości i nie mogą być ujawniane przed kierownictwem, żaden system Andon ani żadna procedura jakościowa nie jest w stanie tego zmienić bez fundamentalnej pracy kulturowej. Toyota powoli odbudowywała kulturę bezpieczeństwa psychologicznego, wprowadzając niezależne kanały zgłaszania problemów jakościowych i zmieniając model odpowiedzialności menedżerskiej.

Studium przypadku: Apple: cena jakości emocjonalnej

Apple stanowi wzorcowy przykład organizacji, która przeniosła zarządzanie jakością na poziom emocjonalnego doświadczenia klienta, czyniąc z niej kluczowy wyróżnik strategiczny (Linzmayer, 2004). Holistyczne zarządzanie jakością, obejmujące spójność projektu, produkcji, sprzedaży i obsługi posprzedażowej, buduje wyjątkowo silną lojalność konsumencką. Jednak ten model skrywa głęboką patologię po stronie czynnika ludzkiego w łańcuchu dostaw. W 2010 roku seria czternastu samobójstw pracowników zakładów Foxconn Technology Group w Shenzhen, głównego dostawcy produkcyjnego Apple, zwróciła uwagę globalnej opinii publicznej na warunki pracy w łańcuchu dostaw. Chan, Pun i Selden (2013) w szczegółowych badaniach terenowych wykazali, że istotna część patologii była strukturalnie powiązana z modelem jakości narzucanym przez Apple: ekstremalnie krótkie okna produkcyjne, zerotolerantne podejście do wad jakościowych oraz rotacyjny system zatrudnienia tymczasowego generowały u pracowników niższego szczebla permanentną presję, chroniczny stres i wypalenie zawodowe (Maslach, Schaufeli i Leiter, 2001). Paradoks Apple polega na tym, że jakość emocjonalna produktu, rozumiana jako doskonałe i wzbudzające zachwyt doświadczenie użytkownika, była częściowo

budowana kosztem emocjonalnego i fizycznego dobrostanu pracowników łańcucha dostaw. Model jakości skupiony wyłącznie na końcowym konsumencie systematycznie ignorował czynnik ludzki w całym ekosystemie wartości organizacji. Stanowi to fundamentalne ograniczenie strategicznego zarządzania jakością: jakość strategiczna musi uwzględniać cały łańcuch dostaw, a nie tylko relację z klientem końcowym. Apple stopniowo reagowało na ujawnione patologie. Seria Supplier Responsibility Progress Reports, publikowanych systematycznie od 2012 roku, dokumentuje rozszerzanie audytów warunków pracy u dostawców, ustanawianie limitów nadgodzin, programy edukacyjne dla pracowników fabryk oraz mechanizmy transparentności wynagrodzeń (Apple Inc., 2023). Jest to przykład jak organizacja, po publicznym ujawnieniu patologii czynnika ludzkiego, może integrować dobrostan pracowników łańcucha dostaw jako element strategicznego zarządzania jakością. Model jakości ignorujący czynnik ludzki w dowolnym ogniwie łańcucha wartości jest modelem wewnętrznie sprzecznym i podatnym na kryzys reputacyjny.

Propozycje rozwiązań: jakość uwzględniająca zachowanie człowieka

Analiza patologii czynnika ludzkiego w ISO 9001, TQM, EFQM, Kaizen, TPS i Lean wskazuje na wspólny mianownik większości dysfunkcji: systemowe niedocenienie psychologicznych i kulturowych uwarunkowań zachowań ludzkich w miejscu pracy. Na podstawie przeglądu literatury można zaproponować cztery wzajemnie uzupełniające się filary jakości opartej na człowieku.

1) pierwszym filarem jest bezpieczeństwo psychologiczne jako mierzalny wskaźnik systemu jakości. Edmondson (1999) wykazała, że bezpieczeństwo psychologiczne jest kluczowym predyktorem uczenia się organizacyjnego i jakości pracy zespołowej. Organizacje powinny regularnie mierzyć klimat bezpieczeństwa psychologicznego w zespołach analogicznie do technicznych wskaźników jakościowych i traktować jego niski poziom jako sygnał poważnego ryzyka systemowego,
2) drugim filarem jest przywództwo służebne jako alternatywa dla zarządzania kontrolnego (Greenleaf, 1977). Lider jakości jako mentor i coach usuwający przeszkody w pracy, a nie inspektor egzekwujący procedury, fundamentalnie zmienia kulturową dynamikę systemów jakości. Pink (2009) uzupełnia tę perspektywę psychologiczną: trwała jakość wynika z wewnętrznej motywacji opartej na autonomii, mistrzostwie i poczuciu sensu a nie z zewnętrznych systemów nagród i kar,
3) trzecim filarem jest formalne rozdzielenie doskonalenia od zagrożenia zatrudnieniem. Paradoks cynizmu Kaizen można przezwyciężyć wyłącznie przez jawne, kulturowo zakorzenione zobowiązanie organizacji, że usprawnienia procesowe prowadzą do realokacji kompetencji, a nie redukcji etatów,
4) czwartym filarem jest kultura no-blame: systematyczne traktowanie błędów jako zasobu wiedzy organizacyjnej, a nie jako powodu do sankcji (Reason, 1990). Nonaka i Takeuchi (1995) wskazują, że organizacja autentycznie ucząca się to taka, w której błąd jest zarówno tolerowany, jak i aktywnie analizowany jako źródło

doskonalenia. Tylko takie środowisko umożliwia rzeczywiste działanie narzędzi jakości: od systemu Andon po analizę 5 Why.

Podsumowanie

W artykule wskazano, że główną słabością współczesnych podejść do systemowego zarządzania jakością jest niedocenienie czynnika ludzkiego. W normach ISO serii 9000 realizacja wymagań sprowadza się do certifikatozy, TQM prowadzi do zarządczego performatyzmu, Kaizen do presji doskonalenia realizowanej na niepewności pracowników, a Lean do dehumanizującej optymalizacji zasobów w okolicznościach, gdy funkcjonowaniu tych systemów nie towarzyszy autentyczna praca kulturowa uwzględniająca psychologiczne potrzeby pracowników. Studia przypadków Toyoty i Apple dowodzą, że nawet organizacje uznawane za wzorce jakości strategicznej są podatne na głębokie dysfunkcje wynikające z udziału czynnika ludzkiego: odpowiednio kultury tłumienia negatywnych informacji blokującej działanie mechanizmów TPS oraz transferu kosztów jakości na pracowników łańcucha dostaw ignorującego ich dobrostan. Model jakości realizowany z uwzględnieniem potrzeb pracowników, uwzględniający bezpieczeństwo psychologiczne, przywództwo służebne, rozdzielenie doskonalenia od zagrożenia braku zatrudnienia i kulturze no-blame, stanowi propozycję przezwyciężenia tych ograniczeń. Interesującym kierunkiem dalszych badań jest operacjonalizacja bezpieczeństwa psychologicznego jako mierzalnego wskaźnika w systemach zarządzania jakością np. zgodnych z wymaganiami normy ISO 9001:2015, Stanowiłoby to istotny krok ku integracji czynnika ludzkiego z formalnym zarządzaniem jakością. Odrębnym obszarem wartym eksploracji jest empiryczna weryfikacja zaproponowanego modelu w polskim kontekście kulturowym, w którym hierarchiczne tradycje zarządzania mogą stanowić szczególnie istotną barierę dla osiągania autentycznej jakości.

Summary

The article points out that the main weakness of contemporary approaches to systemic quality management is the underestimation of the human factor. In the ISO 9000 series, meeting requirements is reduced to certification, TQM leads to managerial performatism, Kaizen to pressure for improvement based on employee uncertainty, and Lean to dehumanizing resource optimization when the functioning of these systems is not accompanied by authentic cultural work that addresses the psychological needs of employees. Case studies of Toyota and Apple demonstrate that even organizations considered paragons of strategic quality are susceptible to profound dysfunctions resulting from the involvement of the human factor: a culture of suppressing negative information that blocks the operation of TPS mechanisms, and the transfer of quality costs to supply chain employees that ignores their well-being. A quality model implemented with consideration for employee needs, incorporating psychological safety, servant leadership, separating improvement from the threat of unemployment, and a no-blame culture, offers a way to overcome these limitations. An interesting avenue for further research is the operationalization of psychological safety as a measurable indicator in quality management

systems, for example, those compliant with the requirements of the ISO 9001:2015 standard. This would constitute a significant step towards integrating the human factor with formal quality management. Another area worth exploring is the empirical verification of the proposed model in the Polish cultural context, where hierarchical management traditions can pose a particularly significant barrier to achieving authentic quality.

Bibliografia

[1] Chan, J., Pun, N., Selden, M. (2013). The politics of global production: Apple, Foxconn and China's new working class. New Technology, Work and Employment, 28(2), 100–115.
[2] Cole, R. E. (2011). What really happened to Toyota? MIT Sloan Management Review, 52(4), 29–35.
[3] Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis. MIT Press, Cambridge.
[4] Edmondson, A. C. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. Administrative Science Quarterly, 44(2), 350–383.
[5] Greenleaf, R. K. (1977). Servant Leadership: A Journey into the Nature of Legitimate Power and Greatness. Paulist Press, New York.
[6] Hackman, J. R., Wageman, R. (1995). Total quality management: Empirical, conceptual, and practical issues. Administrative Science Quarterly, 40(2), 309–342.
[7] Imai, M. (1986). Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success. McGraw-Hill, New York.
[8] Juran, J. M. (1988). Juran on Planning for Quality. Free Press, New York.
[9] Liker, J. K. (2004). The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer. McGraw-Hill, New York.
[10] Liker, J. K., Ogden, T. N. (2011). Toyota Under Fire: Lessons for Turning Crisis into Opportunity. McGraw-Hill, New York.
[11] Linzmayer, O. W. (2004). Apple Confidential 2.0: The Definitive History of the World's Most Colorful Company. No Starch Press, San Francisco.
[12] Maslach, C., Schaufeli, W. B., Leiter, M. P. (2001). Job burnout. Annual Review of Psychology, 52, 397–422.
[13] Nonaka, I., Takeuchi, H. (1995). The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation. Oxford University Press, New York.
[14] Pink, D. H. (2009). Drive: The Surprising Truth About What Motivates Us. Riverhead Books, New York.
[15] PN-EN ISO 9001:2015. Systemy zarządzania jakością – Wymagania.
[16] Power, M. (1997). The Audit Society: Rituals of Verification. Oxford University Press, Oxford.
[17] Reason, J. (1990). Human Error. Cambridge University Press, Cambridge.
[18] Schein, E. H. (2010). Organizational Culture and Leadership (4th ed.). Jossey-Bass, San Francisco.
[19] Senge, P. M. (1990). The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization. Doubleday, New York.
[20] Womack, J. P., Jones, D. T. (1996). Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. Simon & Schuster, New York.

Netografia

[21] Apple Inc. (2023). Supplier Responsibility Progress Report 2023. https://www.apple.com/supplier-responsibility/pdf/Apple-Supplier-Responsibility-2023-Progress-Report.pdf (data dostępu: 02.06.2026).

Wiktoria Małecka

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

METODYKA LEAN SIX SIGMA JAKO NARZĘDZIE DOSKONALENIA PROCESÓW W PRZEDSIĘBIORSTWIE PRODUKCYJNYM

LEAN SIX SIGMA METHODOLOGY AS A TOOL FOR PROCESS IMPROVEMENT IN A MANUFACTURING ENTERPRISE

Streszczenie

Lean Six Sigma to nowoczesna koncepcja zarządzania łącząca eliminację marnotrawstwa (Lean Manufacturing) z redukcją zmienności i błędów (Six Sigma). Wykorzystuje ona narzędzia takie jak DMAIC, VSM oraz statystyczną kontrolę procesów, w celu skrócenia cykli produkcyjnych i podnoszenia jakości produktów. Implementacja tej metodyki pozwala na obniżenie kosztów, wzrost zadowolenia klientów oraz budowanie przewagi konkurencyjnej. Kluczowym wyzwaniem pozostaje przełamanie barier kulturowych wśród pracowników oraz zapewnienie rzetelnych danych analitycznych. Synergia tych podejść tworzy podstawy do efektywnego i ciągłego doskonalenia procesów w organizacji.

Abstract

Lean Six Sigma is a modern management concept that integrates waste elimination (Lean Manufacturing) with the reduction of variability and defects (Six Sigma). By utilizing tools such as DMAIC, VSM, and SPC, companies can shorten production cycles, reduce costs, and enhance product quality. The synergy of these methods fosters a sustainable competitive advantage and increases customer satisfaction. A primary challenge in implementing this methodology remains overcoming cultural barriers and

ensuring the availability of reliable analytical data. The synergy of these approaches creates the basis for effective and continuous improvement of processes in the organization.

Wstęp

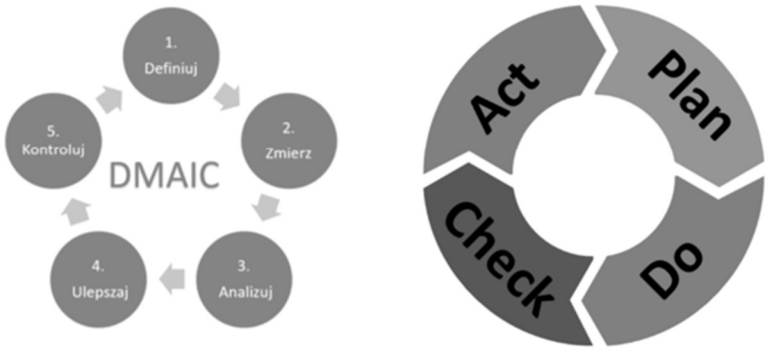
Lean Six Sigma (LSS), potocznie nazywane także terminem Lean Sigma stanowi nowoczesną koncepcję systemu zarządzania jakością. Powstała ona wskutek współpracy przedsiębiorstw General Electric oraz Toyota Motor Manufacturing (Gollinger-Tarajko i Podsiadło 2012, s. 536).

Koncepcja ta wywodzi się z połączenia dwóch metod: Six Sigma i Lean Manufacturing. Pierwsza z nich odnosi się do rygorystycznego sposobu zarządzania organizacjami oraz ciągłym dążeniu do doskonałości. Opiera się na statystyce i technikach podnoszenia jakości, a także efektywności procesów. Pomaga również obniżać koszty oraz skracać czas trwania cykli biznesowych (Ingaldi 2019, s. 119). Jej integralną częścią jest DMAIC – model pięciu etapów, takich jak „definiuj, mierz, analizuj, ulepszaj i kontroluj", które odnoszą się między innymi kolejno do:

- określania roli zespołu w projekcie, a także jego zakresu oraz granic, czy wymagań konsumenta,
- wyboru czynników pomiarowych, które muszą zostać poprawione, a także wprowadzeniu możliwości oceny,
- określeniu przyczyny problemu i jednoczesnemu zrozumieniu jego genezy,
- wykorzystaniu konkretnych technik statystycznych oraz utrzymaniu ulepszeń, jak i również zmniejszeniu występowania defektów,
- utrzymaniu wydajności osiągniętej poprzez usprawnienia oraz zasugerowania planu kontroli i monitorowania powodzenia (Tochwin 2021, s. 35-36).

Z kolei metoda Lean Manufacturing, inaczej nazywana „szczupłym wytwarzaniem" dotyczy wykorzystania jak najmniejszej liczby czynników w trakcie procesu produkcyjnego. Prowadzi ona do zminimalizowania strat, zniwelowania braków produkcyjnych oraz umożliwia dywersyfikację asortymentu. Opiera się na zasadzie ciągłego usprawniania (Horzela i Semrau 2020, s. 37-38). Tak samo jak w przypadku schematu DMAIC, można ją opisać w czterech krokach za pomocą koła PDCA Deminga, które mówi o planowaniu, czyli identyfikacji problemu i analizie sytuacji, wykonywaniu jako wdrożeniu zaplanowanych zmian, by móc skontrolować ich skuteczność, sprawdzaniu, czyli analizie oraz monitorowaniu wyników wdrożenia i działaniu – zaimplementowaniu strategii na szeroką skalę, jeśli wyniki były zadowalające lub też standaryzacji i rozpoczęciu nowego cyklu.

Połączenie obu tych koncepcji pozwala na stworzenie metody, która jest nastawiona na wyeliminowanie błędów, przy jednoczesnym zachowaniu minimalnego poziomu marnotrawstwa i poprawy przepływu pracy. Dzięki syntezie Lean Manufacturing oraz Six Sigma wykreowana została technika skupiona na osiąganiu maksymalnego zadowolenia konsumentów poprzez dostarczanie im produktu finalnego wysokiej jakości, w skróconym czasie oczekiwania.



Rys.1.Porównanie metodyki Six Sigma oraz Lean Manufacturing
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Tochwin 2021, Roser Ch. (2026, 16 kwietnia))

Dodatkowo koncepcja Lean Six Sigma umożliwia sprawne wykluczanie odchyleń, czy podejmowanie decyzji opartych o szczegółowe dane. W konsekwencji metoda ta stanowi źródło wiedzy prowadzenia kompleksowej strategii operacyjnej, nie tylko poprzez możliwość reaktywnego usuwania błędów, ale przede wszystkim dzięki trwałemu doskonaleniu procesów, co jest fundamentem budowania nowoczesnej przewagi konkurencyjnej. W tabeli 1.przedstawiono zestawienie obu omówionych podejść.

Tabela 1. Porównanie charakterystyki metod Lean Manufacturing oraz Six Sigma

Cecha charakterystyczna	Lean Manufacturing	Six Sigma
Główny cel	Eliminacja marnotrawstwa i skrócenie czasu przepływu	Minimalizacja zmienności i eliminacja błędów
Obszar koncentracji	Przepływ procesowy	Parametry statystyczne i techniczne
Główne narzędzia	VSM, 5S, Kanban, SMED, Poka-Yoke	DMAIC, DoE, SPC, MSA, Diagram Ishikawy
Rodzaj oszczędności	Operacyjne, takie jak czas, miejsce i zapasy	Finansowe, takie jak koszty braków, reklamacje. W c
Podejście do problemu	Obserwacja bezpośrednia, intuicja	Analiza statystyczna danych historycznych

Źródło: opracowanie własne na podstawie (https://www.isixsigma.com, (2026, 16 kwietnia))

Analiza informacji przedstawionych w tabeli 1. wykazuje silną synergię obu podejść. W czasie, gdy Lean Manufacturing koncentruje się na „wyszczuplaniu" procesów i eliminacji działań nieprzynoszących wartości, Six Sigma dostarcza potrzebnych metod statystycznych do ustabilizowania tych procesów. Połączenie obu tych koncepcji jest

kluczowe, ponieważ sama redukcja marnotrawstwa bez kontroli zmienności prowadzić by mogła do szybkiej, lecz wadliwej produkcji.

Instrumentarium metodyki Lean Six Sigma w praktyce produkcyjnej

Aby metodyka Lean Six Sigma działała w pełni efektywnie, wykorzystuje ona szerokie spektrum narzędzi analitycznych i operacyjnych, mających na celu wsparcie procesów decyzyjnych i umożliwienie precyzyjnej identyfikacji obszarów, które wymagają optymalizacji.

Analizę instrumentarium warto rozpocząć od technik, które zorientowane są na identyfikację oraz eliminację marnotrawstwa. Są one charakterystyczne dla metodyki Lean Manufacturing, a spośród kluczowych narzędzi w tym obszarze wymienić można metody Mapowania Strumienia Wartości, czyli VSM (Value Stream Mapping), a także system organizacji stanowisk pracy 5S.

Mapowanie Strumienia Wartości to metoda, która służy do analizy systemu produkcyjnego i polega na kompleksowej identyfikacji czynności realizowanych w procesie wytwórczym. Zobrazowanie strumienia wartości pozwala na zrozumienie problemu oraz odnalezienie etapu, na którym występuje marnotrawstwo, by ostatecznie podjąć działania „wyszczuplające". VSM obejmuje zarówno przepływy materiałowe, jak i informacyjne, a jego proces składa się z trzech etapów: diagnozy aktualnego stanu strumienia wartości, wykreowania wizji docelowej oraz planu doskonalenia i wdrażania rozwiązań (Michlowicz i Świątoniowski 2011, s. 345-346).

System organizacji stanowisk pracy 5S, inaczej zwany także Metodą Pięciu Filarów 5S dotyczy z kolei wszelkich procesów, których głównym celem jest podniesienie jakości i produktywności dzięki stosownej organizacji porządku w miejscu pracy.

Metodyka Lean wspierana jest także przez narzędzia takie, jak:

- metoda SMED – są to przede wszystkim działania mające na celu redukcję czasu potrzebnego do przezbrojenia maszyn produkcyjnych. Jest ona kluczowa, aby możliwe było zwiększenie asortymentu, ponieważ umożliwia ona płynne przejście z produkcji jednego wyrobu na inny, wykluczając przy tym możliwość pojawienia się długich przestojów,
- metoda 5W/2H – dotyczy ona pięciokrotnego powtarzania konkretnego pytania „dlaczego?", po których następuje udzielenie odpowiedzi na to „jak rozwiązać istniejący problem?",
- diagram Ishikawy (wykres rybiej kości) – jest to technika pozwalająca na zhierarchizowanie i wizualizację przyczyn powstawania konkretnych problemów. Umożliwia także dokonanie dogłębnej analizy poprzez podział tych przyczyn na sześć dominujących obszarów, takich jak ludzie, maszyny, metody, materiały, pomiary oraz środowisko,
- metoda TPM – celem tej metody jest zachowanie ciągłości pracy maszyn oraz poprawa ich wydajności oraz efektywności. W tym celu korzysta się z dostępnych zasobów ludzkich, aby dokonać analizy obecnych przyczyn marnotrawstwa i

zminimalizować ich wpływ na kształtowanie się procesów produkcyjnych w przedsiębiorstwie (Michlowicz i Świątoniowski 2011, s. 346-347).

Dla zachowania kompleksowości analizy instrumentarium Lean Six Sigma, konieczne jest zwrócenie uwagi na narzędzia, które stanowią istotną rolę w nurcie Six Sigma. Poza wspominanym już wcześniej schemacie DMAIC, do kluczowych metod zalicza się również SPC (Statistical Process Control), DOE (Design of Experiments) oraz MSA (Measurement System Analysis).

W ramach Statystycznego Sterowania Procesem (SPC), ważną funkcję spełnia karta kontrolna. Jest to narzędzie analityczne wykorzystywane do monitorowania procesów produkcyjnych oraz eliminowania błędów powstałych w wyniku działania czynników specjalnych. Dzięki temu możliwe jest sprawne wykrycie przyczyn tych błędów oraz ich eliminacja (Gawąd i Ciechanowski 2005, s.78).

Celem Techniki Planowania Eksperymentów, czyli DoE, jest z kolei dążenie do uzyskania jak najbardziej rzetelnych i wartościowych informacji w jak największej ilości, które dotyczyć będą obiektu badań, przy niskiej ilości doświadczeń (Paprocki 2019, s.65).

MSA to natomiast kompleksowa analiza statystyczna, która służy jako miernik wiarygodności systemów pomiarowych. Najczęściej stosowaną techniką w ramach Measurement System Analysis jest Gage R&R (Repeatability and Reproducibility). Stosuje się ją w celu analizy powtarzalności i odtwarzalności procesów.

Biorąc pod uwagę całość przeprowadzonej analizy powyższego instrumentarium, należy stwierdzić, że metodyka Lean Six Sigma charakteryzuje się szerokim i komplementarnym zestawem narzędzi umożliwiających doskonalenie procesów produkcyjnych na płaszczyźnie wielowymiarowej. Techniki Lean, do których zaliczamy VSM, SMED, metodę 5W i 1H, diagram Ishikawy oraz metodę TPM są to przede wszystkim instrumenty koncentrujące się na udrażnianiu przepływu i jednoczesnej redukcji strat czasowych. Narzędzia Six Sigma, czyli SPC, DOE i MSA gwarantują za to stabilność parametrów jakościowych i mają przede wszystkim charakter techniczny oraz analityczny. Połączenie metod wykorzystywanych w Lean Manufacturing z tymi charakterystycznymi dla Six Sigma sprawia, że proces staje się nie tylko szybszy, ale przede wszystkim bardziej przewidywalny i odporny na powstawanie wad.

Synergia, korzyści oraz wyzwania implementacji Lean Six Sigma w strukturach produkcyjnych

Sprawne funkcjonowanie systemów zarządzania produkcją jest współzależne od umiejętnej integracji poszczególnych metod w ramach spójnej strategii. Metodyki Lean Manufacturing oraz Six Sigma charakteryzują się komplementarnością w zakresie oczekiwanych celów, stąd można wywnioskować, że połączenie narzędzi wykorzystywanych w obu tych koncepcjach przyniesie pozytywny skutek dla przedsiębiorstwa.

Instrumentarium Lean skupia się przede wszystkim na udrażnianiu strumienia wartości, przy jednoczesnej eliminacji marnotrawstwa. Z kolei techniki proponowane w Six Sigma mają za zadanie dostarczanie narzędzi statystycznych oraz stabilizację

procesów. W praktyce oznacza to, że metody takie jak Mapowanie Strumienia wartości mają za zadanie tworzenie fundamentów pod pogłębioną analizę statystyczną, którą wykonuje się przy wykorzystaniu kart kontrolnych SPC, czy systemów pomiarowych MSA. Taka współzależność gwarantuje, że zachowana zostanie ciągłość i efektywność procesów, a także że nie dojdzie do sytuacji, w której przedsiębiorstwo produkuje szybciej, ale z większą ilością błędów lub osiąga wysoką jakość, lecz kosztem wydłużonego czasu realizacji.

Dzięki wdrożeniu metodyki Lean Six Sigma do przedsiębiorstwa, możliwe jest utrzymanie pozytywnych relacji z klientem. Jest to uwarunkowane przede wszystkim zdobyciem wzajemnego zaufania oraz lojalności, co prowadzi do zwiększonego poziomu satysfakcji i zadowolenia obu stron, a także polepszenia wyników finansowych.

Korzyściami wynikającymi z implementacji Lean Six Sigma są także:

- redukcja kosztów złej jakości – wykorzystując narzędzia charakterystyczne dla obu opisywanych koncepcji, przedsiębiorstwo jest w stanie obniżyć wydatki związane z obsługą reklamacji, kosztownym transportem zwrotnym, czy też procesami utylizacji,
- skrócenie czasu przejścia – dotyczy to przede wszystkim możliwości skrócenia czasu potrzebnego na sfinalizowanie cyklu produkcyjnego. Krótszy proces pozwala także na szybszą realizację zamówienia, co może doprowadzić do znaczącej poprawy płynności finansowej przedsiębiorstwa,
- uwolnienie ukrytych mocy przerobowych – dzięki wdrożeniu Lean Six Sigma, możliwe jest odzyskanie istniejącego parku maszynowego bez potrzeby ponoszenia dodatkowych nakładów inwestycyjnych. Wynika to przede wszystkim z odpowiedniej optymalizacji procesów przezbrojeń (SMED) oraz stabilizacji stanowisk pracy (5S),
- wzrost bezpieczeństwa pracy oraz zaangażowania pracowników – implementacja systemu 5S pozwala także na poprawę warunków pracy, poprzez wyznaczenie miejsc dla pracowników oraz minimalizację przetrzymywania niepotrzebnych przedmiotów w obrębie stanowiska, co znacząco redukuje ryzyko pojawiania się wypadków przy pracy. W długim okresie implementacja tej metody pozwala także na zmniejszenie natężenia rotacji pracowników oraz kosztów ponoszonych w wyniku pojawiania się zwolnień lekarskich, a także sprawia, że rośnie zaangażowanie pracowników w dalsze etapy doskonalenia procesów.

Jednak pomimo jasnych przesłanek opowiadających za istnieniem licznych korzyści wynikających z implementacji złożonej metodyki Lean Six Sigma w strukturach produkcyjnych, zwraca się także uwagę na wyzwania, z jakimi wiąże się taki proces wdrożenia.

Jedną z istotnych kwestii wymagających poruszenia jest bariera kulturowa. Przedsiębiorstwa często spotykają się z niechęcią oraz oporem pracowników przed dokonywaniem zmian, które głównie wynikają z błędnego postrzegania narzędzi takich jak standaryzacja pracy. Zatrudnieni uważają bowiem, że metody te mają na celu wprowadzenie nadmiernej kontroli oraz ograniczania autonomii w miejscu pracy. Aby osiągnąć sukces implementacji wcześniej wymienianych narzędzi, kluczowa jest

efektywna komunikacja oraz budowanie świadomości na temat roli Lean Six Sigma jako sposobu na ułatwienie pracy poprzez minimalizację błędów i odchyleń.

Kolejną z barier jest traktowanie metodyki Lean Six Sigma jako jednorazowego zrywu, którego celem jest szybka poprawa wskaźników, podczas gdy głównym założeniem tej koncepcji jest strategiczne, sekwencyjne dążenie do osiągnięcia większej efektywności oraz ciągłe doskonalenie.

Dla przedsiębiorstw działających w dobie przemysłu 4.0. wyzwaniem jest także niedostateczna jakość systemów informatycznych i pomiarowych, z których korzystają pracownicy firmy. Przeprowadzanie analizy przy wykorzystywaniu niekompletnych oraz nierzetelnych danych jest procesem żmudnym i obarczonym dużym ryzykiem błędu ludzkiego. Stąd też aby osiągnąć zadowalające efekty wynikające z implementacji metodyki Lean Six Sigma, konieczne jest połączenie działania nowoczesnych technologii z klasycznym instrumentarium, takim jak karty kontrolne, czy DOE.

Podsumowanie

Wnioski, które płyną z analizy implementacji Lean Six Sigma w strukturach produkcyjnych potwierdzają, że metodyka ta stanowi obecnie jeden z najbardziej efektywnych modeli zarządzania operacyjnego. Pozwala ona na osiągnięcie najwyższego poziomu dojrzałości procesowej, redukcję marnotrawstwa oraz minimalizację zmienności jakościowej. Osiągnięcie synergii pomiędzy szybkością przepływu a precyzją wykonania jest fundamentem nowoczesnej produkcji, jednak wymaga to głębokiej transformacji kultury organizacyjnej oraz determinacji w kwestionowaniu obecnych procesów na rzecz proaktywnego poszukiwania usprawnień.

Summary

The conclusions drawn from the analysis of Lean Six Sigma implementation in production structures confirm that this methodology currently represents one of the most effective models of operational management. It enables organizations to achieve the highest level of process maturity, reduce waste, and minimize quality variability. Achieving synergy between flow efficiency and precision of execution is the foundation of modern manufacturing; however, this requires a profound transformation of organizational culture and a strong commitment to challenging existing processes in favor of proactively seeking continuous improvements.

Bibliografia

[1] Gollinger-Tarajko M., Podsiadło J. (2012), *Lean Six Sigma – metodologia usprawniająca i optymalizująca procesy oraz struktury produkcyjne,* „Praktyka zarządzania jakością w XXI wieku. Pod redakcją Tadeusza Sikory i Mariusza Giemzy", s. 536.

[2] Ingaldi M., (2019), *Wprowadzenie do metody Six Sigma, Quality Production Improvement*, nr 1(10), s. 119.

[3] Tochwin D., (2021), *Zastosowanie metody Six Sigma w celu doskonalenia procesów produkcyjnych*, *Akademia Zarządzania*, nr 5(1), s. 35-36.
[4] Horzela A., Semrau J., K*oncepcja Lean Manufacturing jako narzędzie doskonalenia procesów produkcyjnych*, *I Konferencja Naukowa Forum Inżynierów Przyszłości* s. 37-38. doi:10.37190/FIP2020.
[5] Michlowicz E., Światoniowski A., (2011), *Doskonalenie ciągłości przepływu metodą mapowania VSM*, *Automatyka*, nr 15/2, s. 345-346
[6] Gawąd P., Ciechanowski P., (2005), *Zastosowanie statystycznych technik obliczeniowych SPC i DOE dla poprawy procesów produkcyjnych grupy ABB, ABB Sp. Z o.o. Corporate Research*, s.78.
[7] Paprocki M., (2019), *Współczesne trendy w projektowaniu i zarządzaniu rozwojem wyrobu, Mechanik*, nr 1, s. 65.

Netografia

[8] Roser Ch. (2026, 16 kwietnia) The Key to Lean – Plan, Do, Check, Act!, https://www.allaboutlean.com/pdca.
[9] https://www.isixsigma.com/ (2026, 16 kwietnia).

Magdalena Niewczas-Dobrowolska

Katedra Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

ZARZĄDZANIE KRYZYSOWE W PRZYPADKU BRAKU BEZPIECZEŃSTWA PRODUKTU

CRISIS MANAGEMENT IN THE EVENT OF LACK OF PRODUCT SAFETY

Streszczenie

Celem artykułu jest charakterystyka zarządzania kryzysowego w przypadku braku bezpieczeństwa produktu oraz wskazanie najważniejszych uwarunkowań organizacyjnych, komunikacyjnych i regulacyjnych wpływających na skuteczność reakcji przedsiębiorstwa na kryzys produktowy. W opracowaniu przyjęto założenie, że brak bezpieczeństwa produktu nie powinien być rozpatrywany wyłącznie jako konsekwencja wystąpienia wady fizycznej lub niezgodności wyrobu, lecz jako rezultat szerszych dysfunkcji w systemie zarządzania bezpieczeństwem, obejmujących m.in. niewystarczający nadzór nad procesami, ograniczoną zdolność identyfikacji ryzyka, nieprawidłowości informacyjne oraz opóźnione reagowanie na sygnały zagrożenia. Szczególną uwagę poświęcono wymiarom zarządzania kryzysowego w sytuacji ujawnienia produktu niebezpiecznego, obejmującym wymiar organizacyjny, operacyjno-logistyczny, informacyjno-komunikacyjny, prawno-regulacyjny, reputacyjny i finansowy.

Abstract

The aim of this article is to characterize crisis management in the event of the lack of product safety and to identify the key organizational, communication, and regulatory factors that influence the effectiveness of a company's response to a product crisis. The paper assumes that the lack of product safety should not be considered solely as a consequence of a physical defect or product nonconformity, but rather as a result of broader dysfunctions in the safety management system, including, among others, insufficient process oversight, limited risk identification capacity, informational inaccuracies, and

delayed response to threat signals. Particular attention is paid to the dimensions of crisis management in the event of a dangerous product being discovered, including organizational, operational and logistical, information and communication, legal and regulatory, reputational, and financial dimensions.

Wstęp

Bezpieczeństwo produktu stanowi jedną z podstawowych kategorii współczesnego zarządzania jakością, ryzykiem i odpowiedzialnością przedsiębiorstwa. W ujęciu ogólnym oznacza ono taki stan cech produktu, jego konstrukcji, składu, sposobu użytkowania, oznakowania oraz informacji towarzyszących, który nie powoduje niedopuszczalnego zagrożenia dla zdrowia, życia, mienia lub środowiska w warunkach normalnego oraz racjonalnie przewidywalnego używania. W praktyce bezpieczeństwo produktu nie jest zatem wyłącznie parametrem technicznym, lecz złożonym rezultatem decyzji podejmowanych na etapie projektowania, produkcji, dystrybucji, komunikacji z użytkownikiem oraz nadzoru po wprowadzeniu produktu do obrotu.

Współczesne podejście do bezpieczeństwa produktu ma charakter systemowy. Oznacza to, że bezpieczeństwo nie może być postrzegane wyłącznie jako efekt końcowej kontroli jakości, ale jako element zintegrowanego procesu zarządzania organizacją, obejmującego identyfikację zagrożeń, ocenę ryzyka, projektowanie działań zapobiegawczych, monitorowanie sygnałów z rynku oraz reagowanie na incydenty. W tym sensie bezpieczeństwo produktu jest obszarem przecinającym wiele funkcji przedsiębiorstwa: badania i rozwój, zakupy, produkcję, logistykę, marketing, obsługę klienta, compliance i zarządzanie reputacją.

W literaturze podkreśla się, że produkt staje się źródłem kryzysu nie tylko wtedy, gdy zawiera fizyczną wadę, ale także wtedy, gdy organizacja nie posiada zdolności do rozpoznania i kontrolowania ryzyk związanych z jego funkcjonowaniem. Oznacza to, że brak bezpieczeństwa produktu może wynikać zarówno z nieprawidłowości konstrukcyjnych lub produkcyjnych, jak i z wadliwego systemu zarządzania, obejmującego np. niewłaściwą identyfikowalność partii, niedostateczny nadzór nad dostawcami, niepełne ostrzeżenia dla użytkowników czy opóźnioną reakcję na skargi i reklamacje. Z perspektywy nauk o zarządzaniu kryzys wywołany niebezpiecznym produktem należy więc interpretować nie tylko jako zdarzenie techniczne, lecz jako symptom słabości organizacyjnej (Astvansh, 2020; Liu i wsp., 2025).

Brak bezpieczeństwa produktu jako źródło sytuacji kryzysowej

Brak bezpieczeństwa produktu można określić jako stan, w którym produkt nie spełnia wymagań zapewniających akceptowalny poziom ochrony użytkownika i innych uczestników otoczenia, a jego używanie wiąże się z ryzykiem szkody. Ryzyko to może dotyczyć zarówno bezpośredniego uszczerbku na zdrowiu lub życiu, jak i szkód materialnych, zagrożeń środowiskowych czy naruszeń bezpieczeństwa cyfrowego. We współczesnych warunkach rynkowych zakres pojęcia bezpieczeństwa produktu ulega

poszerzeniu – obejmuje nie tylko cechy materialne wyrobu, ale również bezpieczeństwo funkcji cyfrowych, aktualizacji oprogramowania, interoperacyjności oraz odporności na cyberzagrożenia.

Brak bezpieczeństwa produktu może ujawnić się na różnych etapach cyklu życia wyrobu. W praktyce wyróżnia się kilka podstawowych źródeł zagrożeń. Pierwszą grupę stanowią wady projektowe, wynikające z błędów konstrukcyjnych, nieadekwatnej oceny scenariuszy użytkowania lub nieuwzględnienia przewidywalnych zachowań konsumenta. Drugą grupę tworzą wady produkcyjne i materiałowe, będące konsekwencją niestabilności procesu wytwórczego, zastosowania wadliwych komponentów, błędów montażowych lub niedostatecznej kontroli jakości. Trzeci obszar obejmuje wady informacyjne, a więc niewłaściwe instrukcje, brak ostrzeżeń, nieczytelne oznaczenia lub niepełne dane dotyczące bezpiecznego użytkowania. Coraz większego znaczenia nabierają również ryzyka postrynkowe, ujawniające się dopiero podczas eksploatacji produktu, oraz ryzyka cyfrowe związane z produktami inteligentnymi, połączonymi z aplikacjami lub aktualizowanymi zdalnie.

W sytuacji, gdy produkt stwarza zagrożenie dla konsumenta, przedsiębiorstwo wchodzi w stan podwyższonego ryzyka organizacyjnego. Ujawnienie niebezpiecznego produktu może bowiem skutkować jednocześnie koniecznością wstrzymania sprzedaży, wycofania produktu z obrotu, przeprowadzenia akcji recall, poinformowania organów nadzoru, wypłaty odszkodowań, poniesienia kosztów logistycznych oraz zmierzenia się z utratą zaufania rynku. Kryzys produktowy ma zatem charakter wielowymiarowy. Jest zarazem kryzysem operacyjnym, finansowym, prawnym, komunikacyjnym i reputacyjnym. To właśnie ta wielowymiarowość odróżnia go od zwykłej niezgodności jakościowej.

Pojęcie i specyfika kryzysu produktowego

Kryzys produktowy można zdefiniować jako sytuację zakłócającą funkcjonowanie organizacji, wywołaną ujawnieniem, podejrzeniem lub potwierdzeniem, że produkt oferowany przez przedsiębiorstwo stwarza zagrożenie dla użytkownika lub nie spełnia wymagań bezpieczeństwa. W literaturze anglojęzycznej zjawisko to bywa określane jako *product-harm crisis*, podkreślając, że punktem centralnym kryzysu jest szkoda lub ryzyko szkody powiązane z produktem i przypisywane określonej marce lub producentowi. W odróżnieniu od incydentów wewnętrznych, kryzys produktowy jest silnie osadzony w relacjach z otoczeniem: konsumentami, mediami, organami nadzoru, dystrybutorami, platformami sprzedażowymi oraz partnerami w łańcuchu dostaw. Kryzysy związane ze szkodami produktowymi to złożone sytuacje, w których produkty okazują się wadliwe, niebezpieczne, a nawet niebezpieczne (Dawar i Pillutla, 2000). Siomkos i Kurzbard (1994) definiują kryzys związany ze szkodami produktowymi jako „gwałtowne przerwanie cyklu życia produktu". Kryzysy związane ze szkodami produktowymi, które mogą wybuchnąć z różnych przyczyn (np. zaniedbania producenta, niewłaściwego użytkowania produktu, sabotażu itp.), mogą stanowić poważne zagrożenie dla przetrwania firmy (Vassilikopoulou i wsp., 2009).

Specyfika kryzysu produktowego wynika z kilku cech. Po pierwsze, ma on często charakter dynamiczny – początkowo może opierać się jedynie na sygnałach ostrzegawczych, pojedynczych skargach lub incydentach, by następnie przekształcić się w szeroką sytuację kryzysową obejmującą wiele rynków i interesariuszy. Po drugie, kryzys taki wiąże się z dużą asymetrią informacji. Organizacja zazwyczaj nie dysponuje od razu pełnym obrazem zagrożenia, a jednocześnie musi podejmować decyzje pod presją czasu, niepewności i potencjalnej odpowiedzialności prawnej. Po trzecie, jego skutki wykraczają poza sferę techniczną – wpływają na zaufanie do marki, postrzeganie jakości, wiarygodność menedżerską i relacje z regulatorami. Po czwarte, kryzys produktowy wymaga jednoczesnego prowadzenia działań wewnętrznych i zewnętrznych: analizy technicznej, zabezpieczenia łańcucha dostaw, komunikacji z klientami, współpracy z organami nadzoru oraz wdrażania środków naprawczych.

W tym kontekście kryzys produktowy należy traktować jako szczególny typ kryzysu organizacyjnego, którego osią jest zagrożenie bezpieczeństwa użytkownika, a którego przebieg ujawnia stopień dojrzałości systemu zarządzania bezpieczeństwem produktu. Kryzys nie jest bowiem wyłącznie następstwem pojawienia się wady, ale także rezultatem tego, w jaki sposób organizacja identyfikuje zagrożenie, jak szybko je eskaluje, jaką przyjmuje strategię komunikacyjną oraz jakie działania naprawcze jest w stanie uruchomić.

Zarządzanie kryzysowe – definicje i miejsce w systemie zarządzania bezpieczeństwem produktu

Zarządzanie kryzysowe w organizacji najczęściej definiuje się jako zespół działań ukierunkowanych na zapobieganie sytuacjom kryzysowym, przygotowanie do ich wystąpienia, reagowanie na ich skutki oraz odbudowę zdolności organizacji po ustaniu bezpośredniego zagrożenia. W odniesieniu do bezpieczeństwa produktu zarządzanie kryzysowe można rozumieć jako uporządkowany proces identyfikacji, oceny, ograniczania i komunikowania ryzyka w sytuacji, gdy produkt obecny na rynku stwarza zagrożenie lub istnieje uzasadnione podejrzenie takiego zagrożenia.

W ujęciu funkcjonalnym zarządzanie kryzysowe w obszarze bezpieczeństwa produktu nie powinno być utożsamiane wyłącznie z reakcją na incydent. Jest ono częścią szerszego systemu zarządzania ryzykiem produktowym i obejmuje zarówno działania przedkryzysowe, jak i reaktywne. Oznacza to konieczność projektowania procedur jeszcze przed pojawieniem się problemu: tworzenia planów wycofania produktu, ustalania ścieżek decyzyjnych, zasad eskalacji informacji, sposobów komunikacji z klientami oraz mechanizmów współpracy z organami nadzoru rynku. W tym sensie zarządzanie kryzysowe ma charakter prewencyjno-reakcyjny i powinno być osadzone w strukturach ładu organizacyjnego.

W przedsiębiorstwach dojrzałych organizacyjnie zarządzanie kryzysowe dotyczące produktu jest zintegrowane z systemem jakości, compliance i zarządzania ryzykiem. Obejmuje ono m.in. procedury monitorowania reklamacji, analizę danych posprzedażowych, identyfikowalność produktów, zasady nadzoru nad zmianami projektowymi, audyty dostawców oraz planowanie komunikacji kryzysowej. Taki model

zakłada, że kryzys nie jest zdarzeniem całkowicie zewnętrznym wobec organizacji, lecz przewidywalnym ryzykiem, do którego należy się przygotować poprzez budowę zdolności organizacyjnej.

Fazy zarządzania kryzysowego w przypadku niebezpiecznego produktu

W literaturze przedmiotu zarządzanie kryzysowe jest najczęściej opisywane w układzie fazowym. można wyróżnić 5 etapów: wykrywanie sygnałów, przygotowanie i działania prewencyjne, ograniczenie szkód, powrót do sytuacji sprzed kryzysu i nauka, jaka z tego wypływa (Walas-Trębacz & Ziarko, 2011).

W klasycznych ujęciach zarządzania kryzysowego pierwszym etapem procesu jest rozpoznanie sygnałów ostrzegawczych, czyli identyfikacja oraz właściwa interpretacja symptomów wskazujących na możliwość wystąpienia zjawisk zakłócających funkcjonowanie organizacji. Symptomy te mogą mieć charakter operacyjny, finansowy, organizacyjny lub komunikacyjny i często pojawiają się jeszcze przed pełnym rozwinięciem sytuacji kryzysowej. Ich wczesne dostrzeżenie bywa jednak utrudnione ze względu na złożoność otoczenia oraz wielość procesów zachodzących wewnątrz przedsiębiorstwa. Z tego względu organizacje powinny prowadzić systematyczny monitoring działalności operacyjnej, relacji z interesariuszami oraz mechanizmów zarządczych, aby możliwie wcześnie wychwytywać nieprawidłowości mogące przerodzić się w kryzys.

Drugą fazę stanowi przygotowanie oraz działania prewencyjne, których celem jest zarówno ograniczenie prawdopodobieństwa wystąpienia kryzysu, jak i zwiększenie gotowości organizacji na wypadek jego zaistnienia. Na tym etapie szczególne znaczenie ma tworzenie procedur, planów awaryjnych oraz mechanizmów reagowania, które pozwalają szybko uruchomić działania ochronne. Organizacja przygotowana na kryzys nie ogranicza się do reakcji doraźnej, lecz utrzymuje stałą gotowość poprzez bieżącą analizę procesów, struktur organizacyjnych i potencjalnych obszarów ryzyka. W praktyce oznacza to ciągłe monitorowanie funkcjonowania przedsiębiorstwa oraz podejmowanie działań zapobiegawczych jeszcze przed wystąpieniem otwartego kryzysu.

Trzeci etap obejmuje ograniczanie skutków kryzysu, a więc działania służące powstrzymaniu jego eskalacji oraz ochronie tych obszarów organizacji i jej otoczenia, które nie zostały jeszcze bezpośrednio dotknięte zagrożeniem. Na tym etapie istotne jest szybkie uruchomienie procedur zabezpieczających, tak aby zminimalizować skalę strat oraz zapobiec dalszemu rozprzestrzenianiu się negatywnych konsekwencji. W organizacjach pozbawionych odpowiednich mechanizmów reagowania nawet stosunkowo niewielkie symptomy mogą w krótkim czasie przekształcić się w pełnowymiarowy kryzys, którego skutki obejmują wiele obszarów działalności.

Kolejna faza dotyczy wdrażania programów naprawczych, zarówno o charakterze krótkoterminowym, jak i długofalowym. Ich podstawowym celem jest przywrócenie organizacji zdolności do normalnego funkcjonowania oraz odbudowa ciągłości procesów kluczowych dla jej działalności. Działania naprawcze obejmują zwykle ustalenie minimalnego zakresu operacji niezbędnych do dalszego funkcjonowania przedsiębiorstwa,

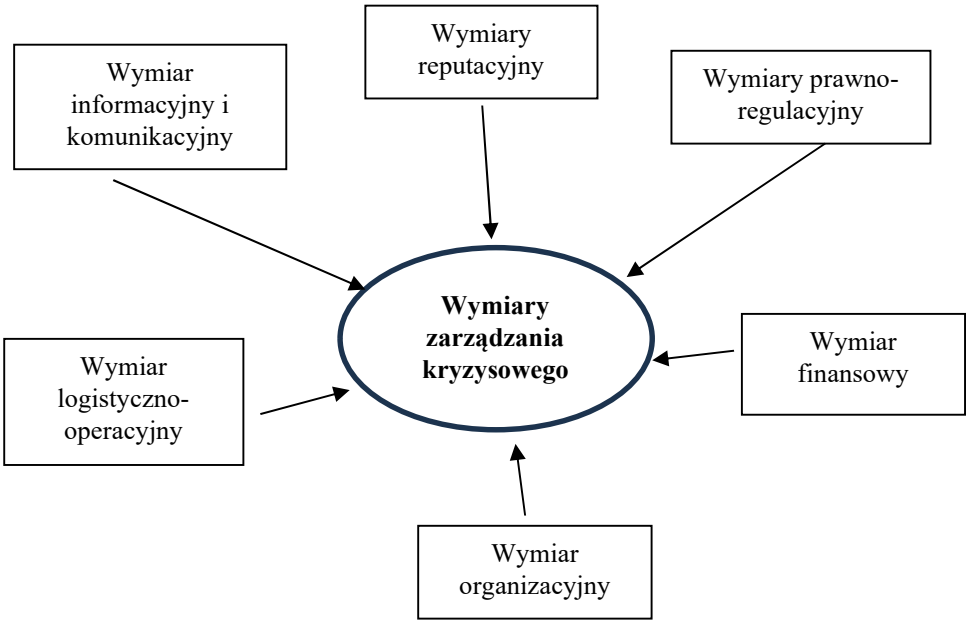
wskazanie najważniejszych zadań i procesów wymagających pilnej realizacji, utrzymanie kontaktu z kluczowymi klientami i partnerami, a także przygotowanie alternatywnych rozwiązań organizacyjnych, w tym miejsc lub sposobów prowadzenia podstawowej działalności.

Ostatnim etapem zarządzania kryzysowego jest uczenie się organizacyjne, polegające na analizie przebiegu kryzysu oraz wyciąganiu wniosków z własnych doświadczeń i doświadczeń innych podmiotów. Etap ten ma szczególne znaczenie dla doskonalenia odporności organizacji, ponieważ umożliwia identyfikację zarówno tych czynników, które wspierały skuteczne radzenie sobie z kryzysem, jak i tych, które utrudniały podejmowanie właściwych decyzji i działań. W literaturze podkreśla się, że proces ten powinien być prowadzony zgodnie z zasadą uczenia się bez poszukiwania winnych, co oznacza koncentrację na usprawnianiu procedur, mechanizmów i struktur, a nie na personalnym przypisywaniu odpowiedzialności za błędy popełnione w trakcie sytuacji kryzysowej.

Kluczowe wymiary zarządzania kryzysowego w przypadku braku bezpieczeństwa produktu

Zdolność przedsiębiorstwa do przezwyciężenia kryzysu pozostaje ściśle związana z efektywnością zarządzania. Zarządzanie w warunkach kryzysowych powinno uwzględniać szczególną dynamikę i niepewność tego rodzaju sytuacji, a zarazem koncentrować się na możliwie wczesnym rozpoznaniu zagrożeń oraz podejmowaniu działań ograniczających eskalację kryzysu (Huczek 2015). Wymiary zarządzania kryzysowego w przypadku braku bezpieczeństwa produktu przedstawiono na rysunku 1.

Pierwszym wymiarem jest wymiar organizacyjny, odnoszący się do zdolności przedsiębiorstwa do rozpoznania zagrożenia, uruchomienia procedur oraz koordynacji działań między działami jakości, produkcji, logistyki i zarządu (Cleeren i wsp., 2008). Drugi stanowi wymiar operacyjno-logistyczny, obejmujący identyfikację wadliwych partii, wstrzymanie sprzedaży, wycofanie produktu z rynku oraz współpracę z dystrybutorami i odbiorcami (Rozporządzenie UE 2023/988). Trzecim jest wymiar informacyjno-komunikacyjny, związany z przekazywaniem informacji o zagrożeniu konsumentom, organom nadzoru, partnerom handlowym i mediom. W tym przypadku komunikacja pełni zarówno funkcję ochronną, jak i reputacyjną (Olson, 2014).



Rys. 1. Wymiary zarządzania kryzysowego
Źródło: opracowanie własne.

Kolejny obszar to wymiar prawno-regulacyjny, obejmujący obowiązki przedsiębiorcy wynikające z przepisów bezpieczeństwa produktów i prawa żywnościowego, w tym obowiązek zgłoszenia produktu niebezpiecznego, współpracy z organami nadzoru oraz podjęcia działań korygujących, takich jak recall lub wycofanie produktu z rynku. Istotne znaczenie ma także wymiar reputacyjny, ponieważ ujawnienie produktu niebezpiecznego osłabia zaufanie do marki, wpływa na relacje z konsumentami i partnerami handlowymi oraz może prowadzić do długotrwałych strat wizerunkowych. Ostatni z podstawowych obszarów stanowi wymiar finansowy, obejmujący koszty wycofania produktu, odszkodowań, utraty sprzedaży oraz działań naprawczych.

Podsumowanie

Brak bezpieczeństwa produktu stanowi jedno z najpoważniejszych źródeł kryzysu w organizacji, ponieważ łączy zagrożenie dla zdrowia i życia konsumentów z konsekwencjami prawnymi, ekonomicznymi i reputacyjnymi dla przedsiębiorstwa. Jak wykazano w artykule, kryzys produktowy nie powinien być postrzegany wyłącznie jako skutek wystąpienia wady fizycznej lub niezgodności produktu, lecz jako rezultat szerszych dysfunkcji w systemie zarządzania bezpieczeństwem, obejmujących m.in. niewystarczający nadzór nad procesami, brak skutecznej identyfikacji ryzyka, nieprawidłowości informacyjne oraz opóźnione reagowanie na sygnały zagrożenia. W tym

ujęciu bezpieczeństwo produktu staje się nie tylko kategorią jakościową, ale również ważnym obszarem zarządzania strategicznego i kryzysowego.

W konsekwencji można stwierdzić, że odporność przedsiębiorstwa na kryzys bezpieczeństwa produktu zależy nie tylko od jakości samego wyrobu, ale przede wszystkim od dojrzałości systemu zarządzania bezpieczeństwem oraz gotowości organizacji do rozpoznawania, ograniczania i neutralizowania zagrożeń na każdym etapie cyklu życia produktu. Z perspektywy praktycznej oznacza to potrzebę integracji zarządzania bezpieczeństwem produktu z zarządzaniem kryzysowym, komunikacją kryzysową, nadzorem nad łańcuchem dostaw oraz zgodnością regulacyjną. Tylko takie podejście pozwala ograniczyć skalę skutków kryzysu, chronić konsumenta i utrzymać stabilność funkcjonowania przedsiębiorstwa.

Summary

A lack of product safety is one of the most serious sources of crisis in an organization, as it combines a threat to the health and life of consumers with legal, economic, and reputational consequences for the company. As demonstrated in this article, a product crisis should not be viewed solely as a consequence of a physical defect or product nonconformity, but rather as the result of broader dysfunctions in the safety management system, including, among other things, insufficient process oversight, lack of effective risk identification, informational inadequacies, and delayed responses to threat signals. From this perspective, product safety becomes not only a qualitative category but also an important area of strategic and crisis management.

Consequently, it can be concluded that a company's resilience to a product safety crisis depends not only on the quality of the product itself, but above all on the maturity of the safety management system and the organization's readiness to recognize, mitigate, and neutralize threats at every stage of the product lifecycle. From a practical perspective, this means the need to integrate product safety management with crisis management, crisis communication, supply chain oversight, and regulatory compliance. Only such an approach will allow us to limit the scale of the crisis's effects, protect consumers and maintain the stability of the company's operations.

Bibliografia

[1] Astvansh, V. (2020). Product recall and product-harm crisis: A summary of the multidisciplinary literature [Working paper]. SSRN. https://ssrn.com/abstract=3638142

[2] Cleeren, K., Dekimpe, M. G., & Helsen, K. (2008). Weathering product-harm crises. Journal of the Academy of Marketing Science, 36(2), 262–270. https://doi.org/10.1007/s11747-007-0022-8

[3] Dawar, N., & Pillutla, M. M. (2000). Impact of product-harm crises on brand equity: The moderating role of consumer expectations. Journal of Marketing Research, 37(2), 215–226.

[4] Huczek, M. (2015). Zarządzanie kryzysowe w firmie a role i umiejętności menedżerskie. Humanitas Zarządzanie, 16(3), 13–22. https://doi.org/10.5604/18998658.1173049

[5] Liu, Y., Peng, Z., Cheng, P., & Chen, J. (2025). Whose call to recall: Institutional pressure, technological capability and product-harm crisis response strategy. Technological Forecasting and Social Change, 213, Article 124032. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2025.124032
[6] Olsson, E.-K. (2014). Dimensions of crisis communication revisited. Journal of Contingencies and Crisis Management, 22(2), 113–125. https://doi.org/10.1111/1468-5973.12047
[7] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/988 z dnia 10 maja 2023 r. w sprawie ogólnego bezpieczeństwa produktów, zmieniające rozporządzenie (UE) nr 1025/2012 i dyrektywę (UE) 2020/1828 oraz uchylające dyrektywę 2001/95/WE i dyrektywę 87/357/EWG. (2023). Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, L 135, 1–51.
[8] Siomkos, G. J., & Kurzbard, G. (1994). The hidden crisis in product-harm crisis management. European Journal of Marketing, 28(2), 30–41. https://doi.org/10.1108/03090569410055265
[9] Vassilikopoulou, A., Siomkos, G., Chatzipanagiotou, K., & Pantouvakis, A. (2009). Product-harm crisis management: Time heals all wounds? Journal of Retailing and Consumer Services, 16(3), 174–180. https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2008.11.011
[10] Walas-Trębacz, J., & Ziarko, J. (2011). Podstawy zarządzania kryzysowego. Cz. 2, Zarządzanie kryzysowe w przedsiębiorstwie. Oficyna Wydawnicza AFM.

Kamila Padjasek

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

ZASTOSOWANIE TECHNOLOGII BLOCKCHAIN ORAZ IOT W ZAPEWNIENIU JAKOŚCI ŻYWNOŚCI

THE APPLICATION OF BLOCKCHAIN AND IOT TECHNOLOGIES IN ENSURING FOOD QUALITY

Streszczenie

W artykule przedstawiono znaczenie nowoczesnych technologii w zapewnianiu jakości i bezpieczeństwa żywności. Omówiono istotę zarządzania jakością w przemyśle spożywczym oraz rolę systemów HACCP i PN-EN ISO 22000:2018 w monitorowaniu procesów produkcyjnych. Scharakteryzowano najważniejsze problemy współczesnych łańcuchów dostaw żywności, w tym ograniczoną identyfikowalność produktów, trudności związane z monitorowaniem warunków transportu i magazynowania oraz zjawisko fałszowania żywności. Szczególną uwagę poświęcono technologii blockchain oraz Internetowi Rzeczy (IoT), które umożliwiają monitorowanie produktów w czasie rzeczywistym, zwiększenie przejrzystości danych oraz poprawę identyfikowalności w całym łańcuchu dostaw żywności. W artykule przedstawiono również korzyści i ograniczenia związane z wdrażaniem nowoczesnych technologii w sektorze spożywczym.

Abstract

The article presents the importance of modern technologies in ensuring food quality and safety. It discusses the essence of quality management in the food industry and the role of HACCP and PN-EN ISO 22000:2018 systems in monitoring production processes. The paper characterizes the main problems of modern food supply chains, including limited product traceability, difficulties related to monitoring transport and storage conditions, and food fraud. Particular attention is paid to blockchain technology and the Internet of Things (IoT), which enable real-time product monitoring, increased data transparency, and improved traceability throughout the food supply chain. The article also presents the

benefits and limitations associated with the implementation of modern technologies in the food sector.

Wstęp

Współczesny przemysł spożywczy mierzy się z licznymi wyzwaniami związanymi z zapewnieniem jakości i bezpieczeństwa żywności. Globalizacja rynku, rozwój handlu międzynarodowego oraz rosnące wymagania konsumentów powodują konieczność skutecznego monitorowania produktów na każdym etapie łańcucha dostaw. Złożoność procesów produkcji, magazynowania, transportu i dystrybucji zwiększa ryzyko występowania zagrożeń wpływających na jakość produktów spożywczych. W odpowiedzi na pojawiające się problemy coraz większe znaczenie zyskują nowoczesne technologie wspierające zarządzanie jakością żywności, w szczególności blockchain oraz Internet Rzeczy (IoT). Rozwiązania te umożliwiają monitorowanie procesów w czasie rzeczywistym, zwiększenie identyfikowalności produktów oraz poprawę przejrzystości danych w całym łańcuchu dostaw żywności. Celem artykułu jest przedstawienie znaczenia nowoczesnych technologii w zapewnianiu jakości i bezpieczeństwa żywności oraz omówienie korzyści i ograniczeń związanych z ich wdrażaniem.

Istota zarządzania jakością w przemyśle spożywczym

Jakość żywności jest pojęciem złożonym i obejmuje zarówno bezpieczeństwo, jak i jego cechy sensoryczne, wartość odżywczą oraz akceptowalność przez konsumentów. Bezpieczeństwo stanowi jednak podstawowy fundament jakości, ponieważ produkt niespełniający wymagań zdrowotnych nie może być uznany za produkt wysokiej jakości. W praktyce oznacza to konieczność spełniania określonych norm i standardów n każdym etapie łańcucha dostaw – od pozyskania surowców aż po dystrybucje (Ali i Khan, 2025).

W celu zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa i jakości stosuje się różne systemy zarządzania, wśród których szczególne znaczenie mają HACCP oraz ISO 22000. System HACCP opiera się na identyfikacji, ocenie oraz kontroli zagrożeń, które mogą wystąpić w procesie produkcyjnym. Kluczowym elementem tego podejścia jest wyznaczenie krytycznych punktów kontrolnych, w których możliwe jest zapobieganie lub eliminowanie zagrożeń (Padjasek, 2024)

Z kolei norma ISO 22000 stanowi kompleksowy system zarządzania bezpieczeństwem żywności, który integruje zasady HACCP z podejściem systemowym charakterystycznym dla norm zarządzania jakością. Obejmuje ona zarówno analizę zagrożeń, jak i działania organizacyjne, takie jak szkolenia pracowników czy zarządzanie ryzykiem oraz zapewnienie spójności procesów (Sitarz i Janczar-Smuga, 2012).

Istotnym elementem zarządzania jakością w przemyśle spożywczym jest podejście procesowe i prewencyjne. Oznacza ono skupienie się na zapobieganiu potencjalnym zagrożeniom poprzez ich wcześniejszą identyfikację oraz kontrolę kluczowych etapów produkcji. Systemy takie jak HACCP umożliwiają szybkie reagowanie na możliwe nieprawidłowości oraz minimalizowanie ryzyka dla konsumentów

Dodatkowo, współczesne systemy zarządzania jakością opierają się na dokładnej dokumentacji oraz możliwości śledzenia procesów. Rejestrowanie danych dotyczących monitorowania, działań korygujących oraz weryfikacji pozwala zwiększyć identyfikowalność i audytowalność procesów produkcyjnych, co ma kluczowe znaczenie zarówno w kontrolach wewnętrznych jak i audytach zewnętrznych (Moradbeikie i in., 2025). Uzupełnieniem tego ssą szczegółowe zapisy dotyczące działań HACCP, obejmujące m.in. analizę zagrożeń, procedury higieniczne, kontrolę parametrów środowiskowych oraz regularne audyty i kalibrację urządzeń (Mouawad i in., 2026).

Problemy współczesnych łańcuchów dostaw żywności

Łańcuch dostaw żywności obejmuje wiele powiązanych ze sobą podmiotów, w tym producentów surowców rolnych, przedsiębiorstwa przetwórstwa spożywczego, magazyny, firmy transportowe oraz sektor dystrybucji i sprzedaży detalicznej. Współdziałanie poszczególnych ogniw ma istotny wpływ na zachowanie odpowiedniej jakości oraz bezpieczeństwa produktów spożywczych na każdym etapie przepływu żywności do konsumenta (Szymańska, Bórawski i Żuchowski, 2018).

Jednym z najważniejszych problemów współczesnych łańcuchów dostaw jest ograniczona przejrzystość przepływu informacji pomiędzy poszczególnymi uczestnikami procesu. W wielu przypadkach przedsiębiorstwa wykorzystują odrębne systemy dokumentacji i monitorowania, co utrudnia szybkie identyfikowanie źródła problemu oraz skuteczne zarządzanie kryzysowe. Brak pełnej identyfikowalności produktów może prowadzić do opóźnień w wycofywaniu wadliwych partii żywności z rynku oraz zwiększać ryzyko wystąpienia zagrożeń zdrowotnych dla konsumentów (Ali i Khan, 2025).

Istotnym wyzwaniem pozostaje również utrzymanie odpowiednich warunków transportu i magazynowania produktów spożywczych. Nieprawidłowa temperatura, wilgotność czy zbyt długi czas przechowywania mogą przyczyniać się do rozwoju drobnoustrojów oraz pogorszenia jakości sensorycznej produktów. Szczególnie duże znaczenie ma to w przypadku produktów łatwo psujących się, takich jak mięso, nabiał czy świeże warzywa i owoce. W związku z tym przedsiębiorstwa sektora spożywczego są zobowiązane do ciągłego monitorowania warunków przechowywania i transportu (Tendeukai Kunashe Ndondo, 2023).

Kolejnym problemem jest zjawisko fałszowania żywności (food fraud), które obejmuje między innymi zafałszowywanie składu produktów, nieprawidłowe oznaczanie pochodzenia surowców czy stosowanie tańszych zamienników składników. Praktyki te stanowią zagrożenie zarówno dla bezpieczeństwa konsumentów, jak i dla wiarygodności producentów. Przykładem mogą być przypadki wykrycia mięsa wieprzowego w produktach deklarowanych jako wołowe czy fałszowanie oliwy z oliwek (Ali i Khan, 2025).

Współczesne łańcuchy dostaw żywności są również narażone na zakłócenia wynikające z czynników zewnętrznych, takich jak konflikty geopolityczne, zmiany klimatyczne, pandemie czy kryzysy gospodarcze. Wydarzenia te mogą prowadzić do przerw w dostawach surowców, wzrostu kosztów transportu oraz ograniczonej dostępności produktów spożywczych. Pandemia COVID-19 wykazała, że wiele przedsiębiorstw nie

było odpowiednio przygotowanych na nagłe zakłócenia funkcjonowania rynku, co uwidoczniło potrzebę zwiększenia odporności i elastyczności łańcuchów dostaw (Ali i Khan, 2025).

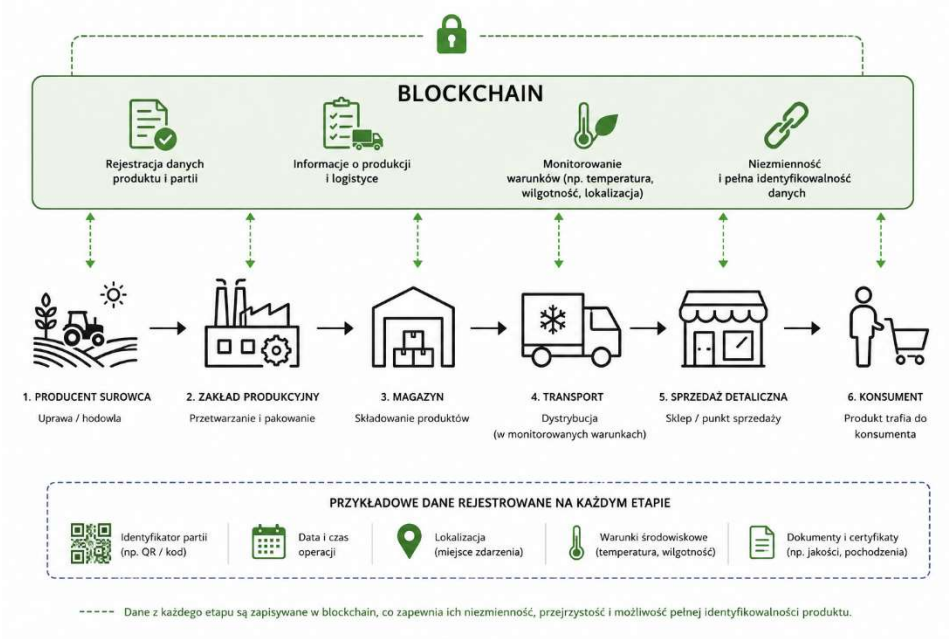
W odpowiedzi na pojawiające się zagrożenia coraz większe znaczenie zyskują systemy zarządzania bezpieczeństwem żywności, takie jak HACCP oraz ISO 22000. Systemy te umożliwiają identyfikację zagrożeń, monitorowanie krytycznych punktów kontroli oraz wdrażanie działań korygujących. Dodatkowo rozwój nowoczesnych technologii, takich jak Internet Rzeczy (IoT), blockchain czy sztuczna inteligencja, pozwala na skuteczniejsze monitorowanie procesów i zwiększenie identyfikowalności produktów w całym łańcuchu dostaw.

Technologia blockchain w zapewnieniu jakości żywności

Technologia blockchain stanowi jedno z nowoczesnych rozwiązań cyfrowych znajdujących coraz szersze zastosowanie w sektorze spożywczym oraz systemach zarządzania jakością żywności. Blockchain można zdefiniować jako rozproszoną bazę danych umożliwiającą trwałe i niezmienne zapisywanie informacji w postaci połączonych ze sobą bloków danych. Każdy zapis w systemie jest automatycznie weryfikowany i zabezpieczony kryptograficznie, co ogranicza możliwość manipulacji danymi oraz zwiększa wiarygodność przechowywanych informacji (Kosior, 2018).

W przemyśle spożywczym technologia blockchain wykorzystywana jest przede wszystkim do poprawy identyfikowalności produktów w całym łańcuchu dostaw żywności. System umożliwia monitorowanie drogi produktu od pozyskania surowca, przez proces produkcji, magazynowanie i transport, aż po sprzedaż detaliczną. Dzięki temu wszystkie podmioty uczestniczące w łańcuchu dostaw mają dostęp do aktualnych informacji dotyczących pochodzenia produktu, warunków jego przechowywania oraz przebiegu transportu. Przykładowy model wykorzystania technologii blockchain w łańcuchu dostaw żywności przedstawiono na rysunku 1. System umożliwia rejestrowanie danych dotyczących produkcji, magazynowania oraz transportu produktów spożywczych, co zwiększa identyfikowalność i przejrzystość procesów logistycznych.

Jedną z najważniejszych zalet technologii blockchain jest zwiększenie przejrzystości oraz bezpieczeństwa procesów logistycznych. W przypadku wykrycia zagrożenia możliwe jest szybkie zidentyfikowanie źródła problemu i wycofanie wadliwej partii produktu z rynku. Ma to szczególne znaczenie w sektorze spożywczym, gdzie opóźnienia w identyfikacji zagrożenia mogą prowadzić do poważnych konsekwencji zdrowotnych dla konsumentów. Technologia blockchain może również ograniczać zjawisko fałszowania żywności poprzez możliwość weryfikacji autentyczności produktów oraz ich pochodzenia (Kamath, 2018; Kosior 2018).



Rys. 1. Zastosowanie technologii blockchain w łańcuchu dostaw żywności
Źródło: opracowanie własne na podstawie Iftekhar i in. (2020, s. 4, 7).

Istotnym elementem wykorzystania blockchain w zarządzaniu jakością żywności jest integracja tej technologii z rozwiązaniami Internetu Rzeczy (IoT). Czujniki monitorujące temperaturę, wilgotność czy lokalizację produktu mogą automatycznie przesyłać dane do systemu blockchain w czasie rzeczywistym. Umożliwia to ciągłe monitorowanie warunków transportu i magazynowania produktów spożywczych oraz szybsze reagowanie na pojawiające się nieprawidłowości (Iftekhar i in., 2020). Integracja blockchain i IoT pozwala również na tworzenie bardziej odpornych na manipulację systemów monitorowania jakości żywności.

Praktyczne zastosowanie technologii blockchain zostało przedstawione między innymi przez przedsiębiorstwo Walmart we współpracy z IBM. W ramach pilotażowego programu wdrożono system umożliwiający śledzenie pochodzenia mango oraz mięsa wieprzowego. Dzięki zastosowaniu blockchain czas potrzebny do identyfikacji źródła pochodzenia produktu został skrócony z kilku dni do zaledwie kilku sekund, co znacząco usprawniło proces identyfikowalności i wycofywania produktów z rynku w sytuacjach kryzysowych (Kamath, 2018).

Pomimo licznych zalet wdrażanie technologii blockchain w sektorze spożywczym wiąże się również z pewnymi ograniczeniami. Do najważniejszych problemów należą wysokie koszty wdrożenia systemu, konieczność integracji różnych platform informatycznych oraz brak jednolitych standardów stosowania tej technologii. Dodatkowym wyzwaniem pozostaje potrzeba odpowiedniego przeszkolenia pracowników oraz zapewnienia ochrony danych i cyberbezpieczeństwa (Kosior, 2018).

Internet Rzeczy (IoT) w monitorowaniu procesów

Internet Rzeczy (Internet of Things – IoT) stanowi jedno z najważniejszych rozwiązań wspierających nowoczesne zarządzanie jakością i bezpieczeństwem żywności. Technologia ta opiera się na wykorzystaniu urządzeń wyposażonych w czujniki oraz systemy komunikacyjne umożliwiające zbieranie, przesyłanie i analizowanie danych w czasie rzeczywistym. W sektorze spożywczym rozwiązania IoT wykorzystywane są przede wszystkim do monitorowania warunków produkcji, magazynowania oraz transportu żywności (Iftekhar i in., 2020).

Współczesne przedsiębiorstwa branży spożywczej coraz częściej stosują czujniki monitorujące temperaturę, wilgotność, poziom gazów czy lokalizację produktów. Dane gromadzone przez urządzenia IoT pozwalają na bieżąco kontrolować warunki przechowywania i transportu żywności, co ma szczególne znaczenie w przypadku produktów łatwo psujących się, takich jak mięso, nabiał czy świeże owoce i warzywa. Nieprawidłowe warunki środowiskowe mogą prowadzić do rozwoju drobnoustrojów oraz pogorszenia jakości sensorycznej produktów spożywczych (Ali i Khan, 2025).

Istotną zaletą technologii IoT jest możliwość prowadzenia monitoringu w czasie rzeczywistym oraz automatycznego generowania powiadomień w przypadku wykrycia nieprawidłowości. Przykładowo przekroczenie dopuszczalnej temperatury podczas transportu może skutkować natychmiastowym wysłaniem alertu do operatora systemu, co umożliwia szybkie podjęcie działań korygujących. Rozwiązania tego typu wspierają funkcjonowanie systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności, takich jak HACCP i ISO 22000, poprzez skuteczniejsze monitorowanie krytycznych punktów kontroli (Mouawad i in., 2026).

Technologia IoT znajduje zastosowanie również w procesach produkcyjnych. Czujniki instalowane na liniach technologicznych umożliwiają kontrolę parametrów procesu, takich jak temperatura, poziom wilgotności czy czas przechowywania produktu. Pozwala to na ograniczenie ryzyka wystąpienia błędów technologicznych oraz zwiększenie stabilności jakości wyrobów gotowych. Dodatkowo systemy IoT mogą wspierać działania związane z predykcyjnym utrzymaniem ruchu poprzez monitorowanie stanu urządzeń i przewidywanie potencjalnych awarii.

Coraz częściej rozwiązania IoT integrowane są z technologią blockchain, co umożliwia automatyczne zapisywanie danych z czujników w zabezpieczonym systemie informatycznym. Takie połączenie zwiększa wiarygodność danych oraz poprawia identyfikowalność produktów w całym łańcuchu dostaw żywności. Integracja tych technologii może przyczyniać się do skuteczniejszego zarządzania jakością oraz szybszego reagowania na pojawiające się zagrożenia (Spitalleri i in., 2023).

Pomimo licznych korzyści wdrażanie technologii IoT wiąże się również z pewnymi ograniczeniami. Do najważniejszych problemów należą wysokie koszty zakupu i utrzymania infrastruktury, konieczność zapewnienia odpowiedniego poziomu cyberbezpieczeństwa oraz potrzeba integracji wielu systemów informatycznych. Wyzwanie stanowi także konieczność odpowiedniego szkolenia pracowników oraz analiza dużej ilości danych generowanych przez urządzenia monitorujące.

Znaczenie identyfikowalności (traceability)

Identyfikowalność (traceability) odgrywa istotną rolę w nowoczesnych systemach zarządzania jakością i bezpieczeństwem żywności. Pojęcie to oznacza możliwość śledzenia produktu spożywczego na wszystkich etapach łańcucha dostaw – od pozyskania surowca, poprzez produkcję i transport, aż po sprzedaż detaliczną. Systemy identyfikowalności umożliwiają szybkie uzyskanie informacji dotyczących pochodzenia produktu, zastosowanych surowców oraz warunków przechowywania i dystrybucji, zgodnie z wymaganiami normy PN-EN ISO 22000:2018.

Znaczenie traceability wzrosło wraz z rozwojem globalnych łańcuchów dostaw żywności oraz zwiększeniem liczby zagrożeń związanych z bezpieczeństwem produktów spożywczych. W przypadku wykrycia niezgodności lub skażenia żywności identyfikowalność pozwala na szybkie ustalenie źródła problemu oraz wycofanie wadliwych partii z rynku. Ogranicza to ryzyko zagrożenia zdrowia konsumentów oraz zmniejsza straty finansowe przedsiębiorstw (Kamath, 2018)

Systemy identyfikowalności wspierają również funkcjonowanie systemów zarządzania bezpieczeństwem żywności, takich jak HACCP oraz ISO 22000. Dzięki możliwości monitorowania przepływu produktów i dokumentowania poszczególnych etapów procesu przedsiębiorstwa mogą skuteczniej kontrolować krytyczne punkty kontroli oraz prowadzić działania korygujące. Traceability zwiększa także przejrzystość procesów produkcyjnych i buduje większe zaufanie konsumentów do produktów spożywczych.

Współcześnie coraz większe znaczenie mają nowoczesne technologie wspierające identyfikowalność, takie jak blockchain oraz Internet Rzeczy (IoT). Rozwiązania te umożliwiają automatyczne gromadzenie danych oraz monitorowanie produktów w czasie rzeczywistym, co zwiększa skuteczność kontroli jakości i bezpieczeństwa żywności (Iftekhar i in., 2020).

Korzyści i ograniczenia wdrożeń nowoczesnych technologii

Wdrażanie nowoczesnych technologii, takich jak blockchain oraz Internet Rzeczy (IoT), przynosi liczne korzyści dla sektora spożywczego oraz systemów zarządzania jakością żywności. Jedną z najważniejszych zalet jest zwiększenie identyfikowalności produktów i poprawa przejrzystości łańcucha dostaw. Dzięki możliwości monitorowania produktów w czasie rzeczywistym przedsiębiorstwa mogą szybciej identyfikować źródło problemu oraz skuteczniej reagować na pojawiające się zagrożenia (Kamath, 2018).

Przykładem praktycznego zastosowania technologii blockchain jest współpraca przedsiębiorstw Walmart i IBM. Wdrożony system umożliwił śledzenie pochodzenia mango oraz mięsa wieprzowego w całym łańcuchu dostaw. Dzięki zastosowaniu blockchain czas potrzebny do ustalenia pochodzenia produktu został skrócony z kilku dni do około 2,2 sekundy, co znacząco usprawniło proces wycofywania produktów z rynku w sytuacjach kryzysowych (Kamath, 2018).

Korzyści związane z wdrażaniem technologii IoT obejmują przede wszystkim możliwość ciągłego monitorowania warunków przechowywania i transportu żywności. Czujniki temperatury i wilgotności pozwalają na szybkie wykrywanie nieprawidłowości

oraz ograniczenie ryzyka pogorszenia jakości produktów spożywczych. Rozwiązania tego typu wspierają funkcjonowanie systemów HACCP poprzez skuteczniejsze monitorowanie krytycznych punktów kontroli oraz automatyzację procesu dokumentacji (Iftekhar i in., 2020)

Pomimo licznych zalet wdrażanie nowoczesnych technologii wiąże się również z pewnymi ograniczeniami. Jednym z głównych problemów są wysokie koszty wdrożenia i utrzymania infrastruktury technologicznej. Zakup czujników, systemów informatycznych oraz integracja różnych platform mogą stanowić istotne obciążenie finansowe, szczególnie dla małych i średnich przedsiębiorstw sektora spożywczego (Spitalleri i in., 2023).

Istotnym wyzwaniem pozostaje również zapewnienie odpowiedniego poziomu cyberbezpieczeństwa oraz ochrony danych. Systemy oparte na technologii IoT i blockchain wymagają stałego dostępu do sieci oraz przechowywania dużych ilości danych, co może zwiększać ryzyko cyberataków i nieuprawnionego dostępu do informacji. Problemem jest także brak jednolitych standardów wdrażania tych technologii oraz konieczność odpowiedniego szkolenia pracowników (Kosior, 2018). Dodatkowym ograniczeniem może być trudność integracji nowych rozwiązań z już istniejącymi systemami stosowanymi przez przedsiębiorstwa spożywcze. W wielu przypadkach firmy wykorzystują różne platformy informatyczne, które nie zawsze są ze sobą kompatybilne. Może to utrudniać efektywne wykorzystanie danych oraz ograniczać skuteczność monitorowania procesów.

Podsumowanie

Zapewnienie jakości i bezpieczeństwa żywności stanowi jedno z najważniejszych wyzwań współczesnego przemysłu spożywczego. Rosnąca złożoność łańcuchów dostaw, globalizacja rynku oraz zwiększające się wymagania konsumentów powodują konieczność stosowania skutecznych systemów monitorowania i kontroli procesów produkcyjnych. Istotną rolę w tym zakresie odgrywają systemy zarządzania bezpieczeństwem żywności, takie jak HACCP oraz PN-EN ISO 22000:2018, umożliwiające identyfikację zagrożeń oraz monitorowanie krytycznych punktów kontroli.

Rozwój nowoczesnych technologii, w szczególności blockchain oraz Internetu Rzeczy (IoT), stwarza nowe możliwości w zakresie poprawy identyfikowalności produktów, monitorowania warunków transportu i magazynowania oraz zwiększenia przejrzystości danych w całym łańcuchu dostaw żywności. Technologie te mogą przyczyniać się do szybszego reagowania na zagrożenia oraz ograniczania ryzyka związanego z fałszowaniem żywności i niewłaściwymi warunkami przechowywania produktów. Pomimo licznych korzyści wdrażanie nowoczesnych rozwiązań technologicznych wiąże się również z wyzwaniami, takimi jak wysokie koszty implementacji, potrzeba integracji systemów czy zapewnienie odpowiedniego poziomu cyberbezpieczeństwa. Jednak dynamiczny rozwój technologii wskazuje, że rozwiązania cyfrowe będą odgrywały coraz większą rolę w zarządzaniu jakością i bezpieczeństwem żywności w przyszłości.

Summary

Ensuring food quality and safety is one of the most important challenges of the modern food industry. The increasing complexity of supply chains, market globalization, and growing consumer expectations require the implementation of effective systems for monitoring and controlling production processes. Food safety management systems such as HACCP and PN-EN ISO 22000:2018 play a significant role in identifying hazards and monitoring critical control points.

The development of modern technologies, particularly blockchain and the Internet of Things (IoT), creates new opportunities for improving product traceability, monitoring transport and storage conditions, and increasing data transparency throughout the food supply chain. These technologies can contribute to faster responses to threats and reduce the risks associated with food fraud and improper storage conditions. Despite numerous advantages, the implementation of modern technological solutions is also associated with challenges such as high implementation costs, the need for system integration, and ensuring an adequate level of cybersecurity. Nevertheless, the dynamic development of digital technologies indicates that such solutions will play an increasingly important role in food quality and safety management in the future.

Bibliografia

[1] Ali, S., i Khan, F. D. (2025). Food quality and food safety. *International Journal of Research and Analytical Reviews,* 5(6), 228-235.

[2] Iftekhar, A., Cui, X., Hassan, M., i Afzal, W. (2020). Application of blockchain and Internet of Things to ensure tamper-proof data availability for food safety. *Journal of Food Quality,* 2020, 1–14.

[3] Kamath, R. (2018). Food Traceability on Blockchain: Walmart's Pork and Mango Pilots with IBM. *The Journal of the British Blockchain Association,* 1(1), 1–12.

[4] Kosior, K. (2018). Potencjał technologii Blockchain w zapewnianiu bezpieczeństwa i jakości żywności. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*, 25(4), 18–32.

[5] Moradbeikie, A., Ayub da Costa Barbon, A. P., Grigore, I. M., Barbin, D. F., i Barbon Junior, S. (2025). Process Mining of Sensor Data for Predictive Process Monitoring: A HACCP-Guided Pasteurization Study Case. *Systems*, *13*(11), 935.

[6] Mouawad, J., Al Baalbaki, H., El Deghel, M., i Mnayer, D. (2026). Implementation of hazard analysis and critical control point (HACCP) system in spice store. *Journal of Food Processing and Preservation,* 2026(1).

[7] Padjasek, K. (2024). Wprowadzenie do standardów bezpieczeństwa żywności. Analiza porównawcza systemów GHP/GMP, HACCP, IFS oraz ISO 22000:2018. *Wybrane aspekty zarządzania jakością,* 81-94.

[8] PN-EN ISO 22000:2018 Systemy zarządzania bezpieczeństwem żywności — Wymagania dla organizacji w łańcuchu żywnościowym.

[9] Sitarz, S., i Janczar-Smuga, M. (2012). Współczesne zagrożenia bezpieczeństwa żywności, możliwości ich kontroli i eliminacji. *Nauki Inżynierskie i Technologie,* 2(5), 1-26.

[10] Spitalleri, A., Kavasidis, I., Cartelli, V., Mineo, R., Rundo, F., Palazzo, S., Spampinato, C., i Giordano, D. (2023). BioTrak: A Blockchain-based Platform for Food Chain Logistics Traceability, *International Conference on Intelligent Computing, Communication, Networking and Services (ICCNS),* Walencja 2023, 105-110

[11] Szymańska, E., Bórawski, P. i Żuchowski, I. (2018). Łańcuchy dostaw na wybranych rynkach rolnych w Polsce. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 1-130.
[12] Tendeukai Kunashe Ndondo, J. (2023). Review of the Food and Agriculture Organisation (FAO) Strategic Priorities on Food Safety 2023. In Food Science and Nutrition. IntechOpen.
[13] Turlejska, H. (2003). *Zasady GHP/GMP oraz system HACCP jako narzędzia zapewniania bezpieczeństwa zdrowotnego żywności - Poradnik dla przedsiębiorcy.* Fundacja Programów Pomocy dla Rolników, Warszawa, 1-72.

Amelia Przeklasa

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

SZTUCZNA INTELIGENCJA W ZARZĄDZANIU RYZYKIEM W SYSTEMACH JAKOŚCI

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN RISK MANAGEMENT IN QUALITY SYSTEMS

Streszczenie

W artykule omówiono rozwój zarządzania ryzykiem jakościowym, ze szczególnym uwzględnieniem przejścia od tradycyjnych metod wykorzystujących przeszłe dane do podejść wykorzystujących sztuczną inteligencję. Przedstawiono klasyczne narzędzia, takie jak FMEA, analiza SWOT i diagram Ishikawy, wskazując ich ograniczenia, m.in. subiektywność, czasochłonność oraz statyczny charakter.

Zaprezentowano również możliwości zastosowania AI w analizie danych, predykcji oraz automatyzacji decyzji, a także jej integrację z systemami ERP i MES. Podkreślono zarówno korzyści, takie jak większa dokładność i szybkość działania, jak i wyzwania związane z kosztami, kompetencjami oraz przejrzystością algorytmów.

Wskazano, że sztuczna inteligencja stanowi uzupełnienie tradycyjnych metod, umożliwiając bardziej efektywne i proaktywne zarządzanie ryzykiem.

Abstract

The article discusses the development of quality risk management, with particular emphasis on the transition from traditional methods using past data to approaches utilizing artificial intelligence. Classical tools such as FMEA, SWOT analysis, and the Ishikawa diagram are presented, highlighting their limitations, including subjectivity, time consumption, and a static nature.

It also presents the possibilities of applying AI in data analysis, prediction, and decision automation, as well as its integration with ERP and MES systems. Both benefits,

such as higher accuracy and faster performance, and challenges related to costs, required competencies, and algorithm transparency are emphasized.

It is concluded that artificial intelligence serves as a complement to traditional methods, enabling more efficient and proactive risk management.

Wstęp

Współczesne organizacje działają w warunkach rosnącej niepewności, co zwiększa znaczenie zarządzania ryzykiem w systemach jakości. Norma ISO 31000 to międzynarodowa norma określająca zasady i wytyczne dotyczące zarządzania ryzykiem w organizacjach. Zapewnia uniwersalny model identyfikacji, analizy, oceny, traktowania i monitorowania ryzyka, który można stosować w każdej branży. Norma wspiera podejmowanie decyzji oparte na ryzyku, zwiększając efektywność i odporność przedsiębiorstwa.

Jednocześnie rozwój sztucznej inteligencji stwarza nowe możliwości w zakresie analizy danych, predykcji oraz wspomagania decyzji. Technologie AI mogą wspierać organizacje w skuteczniejszym wykrywaniu zagrożeń i ograniczaniu ich skutków.

W związku z tym pojawia się pytanie badawcze, czy zastosowanie sztucznej inteligencji rzeczywiście poprawia proces zarządzania ryzykiem w systemach jakości. Celem artykułu jest analiza możliwości wykorzystania AI w tym obszarze oraz ocena jej wpływu na identyfikację i redukcję ryzyka.

Istota i znaczenie zarządzania ryzykiem

Zgodnie z normą ISO 31000, ryzyko nie jest definiowane wyłącznie jako zagrożenie, lecz jako „wpływ niepewności na cele". Kluczowym elementem tej definicji jest fakt, że wpływ ten może być zarówno negatywny (zagrożenia), jak i pozytywny (szanse). Zarządzanie ryzykiem to powtarzalny proces, który polega na określeniu sytuacji, rozpoznaniu zagrożeń, ich analizie, ocenie oraz podejmowaniu działań, aby je ograniczyć.

Wprowadzone w nowelizacji normy ISO 9001:2015, podejście oparte na ryzyku (risk-based thinking) zastąpiło wcześniejsze „działania zapobiegawcze". Oznacza to, że organizacja nie reaguje już wyłącznie na potencjalne problemy, ale uwzględnia ryzyko już na etapie planowania systemu zarządzania jakością. W praktyce wymaga to systematycznego analizowania możliwych zagrożeń i szans, a następnie integrowania działań ograniczających ryzyko z codziennymi procesami operacyjnymi. Istotnym elementem tego podejścia jest również fakt, że nie każde ryzyko musi być traktowane w ten sam sposób - jego znaczenie zależy od potencjalnego wpływu na jakość wyrobu oraz poziom satysfakcji klienta, dlatego konieczna jest jego priorytetyzacja (Martins i in., 2015).

Ewolucja zarządzania ryzykiem

Tradycyjne narzędzia zarządzania ryzykiem opierają się na subiektywnej ocenie ekspertów. Problemem jest tutaj subiektywizm punktacji oraz statyczny charakter analizy. AI zmienia tę dynamikę poprzez ciągłe monitorowanie danych w czasie rzeczywistym. W przeciwieństwie do tradycyjnej kontroli jakości, która sprawdza wyrób po fakcie, AI pozwala na przewidzenie błędu, zanim on wystąpi. Wykorzystuje się tu regresję logistyczną oraz lasy losowe (Random Forests) do mapowania zmiennych procesowych (temperatura, ciśnienie, czas) na prawdopodobieństwo wystąpienia defektu (Wamba i in., 2021).

Klasyczne metody identyfikacji i analizy ryzyka

FMEA (Failure Mode and Effects Analysis)

FMEA to kluczowe narzędzie oceny ryzyka, służące do identyfikacji i eliminacji potencjalnych błędów w systemach, projektach oraz procesach, zanim wpłyną one na końcowego odbiorcę. Choć od XX wieku metoda ta stanowi fundament zapewnienia niezawodności w wielu branżach, tradycyjny sposób obliczania ryzyka za pomocą wskaźnika RPN (Risk Priority Number) jest coraz częściej uznawany za niewystarczający.

Według Liu (2013) można wskazać na główne problemy osłabiające skuteczność tej metody:

- brak hierarchii czynników: RPN traktuje częstość występowania, dotkliwość i wykrywalność jako równoważne, co rzadko odpowiada rzeczywistości,
- identyczne wyniki dla różnych ryzyk: różne kombinacje parametrów generują ten sam wynik RPN, maskując odmienne konsekwencje potencjalnych awarii,
- subiektywizm i trudność oceny: precyzyjne oszacowanie trzech wskaźników ryzyka w skali 1–10 jest często niemożliwe i obarczone błędem ludzkim,
- wady matematyczne: formuła mnożenia jest kontrowersyjna, ponieważ wskaźnik RPN nie jest ciągły i posiada wiele „luk" oraz powtarzających się wartości, co utrudnia obiektywne ustalanie priorytetów.

Współczesne badania wskazują, że aby FMEA pozostało skutecznym narzędziem, tradycyjne podejście musi być uzupełniane o zaawansowane techniki, takie jak logika rozmyta czy wielokryterialne metody podejmowania decyzji (MCDM).

Analiza SWOT

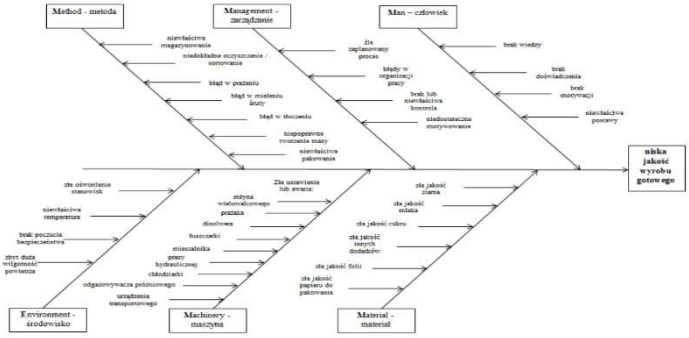
Analiza SWOT – czynniki wewnętrzne (Strengths – silne strony, Weaknesses – słabe strony) oraz zewnętrzne (Opportunities – szanse, Threats – zagrożenia), to jedno z najpopularniejszych narzędzi planowania strategicznego. Jej siła tkwi w prostocie, ponieważ pozwala grupie interesariuszy szybko zidentyfikować wewnętrzne i zewnętrzne czynniki wpływające na sukces organizacji (Munyao, 2026). Jednak w erze dynamicznych

zmian i ogromnych zbiorów danych, tradycyjna formuła SWOT wykazuje krytyczne słabości, gdzie zidentyfikować można kilka głównych problemów:

- subiektywizm: wyniki analizy są uzależnione od opinii uczestników, a nie od danych obiektywnych, co sprzyja uwzględnianiu przypuszczeń zamiast faktów,
- brak priorytetów: metoda nie odróżnia błahych spraw od wielkich zagrożeń, co prowadzi do marnowania zasobów na mało istotne problemy,
- brak aktualności: analiza ma charakter statyczny i nie odzwierciedla dynamicznych zmian w otoczeniu. w dynamicznym biznesie taka analiza potrafi zdezaktualizować się w kilka miesięcy,
- zbyt ogólne hasła: wyniki często przyjmują formę ogólnych haseł, które nie dają jasnych wytycznych do podjęcia konkretnych działań zapobiegawczych w systemie jakości,
- ograniczona perspektywa zewnętrzna: zespoły często analizują własne procesy, pomijając realne zagrożenia płynące z zewnątrz (Alaqlobi, i in., 2025).

Diagram Ishikawy

Narzędzie diagnostyczne służące do identyfikacji przyczyn źródłowych problemów jakościowych, znane również jako diagram rybich ości (rys. 1). Klasyfikuje przyczyny w kategoriach takich jak: człowiek, maszyna, , metoda, materiał, kierowanie i środowisko (tzw. 5M+E) (Kowalik, 2018).



Rys. 1. Przykład diagramu Ishikawy
Źródło: Kowalik, K. (2018) *Diagram Ishikawy w teorii i praktyce zarządzania jakością*, *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 3, 1, str. 17

Jedną z istotnych wad diagramu Ishikawy, jest skłonność do nadmiernego upraszczania złożonych problemów. W trakcie jego stosowania istnieje ryzyko pominięcia istotnych czynników, co może prowadzić do niepełnej i powierzchownej analizy. Dodatkowo samo opracowanie diagramu bywa czasochłonne i często wymaga zaangażowania przedstawicieli różnych zespołów w celu identyfikacji możliwych przyczyn danego problemu.

Tego typu proces może opóźniać podejmowanie decyzji. Kolejnym ograniczeniem jest jego subiektywny charakter - sposób klasyfikowania przyczyn zależy od uczestników analizy, co może skutkować błędnym nadaniem priorytetu mniej istotnym czynnikom. W efekcie niektóre przyczyny mogą zostać przecenione, jeśli nie zostaną odpowiednio zweryfikowane. Ponadto skuteczne wykorzystanie tej metody wymaga sprawnego prowadzenia procesu, co bywa trudne dla zespołów o mniejszym doświadczeniu (https://businessanalysis.training/business-analysis-faqs/what-are-the-disadvantages-of-the-fishbone-diagram).

Ograniczenia tradycyjnych metod

Pomimo ich powszechnego stosowania, tradycyjne metody zarządzania ryzykiem mają istotne ograniczenia, które wpływają na ich skuteczność w nowoczesnych, dynamicznych środowiskach organizacyjnych. Jednym z głównych problemów jest subiektywność oceny, szczególnie widoczna w metodzie FMEA. W praktyce oznacza to, że ocena ryzyka często zależy od indywidualnego doświadczenia ekspertów, a nawet od ich aktualnego podejścia czy nastroju, co może prowadzić do rozbieżnych wyników w podobnych analizach. Kolejnym istotnym ograniczeniem jest czasochłonność tych metod. Przeprowadzenie rzetelnej analizy ryzyka wymaga zaangażowania zespołów interdyscyplinarnych oraz wielu godzin pracy, obejmujących dyskusje, ocenę potencjalnych zagrożeń i uzgadnianie wspólnych wniosków. W rezultacie proces ten może znacząco spowalniać podejmowanie decyzji, szczególnie w organizacjach o dużej liczbie procesów. W praktyce oznacza to, że stanowią jedynie obraz sytuacji w danym momencie i nie uwzględniają zmian zachodzących w czasie, zarówno w procesach produkcyjnych, jak i w otoczeniu organizacji. W efekcie ich przydatność maleje w warunkach dynamicznych i szybko zmieniających się realiów (Francik i Pudło, 2016).

Cyfryzacja i potrzeba nowych podejść w zarządzaniu ryzykiem

Sztuczna Inteligencja to dziedzina informatyki zajmująca się tworzeniem systemów zdolnych do wykonywania zadań wymagających ludzkiej inteligencji, takich jak rozumowanie, uczenie się, planowanie i kreatywność.

W kontekście zarządzania ryzykiem cyfryzacja procesów organizacyjnych powoduje konieczność odejścia od tradycyjnych, statycznych metod analizy. Według Yadav i in., (2024), klasyczne podejście opiera się głównie na danych historycznych, co sprawia, że uzyskiwane wyniki przedstawiają jedynie stan przeszły i nie zawsze odpowiadają aktualnej sytuacji w procesach produkcyjnych lub usługowych. W efekcie analiza ryzyka może być niepełna lub opóźniona względem rzeczywistych zmian zachodzących w organizacji. Alternatywą dla tego podejścia jest analiza danych w czasie rzeczywistym, która umożliwia ciągłe monitorowanie procesów oraz szybkie wykrywanie wszelkich odchyleń od normy. Dzięki temu organizacja może reagować na potencjalne zagrożenia na bieżąco, zanim przerodzą się one w rzeczywiste problemy. W tym obszarze kluczową rolę odgrywa sztuczna inteligencja, która dzięki technologiom takim jak deep learning i machine learning błyskawicznie przetwarza potężne zbiory danych. Umożliwia ona wykrywanie

skomplikowanych wzorców i nieliniowych zależności, których nie są w stanie wychwycić tradycyjne modele statystyczne. Dzięki temu organizacja może monitorować rynek w czasie rzeczywistym i precyzyjnie prognozować zagrożenia rynkowe, kredytowe czy operacyjne. Pozwala to na przejście z reaktywnego modelu działania na podejście proaktywne, w którym ryzyko jest minimalizowane jeszcze przed jego materializacją (Yadav, i in., 2024).

Machine Learning a Deep Learning

Machine Learning (ML) to podzbiór sztucznej inteligencji, w którym algorytmy uczą się na podstawie danych, zamiast być programowane w sposób sztywny. Systemy ML analizują dane, wykrywają w nich wzorce i na tej podstawie podejmują decyzje lub dokonują prognoz, a ich skuteczność rośnie wraz z ilością dostępnych danych.

Deep Learning (DL) jest bardziej zaawansowaną formą ML, opartą na wielowarstwowych sieciach neuronowych inspirowanych działaniem mózgu. Pozwala na analizę bardziej złożonych danych, takich jak obrazy czy dźwięki i jest stosowany m.in. w automatycznej detekcji wad powierzchniowych w procesach produkcyjnych (Yadav, i in., 2024).

Predykcja, analiza danych i automatyzacja decyzji

W nowoczesnym zarządzaniu sztuczna inteligencja znajduje zastosowanie w kilku kluczowych obszarach:

1) wykorzystanie predykcji polega na przewidywaniu przyszłych zdarzeń na podstawie danych historycznych i bieżących, takich jak prognozowanie popytu, wykrywanie potencjalnych awarii maszyn (Predictive Maintenance) czy identyfikacja możliwych spadków jakości produktów,
2) analiza danych obejmuje przetwarzanie bardzo dużych zbiorów informacji, np. danych z czujników IoT, w celu wykrywania zależności i korelacji, takich jak wpływ warunków środowiskowych (np. wilgotności powietrza w hali produkcyjnej) na trwałość powłok lakierniczych,
3) automatyzacja decyzji umożliwia podejmowanie działań bez udziału człowieka, np. systemy AI mogą automatycznie wstrzymać linię produkcyjną, jeśli analiza danych wskazuje na wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia wady produktu (Kliestik, i in., 2023).

Integracja AI z systemami ERP (Enterprise Resource Planning) oraz MES (Manufacturing Execution System) pozwala na znaczne rozszerzenie możliwości zarządzania produkcją i jakością poprzez wykorzystanie danych w czasie rzeczywistym oraz automatyzację procesów decyzyjnych.

Systemy rekomendacyjne: w tym podejściu sztuczna inteligencja analizuje dane produkcyjne, historyczne wyniki oraz aktualne parametry procesu, a następnie sugeruje

operatorowi optymalne ustawienia maszyn. Dzięki temu zmniejsza się ryzyko błędów ludzkich, a proces produkcyjny staje się bardziej stabilny i powtarzalny.

Automatyczne alerty: AI umożliwia bieżące monitorowanie kluczowych parametrów procesu i natychmiastowe wykrywanie odchyleń od normy. W przypadku zidentyfikowania potencjalnego ryzyka system może automatycznie wysłać powiadomienie do działu jakości jeszcze przed wystąpieniem rzeczywistego błędu, co pozwala na szybkie podjęcie działań zapobiegawczych i ograniczenie strat (Paul, 2024).

Korzyści i ograniczenia w zastosowaniu AI

Zastosowanie sztucznej inteligencji w zarządzaniu ryzykiem jakościowym przynosi wiele korzyści, takich jak zwiększenie dokładności analiz poprzez eliminację błędów poznawczych człowieka oraz możliwość wykrywania anomalii niewidocznych w tradycyjnych metodach. Istotną zaletą jest także bardzo duża szybkość przetwarzania danych, co pozwala na podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym i natychmiastowe reagowanie na pojawiające się problemy. Automatyzacja procesów przyczynia się również do ograniczenia błędów ludzkich wynikających ze zmęczenia czy rutyny, a zdolność analizy dużych zbiorów danych umożliwia tworzenie bardziej kompleksowego i całościowego obrazu ryzyka.

Jednocześnie wdrożenie takich rozwiązań wiąże się z pewnymi ograniczeniami, w tym przede wszystkim wysokimi kosztami związanymi z infrastrukturą i oprogramowaniem. Problemem może być także konieczność zatrudnienia wykwalifikowanych specjalistów oraz zapewnienia odpowiedniej jakości danych. Dodatkowym wyzwaniem pozostaje ograniczona przejrzystość działania algorytmów, co utrudnia ich interpretację i może stanowić problem w kontekście audytów oraz zgodności z normami (Țîrcovnicu i Hațegan, 2023).

Podsumowanie

Zarządzanie ryzykiem jakościowym przeszło od tradycyjnych, statycznych metod wykorzystujących przeszłe dane do bardziej dynamicznych podejść wspieranych przez sztuczną inteligencję. Klasyczne narzędzia, takie jak FMEA, są użyteczne, lecz cechują się subiektywnością, czasochłonnością i ograniczoną zdolnością reagowania na zmiany.

W odpowiedzi na te ograniczenia coraz większą rolę odgrywa AI, umożliwiająca analizę danych w czasie rzeczywistym, predykcję zdarzeń oraz automatyzację decyzji. Integracja z systemami ERP i MES pozwala na szybsze wykrywanie niezgodności i bardziej efektywne zarządzanie procesami.

Mimo licznych korzyści wdrożenie AI wiąże się z kosztami, potrzebą specjalistycznej wiedzy oraz wyzwaniami związanymi z przejrzystością algorytmów, dlatego stanowi ona raczej uzupełnienie niż zastępstwo tradycyjnych metod.

Summary

Quality risk management has evolved from traditional, static methods based on historical data to more dynamic approaches supported by artificial intelligence. Classical tools such as FMEA are useful, but they are characterized by subjectivity, time consumption, and a limited ability to respond to changing conditions.

In response to these limitations, AI is playing an increasingly important role by enabling real-time data analysis, event prediction, and decision automation. Integration with ERP and MES systems allows for faster detection of nonconformities and more efficient process management.

Despite its many advantages, the implementation of AI involves costs, requires specialized expertise, and raises challenges related to algorithm transparency; therefore, it serves more as a complement rather than a replacement for traditional methods.

Bibliografia

[1] Alaqlobi, A., Alduais, A., Qasem, F. i Alasmari, M. (2025). A SWOT analysis of generative AI in applied linguistics: Leveraging strengths, addressing weaknesses, seizing opportunities, and mitigating threats. F1000 Research, 13, 1040, 1-26.

[2] Francik, K. i Pudło, M. (2016). Systemy wspomagania decyzji w aspekcie zarządzania ryzykiem w przedsiębiorstwie. *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej*, 22, 23-32.

[3] H-C, L., L, L. I N, L. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40, 2, 828-838.

[4] Kliestik, T., Nica, E., Durana, P., i Popescu, G. H. (2023). Artificial intelligence-based predictive maintenance, time-sensitive networking, and big data-driven algorithmic decision-making in the economics of Industrial Internet of Things. *Oeconomia Copernicana*, 14(4), 1097-1138.

[5] Kowalik, K. (2018). Diagram Ishikawy w teorii i praktyce zarządzania jakością. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 3, 1, 15-17.

[6] Martins, Y. S., Silva, C. E. S., Sampaio, P. i Catalani, L. (2022). ISO 9001:2015 and risk-based thinking: scientific research insights. *Total Quality Management & Business Excellence*, *33*(11–12), 1326–1343.

[7] Munyao, J. (2026). Criticisms of the SWOT analysis model: A Strategic Planning Approach. *International Journal of research in social science and humanities*, 7(3), 40-47.

[8] Paul, C. (2024). Integration of ERP Systems with MES for Unified Operations. *ResearchGate*, 1-5.

[9] Țîrcovnicu, G.-I. i Hațegan, C.-D. (2023). Integration of Artificial Intelligence in the Risk Management Process: An Analysis of Opportunities and Challenges. *Journal of Financial Studies*, 8(15), 198–214.

[10] Wamba, S. F., Queiroz, M. M. i Braganza, A. (2021). Preface: artificial intelligence in operations management. *Annals of Operations Research*, 308, 1-6.

[11] Yadav, P., Gupta, P., Sijariya, R. i Sharma, Y. (2024). Artificial Intelligence in Risk Management. *Artificial Intelligence for Risk Mitigation in the Financial Industry*, 1, 1-26.

Netografia

[12] What are the disadvantages of the fishbone diagram? Business analysis training, https://businessanalysis.training/business-analysis-faqs/what-are-the-disadvantages-of-the-fishbone-diagram (data dostępu 03.05.2026)

Justyna Pustelak

Szkoła Doktorska UEK
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

JAKOŚĆ OBSŁUGI JAKO ELEMENT PRZEWAGI KONKURENCYJNEJ W BRANŻY GASTRONOMICZNEJ

CUSTOMER SERVICE QUALITY AS A SOURCE OF COMPETITIVE ADVANTAGE IN THE RESTAURANT INDUSTRY

Streszczenie

Celem artykułu jest analiza znaczenia jakości obsługi jako czynnika budującego przewagę konkurencyjną przedsiębiorstw działających w branży gastronomicznej. W części teoretycznej omówiono zagadnienia dotyczące jakości usług, satysfakcji klienta oraz ich wpływu na konkurencyjność przedsiębiorstw, ze szczególnym uwzględnieniem specyfiki sektora gastronomicznego. Przedstawiono również rolę jakości obsługi w kształtowaniu doświadczeń klientów, budowaniu ich lojalności oraz wzmacnianiu pozycji rynkowej przedsiębiorstw.

W części empirycznej przedstawiono wyniki badania przeprowadzonego z wykorzystaniem internetowego kwestionariusza ankiety wśród 276 mieszkańców Krakowa. Celem badania była identyfikacja czynników związanych z jakością obsługi, które w największym stopniu zniechęcają konsumentów do korzystania z oferty lokali gastronomicznych. Uzyskane rezultaty potwierdzają, że jakość obsługi stanowi istotny czynnik wpływający na satysfakcję klientów oraz budowanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw gastronomicznych. Wskazuje to na potrzebę systematycznego doskonalenia kompetencji interpersonalnych personelu i utrzymywania wysokich standardów obsługi klienta.

Abstract

The aim of the article was to examine the importance of service quality as a factor contributing to the competitive advantage of companies operating in the food service industry. The theoretical part discusses the concepts of service quality, customer satisfaction, and their impact on business competitiveness, with particular attention to the characteristics of the food service sector. It also highlights the role of service quality in shaping customer experiences, building customer loyalty, and strengthening a company's market position.

The empirical part is based on the results of an online survey conducted among 276 residents of Kraków. The study aimed to identify the service quality factors that most strongly discourage consumers from visiting food service establishments. The findings indicate that service quality is an important determinant of customer satisfaction and a key element in building the competitive advantage of food service businesses. The results also suggest the need for continuous improvement of employees' interpersonal skills and the maintenance of high customer service standards.

Wstęp

Współczesny rynek usług gastronomicznych charakteryzuje się wysokim poziomem konkurencji oraz dynamicznie zmieniającymi się oczekiwaniami konsumentów. Klienci, podejmując decyzje o wyborze lokalu gastronomicznego, zwracają uwagę nie tylko na jakość oferowanych potraw i poziom cen, ale również na sposób obsługi, atmosferę panującą w lokalu oraz całokształt doświadczeń związanych z korzystaniem z usługi. W konsekwencji przedsiębiorstwa gastronomiczne są zmuszone do nieustannego doskonalenia jakości świadczonych usług oraz poszukiwania czynników umożliwiających budowanie trwałej przewagi konkurencyjnej.

Jednym z kluczowych elementów wpływających na postrzeganie jakości usług gastronomicznych jest jakość obsługi klienta. Kompetencje personelu, sposób komunikacji, zaangażowanie pracowników oraz indywidualne podejście do gości mają istotny wpływ na poziom satysfakcji klientów, ich lojalność oraz skłonność do ponownego korzystania z oferty danego lokalu. Z tego względu jakość obsługi jest obecnie postrzegana nie tylko jako element procesu świadczenia usług, lecz również jako istotny czynnik kształtujący konkurencyjność przedsiębiorstw gastronomicznych.

Teoretyczne uwarunkowania jakości usług w branży gastronomicznej

Pojęcie jakości stanowi jedno z fundamentalnych zagadnień w teorii i praktyce zarządzania organizacjami. Szczególnego znaczenia nabiera ono w sektorze usług gastronomicznych, w którym poziom jakości świadczonych usług stanowi istotny determinant decyzji konsumenckich oraz jeden z kluczowych czynników warunkujących budowanie i utrzymywanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstwa na rynku (Grębowiec, 2022).

W literaturze przedmiotu wyróżnia się różne ujęcia jakości usług. Wskazuje się, że jakość usług składa się z trzech podstawowych komponentów: jakości materialnej, jakości interakcyjnej oraz jakości firmowej (Urban, 2018). Jakość materialna obejmuje elementy związane ze strukturą produktu oraz zasobami wspomagającymi realizację usługi, takimi jak infrastruktura czy miejsce świadczenia usługi. Z kolei jakość interakcyjna odnosi się do bezpośrednich relacji zachodzących pomiędzy usługodawcą a klientem. W jej skład wchodzą przede wszystkim kompetencje i zachowania personelu obsługującego oraz wykorzystywane wyposażenie. Trzeci wymiar, określany jako jakość firmowa, związany jest z postrzeganiem przedsiębiorstwa przez klientów, jego reputacją oraz poziomem zaufania, jakim konsumenci obdarzają daną organizację (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018).

Sektor gastronomiczny należy do branż o wysokich wymaganiach jakościowych, w których kluczowe znaczenie ma utrzymanie wysokiego standardu obsługi klienta oraz ciągłe doskonalenie oferowanych usług. Oczekiwania konsumentów dotyczą nie tylko jakości i smaku serwowanych potraw, ale również profesjonalizmu, uprzejmości i kompetencji personelu. Na poziom satysfakcji klientów wpływają także czynniki związane z otoczeniem usługi, takie jak wystrój lokalu czy panująca atmosfera. Ocena jakości usług gastronomicznych jest szczególnie złożona, ponieważ obejmuje zarówno rezultat usługi, jak i cały proces jej realizacji (Malinowska, 2022).

Jakość usług gastronomicznych postrzegana jest jako konstrukt o charakterze wieloaspektowym, obejmujący zarówno materialny rezultat usługi, jak i niematerialne elementy związane z procesem jej świadczenia. W ujęciu kompleksowym obejmuje ona szereg wzajemnie powiązanych elementów, takich jak jakość potraw, profesjonalizm obsługi, standard infrastruktury i otoczenia materialnego, adekwatność relacji ceny do jakości, a także ogół doświadczeń i odczuć konsumenta związanych z korzystaniem z oferty lokalu gastronomicznego (Slack i in., 2021; Zhong i Moon, 2020). Oddziaływanie tych elementów znajduje odzwierciedlenie w poziomie satysfakcji klienta, stanowiącej jeden z podstawowych efektów oceny jakości świadczonych usług (Kowalik i Klimecka-Tatar, 2018). Badania dotyczące jakości usług gastronomicznych wskazują, że konsumenci przy wyborze lokalu zwracają uwagę nie tylko na jakość oferowanych potraw, ale również na poziom obsługi, atmosferę miejsca, wyposażenie lokalu oraz standardy higieniczne. Istotne znaczenie mają także szybkość realizacji usług, komfort spożywania posiłków oraz kompetencje i uprzejmość personelu, które wpływają na kształtowanie pozytywnych doświadczeń klientów (Malinowska, 2022).

Jednym z kluczowych efektów postrzeganej jakości usług jest satysfakcja klienta, która stanowi subiektywną ocenę całokształtu doświadczeń konsumenta wynikających z kontaktu z przedsiębiorstwem oraz korzystania z oferowanych usług lub produktów. Powstaje ona w wyniku porównania oczekiwań klienta z rzeczywistym poziomem otrzymanego świadczenia, a jej poziom może wpływać na kształtowanie określonych postaw i zachowań konsumenckich (Biesok i Wyród-Wróbel, 2025). Wysoki poziom satysfakcji sprzyja budowaniu lojalności klientów, która przejawia się między innymi gotowością do ponownego skorzystania z oferty oraz rekomendowaniem przedsiębiorstwa innym osobom. Ocena doświadczenia zakupowego dokonywana przez konsumenta uwzględnia m.in. jakość produktu, sposób obsługi oraz stopień zgodności otrzymanej usługi z wcześniejszymi oczekiwaniami. Spełnienie lub przekroczenie tych oczekiwań

prowadzi do wzrostu zadowolenia klienta i sprzyja tworzeniu trwałych relacji pomiędzy konsumentem a przedsiębiorstwem (Biesok i Wyród-Wróbel, 2016).

W sektorze gastronomicznym satysfakcja klientów jest kształtowana przez wiele wzajemnie powiązanych czynników. Na podstawie wyników badań stwierdzono, że szczególnie istotne znaczenie ma jakość oferowanych produktów, jednak jej wpływ jest wzmacniany przez elementy związane z atmosferą lokalu oraz jakością interakcji pomiędzy personelem a klientem (Zhong i Moon, 2020). Profesjonalna obsługa, kompetencje pracowników oraz umiejętność właściwego rozpoznawania potrzeb konsumentów stanowią ważne determinanty pozytywnej oceny usługi. Z kolei opóźnienia, brak zaangażowania personelu czy niewłaściwe podejście do klienta mogą prowadzić do obniżenia poziomu satysfakcji oraz negatywnie wpływać na postrzeganie przedsiębiorstwa (Jonkisz et al., 2021). Szczególne znaczenie przypisuje się indywidualnemu podejściu do konsumenta, które umożliwia budowanie zaufania, wzmacnianie pozytywnych doświadczeń oraz rozwijanie długotrwałych relacji z klientami (Bilqis i in., 2025; Jonkisz i in., 2021).

Znaczenie jakości usług oraz satysfakcji klientów wykracza jednak poza pojedyncze doświadczenie konsumenckie, ponieważ wpływa również na długookresowe funkcjonowanie przedsiębiorstwa. Wysoka jakość usług przyczynia się do wzrostu lojalności klientów, zwiększenia prawdopodobieństwa ponownych zakupów oraz osiągania trwałej przewagi konkurencyjnej przez organizacje usługowe (Hogreve i in., 2022). Na podstawie badań prowadzonych w sektorze gastronomicznym stwierdzono, że postrzegana jakość usług wpływa na wartość odczuwaną przez klientów oraz poziom ich satysfakcji, co przekłada się na większą skłonność do ponownego odwiedzania restauracji (Zhong i Moon, 2020). Jednocześnie utrzymywanie wysokiego standardu świadczonych usług sprzyja budowaniu zaufania klientów, wzmacnianiu pozytywnego wizerunku oraz reputacji przedsiębiorstwa na rynku (Qalati i in., 2021). Tym samym jakość usług, a w szczególności jakość obsługi klienta, stanowi istotny element umożliwiający przedsiębiorstwom gastronomicznym tworzenie trwałej wartości dla konsumentów oraz wzmacnianie swojej pozycji konkurencyjnej. W konsekwencji jakość usług oraz zdolność przedsiębiorstwa do kształtowania pozytywnych doświadczeń klientów należy rozpatrywać również w kontekście budowania jego konkurencyjności rynkowej.

Konkurencyjność przedsiębiorstwa jest kategorią wielowymiarową, zależną zarówno od zasobów i kompetencji wewnętrznych organizacji, jak i od jej zdolności do skutecznego funkcjonowania w zmieniającym się otoczeniu rynkowym. Konkurencyjność definiowana jest również jako umiejętność osiągania i utrzymywania przewagi konkurencyjnej, umożliwiającej przedsiębiorstwu skuteczne konkurowanie na rynku oraz realizację długookresowych celów rozwojowych (Tul-Krzyszczuk i in., 2017).

Istotnym determinantem konkurencyjności przedsiębiorstw usługowych jest zdolność do efektywnego odpowiadania na potrzeby i oczekiwania klientów. Osiągnięcie tego celu wymaga systematycznego doskonalenia procesów zarządzania jakością, optymalizacji kosztów świadczonych usług, skracania czasu ich realizacji oraz zapewnienia terminowej realizacji usług. (Zalas i Ingaldi, 2017).

W gastronomii jakość obsługi jest jednym z najważniejszych narzędzi budowania przewagi konkurencyjnej, ponieważ przyczynia się do wzrostu satysfakcji gości oraz

budowania pozytywnego wizerunku marki. Znaczenie jakości obsługi jako narzędzia budowania przewagi konkurencyjnej wykazano w badaniu przeprowadzonym wśród warszawskich placówkach gastronomicznych. Respondenci najwyżej ocenili działania ukierunkowane na wysoką jakość obsługi klienta, wzmacnianie marki oraz oferowanie produktów wyższej jakości niż konkurencja, co pozwala stwierdzić, że jakość obsługi jest postrzegana jako kluczowy komponent tworzenia wartości dla klienta i wzmacniania pozycji rynkowej przedsiębiorstwa (Tul-Krzyszczuk i in., 2017).

Znaczenie poszczególnych wymiarów jakości usług gastronomicznych zależy od charakteru i profilu działalności lokalu. W restauracjach typu fast food szczególne znaczenie mają szybkość obsługi, sprawna realizacja zamówień oraz standaryzacja procesów, co wynika ze specyfiki korzystania z tego typu lokali i ograniczeń czasowych klientów (Chou i in., 2025). Jednocześnie badania przeprowadzone wśród studentów SGGW wykazały, że o konkurencyjności takich lokali decydują również czystość pomieszczeń, uprzejmość personelu oraz dostępność miejsc siedzących, co wskazuje, że restauracje fast food są postrzegane nie tylko jako miejsca szybkiego spożywania posiłków, ale także krótkotrwałego pobytu (Balińska, 2017). Natomiast w segmencie fine dining większe znaczenie przypisuje się atmosferze lokalu, estetyce serwowanych potraw, jakości kontaktu z personelem oraz indywidualizacji obsługi (Nyacigak i in., 2022). Znaczenie poszczególnych komponentów jakości usług gastronomicznych jest uzależnione od segmentu rynku oraz oczekiwań określonych grup konsumentów (Liu i in., 2024).

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że jakość obsługi stanowi istotny element kształtowania doświadczeń klientów oraz pozycji konkurencyjnej przedsiębiorstw gastronomicznych. Z tego względu podjęto badania własne dotyczące czynników wpływających na ocenę jakości obsługi przez konsumentów korzystających z usług gastronomicznych.

Charakterystyka badań własnych i analiza wyników

Badanie miało na celu identyfikację czynników wpływających na decyzje zakupowe konsumentów na rynku usług gastronomicznych, ze szczególnym uwzględnieniem motywów wyboru lokali gastronomicznych oraz czynników zniechęcających do korzystania z ich oferty. Badanie przeprowadzono z wykorzystaniem internetowego kwestionariusza ankiety udostępnionego respondentom w formie online. W badaniu wzięło udział 276 respondentów z miasta Krakowa. Wśród respondentów ponad 90% stanowiły osoby z wykształceniem wyższym. Większość badanej populacji (89,1%) zamieszkiwała miasta liczące powyżej 100 tys. mieszkańców, natomiast 9,1% stanowili mieszkańcy obszarów wiejskich, a 1,8% – miast liczących poniżej 100 tys. mieszkańców. W strukturze płci odnotowano nieznaczną przewagę mężczyzn (52,2%) nad kobietami (47,8%). Najliczniejszą grupę wiekową stanowili respondenci w wieku 30–40 lat (59,8%), następnie osoby w wieku 20–30 lat (22,5%) oraz 40–50 lat (14,5%). Udział respondentów w wieku 50–60 lat oraz powyżej 60. roku życia był niewielki i wynosił po 0,7%.

Jedno z pytań zawartych w kwestionariuszu ankiety miało charakter pytania zamkniętego jednokrotnego wyboru i brzmiało: „Jakie czynniki dotyczące jakości obsługi

najbardziej zniechęcają Panią/Pana do odwiedzenia danego lokalu gastronomicznego?". Respondentom przedstawiono cztery warianty odpowiedzi: nieuprzejmość personelu, niekulturalne zachowania, brak zainteresowania ze strony obsługi oraz brak czystości. Dodatkowo ankietowani mieli możliwość wskazania własnej odpowiedzi w kategorii „inne", co umożliwiło identyfikację dodatkowych czynników. Strukturę odpowiedzi respondentów na analizowane pytanie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Czynniki dotyczące jakości obsługi zniechęcające respondentów do odwiedzenia lokalu gastronomicznego (N = 276)
Źródło: opracowanie własne na podstawie badań ankietowych (N = 276)

Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że najczęściej wskazywanym czynnikiem zniechęcającym do odwiedzenia lokalu gastronomicznego był brak zainteresowania ze strony obsługi. Odpowiedź tę wskazało 126 respondentów, co stanowi 45,7% wszystkich badanych. Wynik ten wskazuje, że zaangażowanie personelu oraz właściwe podejście do klienta mają kluczowe znaczenie dla oceny jakości usług gastronomicznych.

Drugim najczęściej wskazywanym czynnikiem była nieuprzejmość personelu, którą wybrało 89 respondentów (32,2%). Otrzymany wynik potwierdza istotny wpływ sposobu komunikacji oraz kultury osobistej pracowników na doświadczenia klientów i ich ocenę lokalu gastronomicznego.

Kolejnym czynnikiem był brak czystości, wskazany przez 43 osoby (15,6%). Utrzymanie odpowiedniego poziomu higieny i estetyki lokalu stanowi istotny element wpływający na decyzje konsumentów.

Najrzadziej spośród odpowiedzi zawartych w kafeterii wskazywano niekulturalne zachowania personelu. Czynnik ten został wybrany przez 14 respondentów, co stanowi 5,1% badanej grupy.

W odpowiedziach udzielonych w kategorii „inne" pojawiły się jedynie pojedyncze wskazania. Trzech respondentów (1,1%) zwróciło uwagę na nieznajomość pozycji z karty przez personel, natomiast jedna osoba (0,4%) wskazała wolną obsługę. Na podstawie tych odpowiedzi można stwierdzić, że istotne znaczenie mają kompetencje pracowników, w tym znajomość oferowanego menu, oraz sprawna realizacja zamówień, stanowiąca jeden z elementów jakości obsługi.

Niewielka liczba odpowiedzi własnych świadczy o tym, że przygotowany zestaw odpowiedzi w dużym stopniu obejmował najważniejsze czynniki wpływające na decyzje respondentów.

Stwierdzono, że dla badanych największe znaczenie mają czynniki związane z jakością obsługi klienta. Zarówno brak zainteresowania ze strony personelu (45,7%), jak i nieuprzejmość pracowników (32,2%) były wskazywane zdecydowanie częściej niż pozostałe czynniki. Oznacza to, że sposób obsługi klientów odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu doświadczeń konsumentów oraz ich decyzji o ponownym skorzystaniu z oferty lokalu gastronomicznego. Na podstawie wyników badania można wskazać na potrzebę inwestowania przez właścicieli lokali gastronomicznych w szkolenia personelu z zakresu standardów obsługi klienta, komunikacji interpersonalnej oraz budowania pozytywnych relacji z gośćmi.

Podsumowanie

Przeprowadzone badanie pozwoliło stwierdzić, że jakość obsługi stanowi jeden z kluczowych czynników wpływających na decyzje konsumentów na rynku usług gastronomicznych. Najczęściej wskazywanymi czynnikami zniechęcającymi do odwiedzenia lokalu były brak zainteresowania ze strony personelu oraz nieuprzejmość pracowników. Wyniki te są zgodne z ustaleniami przedstawionymi w literaturze, zgodnie z którymi sposób komunikacji, zaangażowanie oraz kompetencje personelu istotnie wpływają na postrzeganą jakość usług, satysfakcję i lojalność klientów. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że budowanie przewagi konkurencyjnej przedsiębiorstw gastronomicznych wymaga nie tylko utrzymywania wysokiego standardu oferowanych usług, lecz przede wszystkim doskonalenia jakości obsługi klienta. W szczególności działania te powinny obejmować rozwój kompetencji interpersonalnych pracowników, wzmacnianie standardów komunikacji oraz kształtowanie postawy zaangażowania i orientacji na potrzeby klienta.

Summary

The findings of the study indicate that service quality is one of the key factors influencing consumer decisions in the food service industry. The most frequently reported factors discouraging customers from visiting a restaurant were the lack of staff attentiveness and employees' impolite behaviour. These findings are consistent with previous research, which indicates that the way employees communicate with customers, their level of engagement, and their professional competencies have a significant impact on perceived service quality, customer satisfaction, and customer loyalty. Based on the results of the study, it was concluded that building a competitive advantage in the food service industry requires not only maintaining a high standard of services but, above all, continuously improving customer service quality. In particular, these efforts should focus on developing employees' interpersonal skills, strengthening communication standards, and fostering employee engagement and customer-oriented attitudes.

Bibliografia

[1] Balińska A. (2017). Konkurencyjność obiektów typu fast food w ocenie studentów SGGW. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*, 475, 23–32.

[2] Bilqis L.D.R., Amrullah, Leonandri D.G. (2025). Restaurant Service Quality: A Literature Study of SERVQUAL Dimensions. *International Journal of Management and Economics Invention*, 11(6), 4241–4248.

[3] Biesok G., Wyród-Wróbel J. (2016). *Modele satysfakcji klienta*. Wydawnictwo Difin, Warszawa, 37.

[4] Biesok G., Wyród-Wróbel J. (2025). *Satysfakcja i dyssatysfakcja klienta*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, Bielsko-Biała, 43.

[5] Chou S.F., Horng J.S., Liu C.H., Yu T.Y., Huang Y.C., La Q.P., Ng Y.L. (2025). Comparison of hotel fine dining and chain restaurant consumer perceived service quality and satisfaction predictions. *Journal of Hospitality and Tourism Insights*, 8(5), 1927–1953.

[6] Grębowiec M. (2022). Jakość jako determinanta budowania pozycji konkurencyjnej na rynku produktów żywnościowych. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Warszawa.

[7] Hogreve J., Iseke A., Derfuss K. (2022). The Service-Profit Chain: Reflections, Revisions, and Reimaginations. *Journal of Service Research*, 25(3), 460–477.

[8] Jonkisz A., Karniej P., Krasowska D. (2022). The SERVQUAL Method as an Assessment Tool of the Quality of Medical Services in Selected Asian Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), 1–15.

[9] Kowalik K., Klimecka-Tatar D. (2018). Model zarządzania jakością usług w kontekście satysfakcji klienta. *Quality. Production. Improvement*, 1, 33.

[10] Liu C.H., Lapuz M.C.B., Gan B. (2024). How service quality affects consumer revisit behavior in chain restaurants: Lessons from COVID-19. *International Journal of Hospitality Management*, 121, 103774.

[11] Malinowska E. (2022). Kształtowanie jakości usług gastronomicznych w dobie pandemii COVID-19 na przykładzie DINESERV – nowe kryteria oceny. *Management and Quality*, 4(2), 163–174.

[12] Malinowska E. (2022). Wykorzystanie modelu Kano do oceny ważności cech charakteryzujących usługi gastronomiczne w dobie pandemii. W: A. Pałka (red.), *The Role of Commodity Science in Quality Management in a Knowledge-Based Economy: Food Safety: Bezpieczeństwo Żywności*. Uniwersytet Morski w Gdyni, Gdynia, 36–54.

[13] Nyacigak S., Jaswal R., Mishra R. (2022). A Comparative Study of Customer Preference between Quick Service Restaurants and Fine Dining Restaurants of Hotel Crowne Plaza, Greater Noida. *Global Journal of Management and Business Research:F Hospitality, Event & Tourism Management*, 22(2).

[14] Qalati S.A., Vela E.G., Li W., Dakhan S.A., Hong Thuy T.T., Merani S.H. (2021). Effects of perceived service quality, website quality, and reputation on purchase intention: The mediating and moderating roles of trust and perceived risk in online shopping. *Cogent Business & Management*, 8(1).

[15] Slack N.J., Singh G., Ali J., Lata R., Mudaliar K., Swamy Y. (2021). Influence of fast-food restaurant service quality and its dimensions on customer perceived value, satisfaction and behavioural intentions. *British Food Journal*, 123(4), 1324–1344.

[16] Tul-Krzyszczuk A., Łukowski J., Kufka M., Kwiatkowski B., Widawska M. (2017). *Konkurencyjność przedsiębiorstw gastronomicznych oraz wpływ relacji z dostawcami na ich funkcjonowanie*. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2, 152–157.

[17] Urban W. (2018). *Zarządzanie jakością usług*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

[18] Zalas M., Ingaldi M. (2017). Doskonalenie procesów świadczenia usług gastronomicznych. *Archiwum Wiedzy Inżynierskiej*, 2(1), 22–25.

[19] Zhong Y., Moon H.C. (2020). What Drives Customer Satisfaction, Loyalty, and Happiness in Fast-Food Restaurants in China? Perceived Price, Service Quality, Food

Quality, Physical Environment Quality, and the Moderating Role of Gender. *Foods*, 9(4), 460.

Agata Saguła

Koło Naukowe Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH KONCEPCJI PODEJŚCIA DO JAKOŚCI W KONTEKŚCIE ZAŁOŻEŃ PRZEMYSŁU 4.0

CHARACTERISTICS OF SELECTED QUALITY APPROACH CONCEPTS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0 ASSUMPTIONS

Streszczenie

W artykule omówiono rozwój metod inżynierii jakości w kontekście transformacji cyfrowej i założeń Jakości 4.0. Analizie poddano tradycyjne podejścia normatywne, statystyczne oraz prewencyjne, takie jak systemy ISO 9001, metodologia Six Sigma oraz analizy FMEA, wskazując na ich ograniczenia w dynamicznych środowiskach produkcyjnych. Główną barierą tradycyjnego podejścia jest jego reaktywny charakter oraz duża czasochłonność procedur opartych na dokumentacji papierowej. W pracy zaprezentowano koncepcję wykorzystania technologii rzeczywistości wirtualnej (VR), rozszerzonej (AR) oraz mieszanej (MR) jako nowoczesnego wsparcia dla procesów kontrolnych i szkoleniowych. Na podstawie literatury przedmiotu wykazano, że zastosowanie technik *visual see-through* (VST), *optical see-through* (OST) oraz stacjonarnej projekcji obrazu pozwala na znaczną minimalizację ryzyka pomyłek oraz automatyczne zapisywanie danych procesowych. Przeprowadzona analiza pozwala ocenić wpływ rozwiązań immersyjnych na eliminację błędów ludzkich w systemach produkcyjnych bezpośrednio w trakcie trwania pracy.

Abstract

The article discusses the development of quality engineering methods in the context of digital transformation and Quality 4.0 principles. Traditional normative, statistical, and preventive approaches, such as ISO 9001 systems, Six Sigma methodology, and FMEA analysis, are analyzed, pointing out their limitations in dynamic production environments.

The main barrier of the traditional approach is its reactive nature and the high time consumption of procedures based on paper documentation. The paper presents the concept of utilizing Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and Mixed Reality (MR) technologies as modern support for control and training processes. Based on the subject literature, it is demonstrated that the application of visual see-through (VST), optical see-through (OST), and spatial image projection techniques allows for a significant minimization of the risk of mistakes and automatic recording of process data. The conducted analysis allows for an evaluation of the impact of immersive solutions on the elimination of human errors in production systems directly during the course of work.

Wstęp

Inżynieria jakości jest dziedziną pozwalającą wykrywać i eliminować możliwe wady. W praktyce każda branża w zależności od jej specyfiki stosuje różne metody, które mają zapewnić zgodność procesów oraz wytwarzanych produktów z wymaganymi normami. W momencie ustalenia niezgodności przez pryzmat ustalonych wymagań określających dany produkt, mamy do czynienia z wadą. Pojęcie wady może być utożsamiane z nieodpowiednim przeprowadzeniem procesu technologicznego, co potem może determinować jego bezużyteczność dla konsumenta (Biały i in., 2017, s. 39).

Współczesny rozwój środowiska przemysłowego stwarza nowe możliwości w zakresie cyfryzacji za pomocą systemów cyber-fizycznych. Postęp ten sprawił, że tradycyjne pojęcie jakości zmieniło swoje znaczenie, ewoluując w kierunku Jakości 4.0. Celem niniejszego artykułu jest analiza możliwości wykorzystania technologii rzeczywistości wirtualnej (VR), rozszerzonej (AR) i mieszanej (MR) w inżynierii jakości oraz ocena ich wpływu na eliminację błędów ludzkich w systemach produkcyjnych.

Koncepcja Jakości 4.0

Wada może przybierać różne formy, między innymi błąd wykonania albo niewystarczający poziom jakości dla danego produktu czy wyrobu. W tym kontekście jakość w literaturze przedmiotu jest różnie definiowana i rozumiana w zależności od przyjętej perspektywy.

Od strony biznesowej jakość jest w pewnym rozumieniu stopniem, w jakim zbiór inherentnych właściwości spełnia wymagania. W praktyce właściwości to cechy produktu lub usługi, na przykład prędkość, trwałość lub czystość, których wymaganiami są oczekiwania klienta, przepisy prawne czy normy techniczne. Pod względem filozofii jakość nie podlega wartościowaniu, a jest ona opisem właściwości przedmiotu, które sprawiają, że jest to ten, a nie inny przedmiot. Natomiast określenie jakości w ujęciu konsumenta to stopień, w jakim produkt lub usługa spełnia lub przerasta jego indywidualne oczekiwania (Biały i in., 2017, s. 39).

Filozofia i struktura jakości

W ramach niniejszego opracowania analiza odnosi się do pojęć jakości podawanych przez Armanda Feigenbaum'a: „Jakość to ogół cech produktu lub usługi w zakresie marketingu, projektowania, produkcji i utrzymania ruchu, dzięki którym produkt lub usługa spełnia oczekiwania klienta" oraz Josepha M. Jurana: „Jakość to zdatność do użytku".

Armand Feigenbaum wprowadził koncepcję Kompleksowego Sterowania Jakością (Total Quality Control – TQC). Udowodnił w niej, że za jakość odpowiada cała firma, gdzie jakość jest wynikiem działań całej organizacji, dlatego wszystkie jej poziomy ponoszą taką samą odpowiedzialność. TQC opiera się na formułowaniu strategii opartej na sterowaniu procesami, utrzymaniu jakości oraz współodpowiedzialności każdego pracownika za jakość i ciągłym doskonaleniu procesów (Mroczko, 2012, s. 68-69).

Z kolei Joseph M. Juran kładł duży nacisk na procesy organizacji i planowanie kształtowania jakości, tworząc koncepcję spirali jakości. Opisuje ona ciągły i powtarzalny proces, który rozpoczyna się od badania dynamicznych potrzeb i wymagań konsumenta, następnie przechodzi przez fazy takie jak projektowanie produktu i technologii, wyposażenie, produkcję oraz sprzedaż, kończąc na obsłudze posprzedażowej i ponownej analizie opinii klienta. W tej kwestii rola człowieka ulega transformacji z biernego wykonawcy procedur do stania się kluczowym elementem decydującym o powodzeniu spirali jakości (Mroczko, 2012, s. 65–66).

Normatywne i statystyczne fundamenty zarządzania jakością

Najbardziej rozpoznawalnym międzynarodowym standardem identyfikacji wad jest norma ISO 9001:2015, powołana przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną ISO. Określa wymagania dla systemów zarządzania jakością. Jest to konkretna, techniczna norma wywodząca się z serii ISO 9000, która zawiera określone wymagania. Pozwala między innymi w przedsiębiorstwach na doskonalenie działań organizacji i uzyskanie certyfikatu. Normy ISO mają zasięg globalny, czyli operują zarówno w Europie, jak i na innych kontynentach (Molenda, 2016, s. 249).

Istotnym rozwiązaniem włączonym do norm stała się metodologia Six Sigma operująca indywidualnie lub w formie normy ISO 13053:2011, opisująca pięcioetapowy cykl DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*). Pozwala ona na zminimalizowanie kosztów i podwyższenie jakości produktów przez zastosowanie narzędzi statystycznych niwelujących niezgodności (Tochwin, 2021, s. 31–32).

Identyfikacja wad i zarządzanie ryzykiem w ujęciu FMEA

Dla lepszej jakości wytwarzanych produktów trzeba ustalić możliwe związki przyczynowo-skutkowe powstawania potencjalnych wad. W tym zakresie zastosowanie znajduje metoda FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), która poza analizą związków

uwzględnia czynnik ryzyka powstawania wad. Stanowi ona narzędzie służące systematycznej identyfikacji potencjalnych wad procesu lub produktu, umożliwiające tym samym ograniczanie lub całkowite eliminowanie związanego z nimi ryzyka. Jej zastosowanie reguluje norma PN-EN IEC 60812:2018. Wyróżnia się dwa główne rodzaje: DFMEA, czyli analiza na etapie projektowania, oraz PFMEA, analiza na etapie produkcji i logistyki (Rychły-Lipińska, 2007, s. 47–59).

Ograniczenia i bariery tradycyjnej kontroli jakości

Mimo dużej skuteczności tych metod w ich tradycyjnej formie, prowadzenie dokumentacji FMEA w arkuszach kalkulacyjnych, tworzenie papierowych map procesów dla Six Sigma czy opieranie systemów ISO na sformalizowanych procedurach rodzi pewne ograniczenia. Tradycyjna kontrola jakości skupia się na weryfikacji wyrobu gotowego, co oznacza działanie po fakcie i prowadzi do powstawania braków produkcyjnych. Ponadto papierowy obieg dokumentów bywa czasochłonny i zwiększa ryzyko pomyłek wynikających z rutyny lub zmęczenia operatora. Nowoczesne rozwiązania pozwalają jednak przenieść te klasyczne narzędzia w sferę cyfrową, co znacznie skraca czas reakcji na pojawiające się odchylenia i wady.

Transformacja przemysłowa

Współczesna rzeczywistość przemysłowa kształtowana jest przez czwartą rewolucję przemysłową, powszechnie znaną jako Przemysł 4.0. Samo określenie nawiązuje do przełomu cywilizacyjnego, związanego z masową cyfryzacją niemal wszystkich możliwych aspektów ludzkiej jak i przemysłowej rzeczywistości. Jeszcze kilkadziesiąt lat temu wiele rozwiązań, które dziś są uznawane za oczywistość, funkcjonowało tylko i wyłącznie w sferze wyobraźni jako coś utopijnego. Przykłady z filmów, gdzie występują cyfrowe odwzorowania rzeczywistych obiektów fizycznych, czy autonomiczne systemy decyzyjne wydają się wówczas nieosiągalne. Tymczasem wszystkie te technologie i więcej są realną częścią środowisk przemysłowych, produkcyjnych i przestrzeni społecznej (Hamrol, 2023, s. 17–19).

U podstawy tych zmian leży związek między technologią cyfrową a fizyczną. Integracja ta, określana mianem systemów cyber-fizycznych sprawia, że tradycyjne model przemysłu ustępuje miejsca nowej rzeczywistości.

Technologie immersyjne w Przemyśle 4.0

Pojęcie rzeczywistości w Przemyśle 4.0 ciągle ewoluuje i nie jest jednoznaczne. W kontekście technologicznym czwartej rewolucji przemysłowej wyróżnia się trzy główne fundamenty:

- rzeczywistość wirtualna (*Virtual Reality* – VR): Polega na całkowitym odseparowaniu człowieka od świata fizycznego na rzecz syntetycznego środowiska 3D,

- rzeczywistość rozszerzona (*Augmented Reality* – AR): Stanowi technologię łączącą świat fizyczny z elementami generowanymi komputerowo w czasie rzeczywistym, co wzbogaca percepcję użytkownika bez zastępowania świata realnego,
- rzeczywistość mieszana (*Mixed Reality* – MR): Stanowi hybrydę między VR i AR, umożliwiając interakcję obiektów cyfrowych ze światem fizycznym i zacierając granice między światem realnym a wirtualnym.

Wszystkie trzy technologie różnią się wpływem na percepcję rzeczywistości przez człowieka, lecz otwierają nowe perspektywy dla inżynierii jakości, szkolenia kadr i projektowania procesów (Skrzypek, 2021, s. 2).

Wizualizacja danych

W dobie Jakości 4.0 proponowane przez Jurana skupienie na człowieku i dążenie do eliminacji błędów wykonawczych zyskały nowe odzwierciedlenie dzięki transformacji cyfrowej i nowym narzędziom w formie systemów AR i MR. Działają one jako cyfrowe instrukcje nakładane bezpośrednio na fizyczne stanowisko pracy. Dzięki ich stosowaniu następuje zminimalizowanie ryzyka pomyłek i zwiększenie możliwości bezbłędnego zrealizowania zadań (Mroczko, 2012; Skrzypek, 2021; Jeffery, 2022).

W sektorze jakości badania nad AR wykazały potencjalne rezultaty w zakresie poprawy efektywności człowieka w zadaniach technicznej kontroli jakości i automatyzacji podejmowania decyzji. Obserwuje się rosnące zainteresowanie aplikacjami AR, które wdrażają rozszerzenie wizualne ze zróżnicowanym sprzężeniem zwrotnym sensorycznym. W przemyśle wyróżnia się trzy główne techniki wizualizacji danych:

1) kombinacja optyczna (Optical See-Through – OST) – realizowana za pomocą przezroczystych wyświetlaczy w formie gogli (np. Microsoft HoloLens), które pozwalają na zobaczenie cyfrowego rozszerzenia rzutowanego bezpośrednio na pole widzenia użytkownika,
2) miksowanie wideo (Video See-Through – VST) – realizowane przez MR za pomocą gogli z wbudowaną kamerą rejestrującą otoczenie użytkownika i przetwarzane przez komputer. Za pomocą rozszerzeń następuje scalenie świata rzeczywistego z obiektami wirtualnymi i wyświetlenie gotowego obrazu na urządzeniu wyświetlającym, projekcja obrazu – technika, która bezpośrednio rzutuje instrukcje i cyfrowe grafiki na fizyczne obiekty za pomocą projektorów stacjonarnych. (Ho i in., 2022; Azuma, 1997)

Aktualnie dzięki rozwojowi technologii Kompleksowego Sterowania Jakością (TQC) może być realizowane za pomocą systemu Wirtualnej Rzeczywistości (VR), który pozwala na umieszczenie użytkownika w cyfrowym środowisku zaprojektowanym w celu odtworzenia wrażeń odczuwalnych w prawdziwym życiu. Wykorzystanie gogli autonomicznych VR (*Stand-alone HMD*) przez śledzenie ruchu użytkownika pozwala na zobrazowanie syntetycznego środowiska 3D wprost przed jego oczami. Tę technologię stosuje się podczas szkoleń pracowników (nauka obsługi maszyn, BHP) bez ryzyka wypadku, a także przy ocenie cyfrowych modeli budynków lub części maszyn przed ich fizycznym stworzeniem (Cao i in., 2025).

Integracja systemowa

Analiza perspektyw technologicznych pozwala sformułować wnioski dotyczące integracji procesowej nowoczesnych technologii z tradycyjnym warsztatem inżynierskim:

Dla systemu pozwalającego analizować ryzyko powstawania wad (FMEA) optymalnym środowiskiem do cyfryzacji jest wirtualna rzeczywistość (VR). Stworzenie syntetycznego środowiska 3D pozwala na precyzyjne zobrazowanie produktu oraz analizę związków przyczynowo-skutkowych powstawania wad (Wolfartsberger, 2019, s. 24). Dzięki zastosowaniu tej technologii firmy są w stanie w bezpieczny sposób dla pracowników identyfikować możliwe błędy produkcji na każdym etapie cyklu życia produktu (Gorecky i in., 2014).

Podobne korzyści można zauważyć w przypadku Six Sigmy, której celem jest minimalizowanie liczby błędów i redukcja kosztów przy użyciu danych statystycznych. Wykorzystując gogle z techniką OST (kombinacja optyczna), pracownik ma przed oczami dokładne instrukcje na każdym kroku montażu (Ho i in., 2022, art. 2061). Rozwiązanie to wykazuje duże znaczenie na etapach Improve i Control w cyklu DMAIC, ponieważ gogle mogą na bieżąco kontrolować poprawność działań człowieka i automatycznie zapisywać dane. Dzięki temu produkcja jest płynna, a wady są eliminowane bezpośrednio w trakcie pracy, co pozwala w pełni utrzymać założenia Six Sigmy (Murthy, 2019, s. 619).

Istotnym elementem jest powiązanie standardów ISO z rzeczywistością mieszaną (MR) oraz techniką miksowania wideo (VST). To połączenie ma kluczowe znaczenie dla współczesnego nadzoru nad procedurami. Dzięki goglom, które rejestrują obraz z kamer i precyzyjnie łączą go z cyfrowymi elementami, audytorzy oraz inżynierowie mogą kontrolować zgodność procesów z normami bez przerywania pracy fabryki (Azuma, 1997, s. 356). Podobną rolę odgrywa projekcja obrazu, rzutująca instrukcje z projektorów bezpośrednio na stanowisko pracy, co podnosi komfort poprzez brak konieczności zakładania gogli przez operatora przy jednoczesnym zapewnieniu pełnej jakości i eliminacji pomyłek (Fast-Berglund i Gong, 2018, s. 925).

Podsumowanie

Tradycyjne podejście do systemów ISO, Six Sigma czy FMEA, opierające się na reakcji dopiero po wystąpieniu błędu, stanowi główną barierę w nowoczesnej produkcji. Klasyczne metody i procedury są ściśle określone, jednak w swojej tradycyjnej formie okazują się bardzo czasochłonne i nie zawsze pozwalają na skuteczne zapobieganie błędom wykonawczym człowieka.

W świetle nowych technologii ograniczenia te nie stanowią już takiego problemu. Systemy VR, AR i MR pozwalają na bezpieczne szkolenie pracowników w świecie 3D, wyświetlanie instrukcji krok po kroku na stanowisku pracy oraz automatyczne zapisywanie danych procesowych. Poprzez włączenie tych rozwiązań do procesów produkcyjnych można szybciej wykrywać odchylenia i eliminować wady bezpośrednio w trakcie pracy, co stanowi nowoczesne wsparcie dla inżynierii jakości oraz pozwala jednoznacznie ocenić ich wpływ na eliminację błędów ludzkich w systemach produkcyjnych.

Summary

The traditional approach to ISO, Six Sigma, or FMEA systems, which relies on a response only after an error occurs, constitutes a major barrier in modern production. Classical methods and procedures are strictly defined; however, in their traditional form, they prove to be highly time-consuming and do not always allow for the effective prevention of human execution errors.

In the light of new technologies, these limitations no longer pose such a problem. Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR), and Mixed Reality (MR) systems allow for safe employee training in a 3D environment, displaying step-by-step instructions directly at the workstation, and automatic recording of process data. By incorporating these solutions into manufacturing processes, deviations can be detected faster and defects can be eliminated directly during work, which provides modern support for quality engineering and allows for an unambiguous evaluation of their positive impact on the elimination of human errors in production systems.

Bibliografia

[1] Azuma, R. T. (1997). *A Survey of Augmented Reality*. „Presence: Teleoperators & Virtual Environments", vol. 6, no. 4, s. 355–385.
[2] Biały, W., Maruszewska, E. W., Kołodziej, S. (2017). *Analiza wadliwości produktu z wykorzystaniem metod i narzędzi inżynierii jakości*. Warszawa, s. 39
[3] Cao, J., Wang, J., Zhang, M., Liu, Y. (2025). *Emerging Technologies in Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in Manufacturing Applications*. „Applied Sciences", vol. 9, no. 9, art. 297.
[4] Fast-Berglund, Å., & Gong, L. (2018). *Testing different smart manufacturing technologies for operator support in assembly*. „Procedia Manufacturing", vol. 17, s. 921–928.
[5] Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control*, McGraw-Hill, New York, s. 7.
[6] Gorecky, D., Khamis, M., Mura, K. (2014). *Introduction of Virtual Reality Technologies into Training and Manufacturing Applications*. „Procedia Computer Science", vol. 25, s. 12–21.
[7] Hamrol, A. (2023). *Zarządzanie i inżynieria jakości. Ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
[8] Ho, P. T., Albajez, J. A., Santolaria, J., Yagüe-Fabra, J. A. (2022). *Study of Augmented Reality Based Manufacturing for Further Integration of Quality Control 4.0: A Systematic Literature Review*. „Applied Sciences", vol. 12, no. 4, art. 2061.
[9] Juran, J. M. (2003). *Juran on Leadership for Quality*, Free Press, New York.
[10] Molenda, M. (2016). *Zasady ustalania mierników procesów w systemie zarządzania jakością*. „Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji", z. 2(14), s. 243–252.
[11] Mroczko, F. (2012). *Zarządzanie jakością*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wałbrzych.
[12] Murthy, A. (2019). *Digital Lean Six Sigma: Integrating Industry 4.0 Technologies with Lean Six Sigma*. „International Journal of Lean Six Sigma", vol. 11, no. 4, s. 613–626.
[13] Rychły-Lipińska, A. (2007). *FMEA – analiza rodzajów błędów oraz ich skutków*. „Zeszyty Naukowe Wydziału Nauk Ekonomicznych", t. 1, nr 11, s. 47–59.
[14] Skrzypek, E. (2021). *Jak rozumieć jakość – w kierunku Jakości 4.0*. „Problemy Jakości", nr 3, s. 2–9.
[15] Tochwin, D. (2021). *Zastosowanie metody Six Sigma w celu doskonalenia procesów produkcyjnych*. „Akademia Zarządzania", t. 5, nr 1, s. 28–38.

[16] Wolfartsberger, J. (2019). *Analyzing the potential of virtual reality for engineering design review*. „Automation in Construction", vol. 104, s. 20–30.

Netografia

[17] *Analiza rodzajów i skutków uszkodzeń (FMEA i FMECA) wprowadziła kilka zmian w analizie FMEA,* https://pq-fmea.pl/nowe-fmea/ (data dostępu 16.06.2026)
[18] Jeffery, A. (2022). *Rzeczywistość rozszerzona w Przemyśle 4.0*, https://knowhow.distrelec.com/pl/przemysl-it-i-cyfrowy/rzeczywistosc-rozszerzona-w-przemysle-4-0/ (data dostępu 16.06.2026)
[19] *Organizacja ISO opublikowała standard dotyczący metodologii Six Sigma*, Portal Malon Group, 14.11.2011, https://www.iso.org.pl/artykuly-i-informacje-dotyczace-systemow-zarzadzania/iso-13053-six-sigma/ (data dostępu 16.06.2026)

Ottavio Spadaro, Tiziana Cataldo, Agata Matarazzo

Department of Economics and Business
University of Catania, Italy

Sonia Azzaro, Rosa Caponetto

Department of Civil Engineering and Architecture
University of Catania, Italy

LCA FOR ENVIRONMENTAL QUALITY ASSESSMENT IN CONSTRUCTION: A SICILIAN CASE STUDY

Abstract

This paper presents a methodological framework for applying Life Cycle Assessment (LCA) to the evaluation of environmental performance in the construction sector, with a specific focus on earthen plasters developed within the ITER research project. The construction industry is responsible for a significant share of global energy consumption and greenhouse gas emissions, making the adoption of sustainability-oriented assessment tools increasingly relevant. In this context, LCA represents a well-established methodology to support decision-making processes by analyzing material and energy flows across the entire life cycle of building products. The study adopts an attributional and ex-ante LCA approach, in accordance with ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006 standards, focusing on the preliminary construction of the Life Cycle Inventory (LCI). The case study concerns a Sicilian small and medium-sized enterprise specialized in natural building materials, involved in the development of an innovative earthen plaster composed of local raw earth, natural aggregates, vegetal fibers, and a recycled mineral by-product (marble sludge). Results highlight the structure of the production system and identify the main input-output flows across the life cycle phases, from raw material supply to end-of-life scenarios. Particular attention is given to the use of local resources and the potential recyclability of the material, in line with circular economy principles. Although impact assessment is not yet performed, the study demonstrates the relevance of LCA as a supporting tool for improving environmental quality in construction processes. Future research will focus on completing data collection and conducting the Life Cycle Impact Assessment (LCIA) to enable quantitative evaluation and comparison with conventional materials. The study further discusses managerial implications for sustainable production quality management,

illustrating how LCA-derived environmental information and circularity metrics can support strategic decision-making processes for SMEs in the construction sector.

Introduction

The construction sector is one of the most environmentally impactful productive sectors globally, accounting for approximately 40% of final energy consumption and 35% of total carbon dioxide emissions (European Commission, 2020). In addition, the significant generation of construction and demolition (C&D) waste constitutes more than 30% of total waste produced annually in the European Union, with recovery and recycling rates still below the sector's potential (European Commission, 2021). In this context, the growing attention to sustainable development models has made it necessary to adopt methodological tools capable of systematically and comparably evaluating the environmental performance of building materials and processes throughout their entire life cycle. Among these, the Life Cycle Assessment (LCA) methodology, defined by ISO 14040 and ISO 14044 standards, represents one of the most established approaches for supporting design and production decisions oriented toward improving environmental quality in the construction sector.

Circular Economy in the Construction Sector

Within the framework of European sustainability policies, the circular economy is configured as a regenerative paradigm aimed at overcoming the linear production and consumption model based on the sequence "extract–produce–dispose" (Kirchherr et al., 2017). It promotes strategies for reducing resource use, reuse, recycling, and material recovery, with relevance for the construction sector (Benachio et al., 2020).

The Circular Economy Action Plan (CEAP 2020) of the European Commission identifies the construction sector among those with highest priority for the implementation of such strategies, highlighting the importance of interventions oriented toward reducing embodied emissions, increasing the use of secondary materials, and developing short supply chains (European Commission, 2020).

At the operational level, the recent standard UNI/TS 11820:2024 provides a structured methodological framework for measuring circularity at the organizational level, through a system of indicators articulated along the dimensions of input, process, and output, consistent with the principles outlined by ISO 59004:2024. Recent scientific literature has begun to explore the operational application of such indicators in the Sicilian construction context. Results show that even small and medium-sized enterprises in the sector can achieve significant levels of circularity through short supply chain strategies and valorization of local by-products (Matarazzo et al., 2025). Similar analyses have been developed with reference to case studies in the finishing materials and natural building materials sector (Spadaro et al., 2025a). Further contributions have examined the role of circularity indicators in assessing the environmental performance of local production systems (Spadaro et al., 2026a; Spadaro et al., 2026b). These tools are complementary to

the LCA approach, enabling an integrated assessment of both environmental performance and circularity level of production systems in the construction sector.

Earthen Materials and Sustainable Construction

Among the most promising solutions for reducing environmental impacts in the construction sector are raw earth-based materials, used since antiquity in various geographical areas through techniques such as rammed earth (pisé), adobe, Compressed Earth Blocks (CEB), cob, and natural plasters. In recent decades, these techniques have experienced renewed scientific and design interest, driven by the need to reduce embodied CO_2 emissions in the built environment (Tarhan et al., 2024). A further motivation lies in the growing attention to lowenergy-content materials with reduced environmental impact throughout the life cycle (Coelho et al., 2024).

Raw earth is characterized by high recyclability, limited energy requirements during extraction and processing phases, and the possibility of reuse at end of life, making it a material consistent with circular economy principles (Morel et al., 2021). More recent studies have also highlighted the role of earth-based materials in reducing embodied emissions and improving the overall environmental performance of buildings (Montalbano et al., 2024).

From a performance standpoint, unstabilized earthen plasters exhibit significant hygroscopic capacity, contributing to the regulation of indoor relative humidity and improvement of living comfort without recourse to mechanical climate control systems (Gomes et al., 2022). These properties are particularly relevant in the Mediterranean context, characterized by high seasonal thermo-hygrometric fluctuations (Santos et al., 2023). The integration of natural fibers, such as hemp or sisal, also enables an increase in vapor permeability and improvement of the mechanical performance of the mix, contributing to reduced cracking risk and improved durability (Laborel-Préneron et al., 2018). More recent research has confirmed the effectiveness of local vegetal fibers in enhancing the thermophysical and mechanical performance of raw earthen plasters (Belarbi et al., 2024).

Numerous Life Cycle Assessment studies show that earth-based materials can achieve significantly lower environmental impact levels compared to conventional materials, especially when locally sourced and with a low content of high embodied-energy binders (Arduin et al., 2022). More recent comparative analyses have further confirmed these results, emphasizing the potential of earth-based materials to support decarbonization strategies in the construction sector (Coelho et al., 2024).

The ITER Project and Study Objectives

In this framework of transition toward more sustainable production models, the ITER project – Intonaci di Terra Ecologici Riciclabili (Ecological and Recyclable Earthen Plasters) – promoted by the University of Catania and funded by the Italian Ministry of

Environment and Energy Security (MASE) under the "Non Serviti" call (2021 edition), represents a significant research initiative.

The project aims to develop and validate innovative raw earth plasters additivated with local agricultural fibers, particularly Agave sisalana, and with by-products of the stone processing industry such as marble sludge, with the objective of improving their mechanical, thermal, and durability performance, while simultaneously enhancing their sustainability and circularity profile. The mix developed features a predominantly local supply chain and a high percentage of natural and renewable materials, making it a significant case study for the analysis of environmental performance in the building finishing sector.

Considering these premises, this paper aims to outline the methodological framework of a Life Cycle Assessment applied to an innovative raw earth plaster developed in a Sicilian production context, highlighting the role of LCA as a supporting tool for improving environmental quality in the construction sector.

Materials and Methods

To analyze the environmental performance of the plaster prototype developed within the ITER project, the research adopts a methodological approach based on Life Cycle Assessment (LCA). The LCA methodology enables a systematic structuring of material and energy flows associated with building products throughout their entire life cycle (Hauschild et al., 2018). This approach is consistent with the principles of the circular economy applied to the construction sector (Morel et al., 2021). At this stage of the study, the focus is on defining the methodological framework and constructing a preliminary Life Cycle Inventory, considered as the knowledge base for subsequent impact quantification phases.

LCA Methodological Framework

This study applies the LCA methodology in accordance with ISO 14040:2006 and ISO 14044:2006 standards, which articulate the process into the phases of goal and scope definition, inventory analysis (LCI), impact assessment (LCIA), and interpretation of results (ISO, 2006a; ISO, 2006b).

The analysis is configured as an attributional ex-ante LCA, as it refers to a product still in its prototypal and not yet fully industrialized phase. This approach is particularly suitable for describing the physical flows of specific production systems and for establishing future comparative studies (Hauschild et al., 2018).

The system boundaries are defined following a cradle-to-cradle logic, including the phases of raw material sourcing, mix production, on-site application, and potential end-of-life management. This framework reflects the design orientation of the prototype, conceived to facilitate material recovery and reuse, in line with recent LCA applications to raw earthen construction materials (Fernandes et al., 2019).

The functional unit is defined as 1 m² of plastered wall surface, a value commonly adopted in LCA studies on plasters and building coatings to ensure comparability of results (Melià et al., 2014).

At this preliminary stage, the analysis focuses exclusively on the construction of the Life Cycle Inventory, aimed at mapping processes and input-output flows, while the quantification of environmental impacts will be the subject of future developments.

Case Study: Company Presentation

The empirical study is conducted at a small cooperative enterprise operating in the natural building finishing sector, located in the Mediterranean context and characterized by a production orientation toward the use of local materials and low-environmental-impact construction solutions.

The company represents a significant example of the experimentation of sustainable production models among SMEs in the building sector, thanks to the presence of internal research and development activities dedicated to the formulation of raw earth plasters and mortars. Over the years, the enterprise has progressively oriented its activities toward bioconstruction, integrating traditional knowledge and technical innovation.

Within the ITER project, a demonstrative prototype was built consisting of an experimental box plastered both internally and externally, used as a case study for the LCA analysis setup. This configuration allows the main phases of the product's life cycle to be observed under real conditions, from mix preparation to application, through to the possible end-of-life management modes.

The plaster prototype analyzed is composed of a mix based on predominantly natural and locally sourced materials. Specifically, the composition includes local earth (Terra di Floridia) (30%), natural aggregates (Azolo) (59.5%), marble sludge (10%), and sisal vegetal fibers (0.5%), while water is added during application at a rate of 18% relative to the dry total. Among the components, marble sludge represents the only secondary raw material, derived as a byproduct of marble processing and reused without further chemical transformations, contributing to the reduction of virgin resource consumption and the valorization of waste streams.

The data necessary for constructing the Life Cycle Inventory were collected through interviews with company technicians, direct observation of production processes, and analysis of internal documentation, with integration of secondary sources where primary data were not available.

Results and Discussion

This section presents the preliminary results of the study, with reference to the construction of the Life Cycle Inventory of the ITER plaster prototype. In line with the exploratory objective of the contribution, the analysis focuses on describing the structure of the production system and identifying the main material and energy flows, without proceeding at this stage to the quantification of environmental impacts.

The inventory setup represents a fundamental step in LCA studies applied to building materials, as it allows the system boundaries and main methodological assumptions to be defined (Hauschild et al., 2018).

LCA Inventory Structure

The Life Cycle Inventory was organized according to the main phases of the production system, including raw material sourcing, mix production operations, the application phase, and the possible end-of-life management modes.

Primary data were acquired through interviews with company technicians and direct observation of production activities, while some information is still in the data collection phase due to the prototypal state of the product. The inventory therefore distinguishes between flows already identified and flows for which quantification will be defined in subsequent research phases.

Attention is paid to the use of local raw materials and mineral by-products. These elements are consistent with scientific evidence regarding the environmental potential of raw earthen construction materials (Fernandes et al., 2019). The possibility of material recovery at end of life also represents a relevant element from the perspective of circularity in building systems (Morel et al., 2021). Table 1 summarizes the preliminary structure of the LCA inventory.

Table 1. Preliminary LCA inventory structure of the ITER plaster prototype

Phase	Process	Main Flows	Data Type
Raw materials	Extraction and sourcing	Local raw earth, natural aggregates, vegetal fibers, mineral by-products	Primary (partly TBD)
Transport	Transport of raw materials to plant	Road transport	Secondary
Production	Mix preparation	Electrical energy for sieving and mixing, water consumption, packaging materials	Primary/Secondary
Application	On-site application	Mixing water, manual tools	Primary
Use	Use phase	Minimal maintenance	Qualitative assumption
End of life	Removal and recovery	Potential material reuse through sieving	Design assumption

Managerial Implications for Sustainable Production Quality Management

The preliminary Life Cycle Inventory (LCI) developed within this study represents not only a technical basis for future environmental impact assessment, but also a useful

managerial tool for supporting sustainability-oriented decision-making in construction SMEs. By systematically mapping material and energy flows throughout the product life cycle, the LCI provides a structured knowledge framework that can assist managers in identifying critical processes, improving resource efficiency, and integrating environmental considerations into quality management practices.

A first managerial implication concerns supply chain governance. The inventory analysis highlights the strategic relevance of raw material sourcing within the production system. The use of locally available earth, natural aggregates, vegetal fibres, and recycled mineral by-products reflects a procurement model based on short supply chains and resource traceability. From a quality management perspective, these characteristics can support supplier evaluation and selection processes, reduce logistics-related uncertainties, and strengthen the environmental profile of the final product.

A second implication relates to the design of circular production strategies. The mapping of material flows reveals the potential for recovering and reusing materials at the end of the product life cycle, in line with circular economy principles. Preliminary assessments conducted within the broader ITER research activities further indicate that circular end-of-life strategies may substantially reduce the overall environmental burden of the production system compared with conventional disposal options. Consequently, managers may consider investments in design-for-recovery solutions and material valorisation practices as part of long-term sustainability strategies.

A further managerial consideration emerges from the integration of LCA and circularity assessment approaches. The inventory structure developed for the ITER plaster can be combined with organizational circularity indicators, such as those proposed by UNI/TS 11820:2024, to support continuous improvement processes. In this perspective, circularity indicators can function as operational performance measures, enabling firms to monitor resource efficiency, waste reduction practices, and the progressive adoption of circular economy principles within their production systems.

Overall, the study suggests that life cycle thinking can support sustainable production quality management by providing evidence-based information for strategic and operational decisions. For SMEs operating in the natural building materials sector, the integration of LCA methodologies and circular economy indicators may contribute to improving environmental performance, strengthening competitiveness, and facilitating alignment with emerging sustainability requirements in the construction industry.

Summary

This paper has presented the methodological framework of an LCA study applied to a raw earth plaster prototype developed within the ITER project. The analysis focused on defining the methodological framework and constructing a preliminary Life Cycle Inventory as the basis for subsequent phases of environmental impact quantification.

The case study highlights the potential of SMEs in the construction sector to adopt sustainable building solutions based on the use of natural and local materials. In particular, the absence of energy-intensive thermal processes and the possibility of material recovery at end of life represent relevant elements from the perspective of the transition toward

circular production models. The study also highlights the managerial relevance of life cycle thinking in supporting sustainable production quality management. The Integration of LCA-based life cycle information and UNI/TS 11820:2024 circularity indicators offer SMEs a practical framework for supporting supply chain governance, resource efficiency improvement, and the development of circular production strategies.

Future research activities will be oriented toward completing the collection of primary data and developing the Life Cycle Impact Assessment phase, to quantify the environmental performance of the prototype and support potential comparisons with conventional building solutions.

Acknowledgements

This contribution is part of the research project "ITER-Intonaci di Terra Ecologici Riciclabili" (CUP E63C23001320006), Bando "Non serviti"- Ed. 2021, funded by the MASE (Ministry of the Environment and Energy Security, ex MITE) of Italy - Direzione Generale Economia Circolare e Bonifiche (ex Direzione Generale Economia Circolare).

References

[1] Arduin, D., Caldas, L. R., Paiva, R. L. M., and Rocha, F. (2022). Life Cycle Assessment (LCA) in Earth Construction: A Systematic Literature Review Considering Five Construction Techniques. Sustainability, 14(20), 13228.

[2] Belarbi, Y. E., Ferroukhi, M. Y., Issaadi, N., Poullain, P., and Bonnet, S. (2024). Assessment of hygrothermal performance of raw earth envelope at overall building scale. Energy and Buildings, 310, 114119.

[3] Benachio, G. L. F., Freitas, M. de C. D., and Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production, 260, 121046.

[4] Coelho, M., Vieira, D., Branco, F., and Silvestre, J. (2024). Sustainable Earthen Construction: A Meta-Analytical Review of Environmental, Mechanical, and Thermal Performance. Buildings, 15(6), 918.

[5] European Commission (2020). Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: European Union Publications Office.

[6] European Commission (2021). Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. Brussels: European Union Publications Office.

[7] Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R., and Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: rammed earth and compressed earth blocks. Journal of Cleaner Production, 241, 118286.

[8] Gomes, M. I., Lima, J., Santos, T., Gomes, J., and Faria, P. (2022). The Benefits of Ecoefficient Plasters for Occupant's Health – A Case Study. In J. A. Malik and S. Marathe (Eds.), Ecological and Health Effects of Building Materials. Springer, Cham.

[9] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., and Olsen, S. I. (Eds.) (2018). Life Cycle Assessment: Theory and Practice. Springer.

[10] ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva.

[11] ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva.

[12] ISO 59004:2024. Circular economy – Vocabulary, principles and guidance for implementation. Geneva.
[13] Kirchherr, J., Reike, D., and Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation & Recycling, 127.
[14] Laborel-Préneron, A., Magniont, C., and Aubert, J. E. (2018). Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. Energy and Buildings, 178, 265–278.
[15] Matarazzo, A., Spadaro, O., Costanzo, M. R., and Garraffo, F. (2025). Quantification of Circular Economy Indicators in the Construction Sector in Sicily. AGSREN, 1, 70–71. Prague, Czech Republic.
[16] Melià, P., Ruggieri, G., Sabbadini, S., and Dotelli, G. (2014). Environmental impacts of natural and conventional building materials: a case study on earth plasters. Journal of Cleaner Production, 80, 179–186.
[17] Montalbano, G., et al. (2024). Rammed Earth Construction: A Circular Solution for Sustainable Building. Proceedings of International Structural Engineering and Construction, 11(1).
[18] Morel, J.-C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., and Bui, Q.-B. (2021). Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome. Philosophical Transactions B, 376, 20200182.
[19] Santos, T., Lima, J., and Faria, P. (2023). Evaluation of the Hygroscopic and CO_2 Capture Capacities of Earth and Gypsum-Based Plasters. Construction and Building Materials, 370, 130660.
[20] Spadaro, O., Matarazzo, A., Costanzo, M. R., Garraffo, F., and Sołtysik, M. (2025a). An indicator of circularity in the construction sector. Procedia Environmental Science, Engineering and Management, 4, 1303–1310.
[21] Spadaro, O., Cataldo, T., Azzaro, S., Matarazzo, A., and Caponetto, R. (2026a). UNI/TS 11820 and plaster circularity: operational experience of a Sicilian enterprise. XLI National AIDEA Conference, 22–23 January 2026, Milan, Italy.
[22] Spadaro, O., Matarazzo, A., and Cataldo, T. (2026b). Circularity assessment indicators in sustainable construction sector. International Conference on Bioeconomy, Sustainability and Industrial Waste Valorization (ICBSIWV-26), 4–5 February 2026, Bali, Indonesia.
[23] Tarhan, Y., Tarhan, İ. H., Craveiro, F., and Bartolo, H. (2024). Building a Sustainable Future: Examining the Impact of Earth-Based Materials on Civil Engineering Development. In J. R. C. S. Galvão et al. (Eds.), Proceedings of ICoWEFS 2023. Springer, Cham.
[24] UNI (2024). UNI/TS 11820:2024. Measurement of circularity – Methods and indicators for measuring circular processes in organizations. Milan.
[25] Ventura, A., Ouellet-Plamondon, C., Röck, M., Hecht, T., Roy, V., Higuera, P., Lecompte, T., Faria, P., Hamard, E., Morel, J.-C., and Habert, G. (2022). Environmental potential of earthbased building materials: Key facts and issues from a life cycle assessment perspective. In A. Fabbri, J.-C. Morel, J.-E. Aubert, Q.-B. Bui, D. Gallipoli, and B. V. V. Reddy (Eds.), Testing and characterisation of earth-based building materials and elements (RILEM State-of-the-Art Reports, Vol. 35, pp. 261–296). Springer, Cham.

Anna Świątek

Koło Zarządzania Jakością
Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie

SYSTEM ZARZĄDZANIA CYBERBEZPIECZEŃSTWEM W ORGANIZACJI WEDŁUG WYMAGAŃ NORMY ISO/SAE 21434:2021 - POJAZDY DROGOWE - INŻYNIERIA CYBERBEZPIECZEŃSTWA

CYBERSECURITY MANAGEMENT SYSTEM IN AN ORGANIZATION ACCORDING TO ISO/SAE 21434:2021 ROAD VEHICLES - CYBERSECURITY ENGINEERING

Streszczenie

W artykule omówiono, jakie działania stosowane są w branży motoryzacyjnej by chronić współczesne samochody przed cyberatakami. Omówiono wymagania normy ISO/SAE 21434:2021, w której określono zasady projektowania bezpiecznych pojazdów - od początkowych pomysłów aż po moment wycofania auta z użycia. Przedstawiono metody wykrywania zagrożeń i oceny ryzyka (TARA), a także sposoby klasyfikowania ataków przy pomocy metod STRIDE i DREAD. W artykule wskazano, że skuteczna ochrona pojazdu wymaga współpracy pracowników całej organizacji, od inżynierów aż po kadrę kierowniczą.

Abstract

The article describes how the automotive industry protects modern vehicles against cyberattacks. It discusses the ISO/SAE 21434:2021 standard, which defines rules for designing secure vehicles throughout their entire lifecycle. The paper presents Threat Analysis and Risk Assessment (TARA) methods, as well as approaches to classifying attacks using STRIDE and DREAD methodologies. The article emphasises that effective

vehicle protection requires the involvement of the entire organisation - from engineers to management.

Wstęp

Nowoczesny samochód to nie tylko silnik i koła, lecz skomplikowany system komputerowy na kołach. Współczesne pojazdy wyposażone są nawet w ponad 150 jednostek sterowania elektronikami (ECU - Electronic Control Units), czyli małych komputerów zarządzających różnymi funkcjami auta, od hamulców po klimatyzację. Komunikują się one ze sobą wewnątrz pojazdu przez sieci CAN, a także łączą się ze światem zewnętrznym przez Bluetooth, Wi-Fi, 4G/5G oraz systemy V2X (Vehicle-to-Everything, czyli pojazd łączy się ze wszystkim) (Kasprzyk, 2024).

Ta rozbudowana cyfrowa architektura sprawia, że samochód staje się coraz bardziej podatny na ataki hakerów. Przykłady z ostatnich lat pokazują, że zagrożenie jest jak najbardziej realne. W 2015 roku firma Chrysler musiała wycofać aż 1,4 miliona pojazdów, ponieważ badacze wykryli lukę, która pozwalała przez internet zdalnie przejąć kontrolę, włącznie z hamulcami i kierownicą (Miller i Valasek, 2015). Model Tesla S został zdalnie przejęty z odległości ponad 19 kilometrów (Tencent Keen Security Lab, 2016). Raport z 2023 roku wskazuje, że aż 97% ataków na pojazdy było przeprowadzanych zdalnie, a 70% spośród nich to ataki z dużej odległości (Siddiqui i in., 2023). Cyberbezpieczeństwo stało się zatem jednym z kluczowych wyzwań branży motoryzacyjnej.

W odpowiedzi na te zagrożenia organizacje normalizacyjne SAE International oraz ISO opublikowały w 2021 roku normę ISO/SAE 21434:2021, która określa, jak należy projektować bezpieczne pojazdy na wszystkich etapach ich życia - od momentu powstania koncepcji, przez produkcję, aż po wycofanie z użycia. Norma ta uzupełnia wcześniejszy standard ISO 26262, który dotyczy bezpieczeństwa funkcjonalnego, ale nie zajmuje się bezpieczeństwem przed atakami z zewnątrz.

Celem niniejszego artykułu jest omówienie tej normy w przystępny sposób - wyjaśnienie, jak identyfikuje się zagrożenia, jak ocenia się ryzyko oraz jakie mechanizmy ochrony stosuje się w praktyce.

Założenia normy ISO/SAE 21434:2021

Norma ISO/SAE 21434:2021 jest następcą wcześniejszych wytycznych SAE J3061 i stanowi pierwszy pełny standard branży motoryzacyjnej poświęcony wyłącznie cyberbezpieczeństwu. Jej głównym celem jest ustrukturyzowanie procesu projektowania pojazdów tak, aby były one możliwie odporne na ataki, a gdyby atak się udał, firma wiedziałaby, jak na niego zareagować (Khan, Bryans i Sabaliauskaite, 2022).

Norma dzieli życie pojazdu na trzy fazy:

– faza koncepcji - na tym etapie określa się, czym jest dany system w pojeździe (np. układ hamulcowy, system nawigacji), jakie dane przetwarza i jakie zagrożenia mogą go dotyczyć,

- faza projektowania i produkcji - inżynierowie pracują na różnych poziomach szczegółowości: od całego systemu, przez elementy elektroniczne, aż po oprogramowanie. na każdym etapie uwzględniane są wymagania bezpieczeństwa,
- faza eksploatacji i wycofania - po wprowadzeniu pojazdu na rynek producent nadal monitoruje nowe zagrożenia, wydaje aktualizacje oprogramowania i reaguje na incydenty bezpieczeństwa (ISO/SAE 21434:2021).

Ważną cechą normy jest to, że obejmuje cały łańcuch dostaw. Producent główny (OEM) odpowiada za cyberbezpieczeństwo całego pojazdu - nawet jeśli dana część pochodzi od zewnętrznego dostawcy. Oznacza to, że firma musi stawiać jasne wymagania swoim podwykonawcom i sprawdzać, czy je spełniają. Jest to szczególnie istotne, ponieważ współczesny samochód składa się z tysięcy komponentów dostarczanych przez dziesiątki różnych firm.

Warto również wspomnieć, że norma ściśle współgra z regulacją UNECE WP.29 (Rozporządzenie nr 155), która od 2022 roku jest obowiązkowa dla nowych typów pojazdów w Unii Europejskiej, Japonii i Korei. Regulacja ta wymaga od producentów wdrożenia systemu zarządzania cyberbezpieczeństwem przez cały cykl życia pojazdu, a ISO/SAE 21434:2021 jest uznaną metodą spełnienia tych wymagań.

Analiza zagrożeń i ocena ryzyka (TARA)

Centralnym narzędziem normy ISO/SAE 21434:2021 jest metoda TARA (Threat Analysis and Risk Assessment - Analiza Zagrożeń i Ocena Ryzyka). Mówiąc prościej: TARA to proces, który pomaga odpowiedzieć na pytanie „Co złego może się stać z tym systemem, jak bardzo jest to prawdopodobne i co z tym zrobić?" (Macher i in., 2018).

3) Krok 1: Co można zaatakować?

Na początku identyfikuje się tzw. zasoby (ang. assets) - czyli to, co jest wartościowe i co haker mógłby chcieć zaatakować lub zniszczyć. W samochodzie są to np. dane z GPS, dane diagnostyczne, system hamulcowy czy system kierownicy. Dla każdego zasobu określa się, co się może stać, gdy zostanie naruszone – czy może to zagrażać życiu kierowcy, naruszać prywatność czy pociągnąć odpowiedzialność prawną (Khan i in., 2022).

4) Krok 2: Jak można to zaatakować? – metoda STRIDE

Następnie opisuje się konkretne sposoby ataku. Służy do tego metodologia STRIDE, opracowana przez Microsoft. Nazwa to skrót od sześciu rodzajów zagrożeń (Microsoft Security Architecture, 2020):

- spoofing - podszywanie się pod inne urządzenie lub użytkownika (np. haker „udaje" zaufaną stację benzynową, do której łączy się auto),
- tampering - modyfikacja danych (np. zmiana poleceń wysyłanych do hamulców),
- repudiation - wyparcie się działania (ukrycie śladów ataku w logach systemowych),
- Information Disclosure - ujawnienie informacji (np. wyciek danych o lokalizacji pojazdu),

– denial of Service - unieruchomienie systemu (np. zablokowanie dostępu do systemu zapłonu),
– elevation of Privilege - eskalacja uprawnień (np. uzyskanie dostępu do sterowania jazdą przez oprogramowanie, które normalnie tego nie powinno mieć).

5) Krok 3: Jak poważne jest ryzyko? - metoda DREAD

Po zidentyfikowaniu zagrożeń należy ocenić, jak bardzo są one niebezpieczne. Służy do tego metoda DREAD, w której każde zagrożenie ocenia się według pięciu kryteriów, każde w skali punktowej (Microsoft Security Architecture, 2020):

– damage (szkoda) - jak poważne byłyby skutki ataku?
– reproducibility (powtarzalność) - jak łatwo można atak powtórzyć?
– exploitability (podatność na eksploatację) - jak trudno jest przeprowadzić atak?
– affected users (dotknięci użytkownicy) - jak wiele osób ucierpi?
– discoverability (wykrywalność) - jak łatwo można tę lukę znaleźć?

Tabela 1. Klasyfikacja ryzyka według metody DREAD

Wynik DREAD	Poziom ryzyka	Zalecana reakcja
8–9 pkt	bardzo wysokie	natychmiastowe działanie
6–7 pkt	wysokie	pilne wdrożenie zabezpieczeń
4–5 pkt	średnie	planowe usunięcie w następnym cyklu
0–3 pkt	niskie	monitoring, akceptacja ryzyka

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Siddiqui i in., 2023, s. 5).

Wyniki są sumowane, a zagrożenia z wynikiem 8-9 punktów traktowane są jako bardzo wysokie, 6-7 jako wysokie, 4-5 jako średnie, a niższe jako niskie lub pomijalnie małe (Microsoft Security Architecture, 2020).

6) Krok 4: Co zrobić z ryzykiem?

Po ocenie ryzyka należy zdecydować, jak na nie zareagować. Norma przewiduje cztery opcje: uniknięcie ryzyka (usunięcie zagrożonego komponentu lub funkcji), zmniejszenie ryzyka (wdrożenie odpowiednich zabezpieczeń), przeniesienie ryzyka (np. drogą umowy na dostawcę komponentu) lub świadoma akceptacja ryzyka, gdy jest on na tyle mały, że nie opłaca się inwestować w zabezpieczenia. Ważne jest, że nawet po zastosowaniu zabezpieczeń zawsze zostaje pewne tzw. ryzyko szczątkowe - żadne zabezpieczenie nie daje 100% gwarancji, dlatego musi być ono także uwzględniane (Ward, 2020).

Najważniejsze zagrożenia i sposoby ochrony

Systemy V2X - łączność z otoczeniem

Systemy V2X (Vehicle-to-Everything) pozwalają samochodowi „rozmawiać" z innymi pojazdami (V2V), z drogą i sygnalizacją (V2I), z pieszymi (V2P) oraz z siecią internetową (V2N). To duża wygoda i szansa dla bezpieczeństwa ruchu, ale równocześnie

poważne ryzyko. Haker może np. podszywać się pod sygnały drogowe, fałszować dane o ruchu ulicznym albo przeciążyć system tysiącami fałszywych wiadomości (atak DoS - Denial of Service), co może spowolnić lub załamać komunikację (He i Lang, 2022).

Podstawowe sposoby ochrony to szyfrowanie wiadomości, podpisy cyfrowe (potwierdzające, że wiadomość pochodzi z wiarygodnego źródła) oraz systemy monitorowania ruchu sieciowego, które potrafią wykrywać nieprawidłowe wzorce zachowania (He i Lang, 2022).

Wewnętrzna sieć pojazdu

Wewnątrz samochodu komputery komunikują się głównie przez magistralę CAN (Controller Area Network). Problem polega na tym, że sieć CAN była projektowana dziesiątki lat temu i nie uwzględniała cyberbezpieczeństwa, nie ma tam uwierzytelniania ani szyfrowania. Jeśli hakerowi uda się podłączyć do tej sieci (np. przez port diagnostyczny OBD-II w samochodzie lub przez zainfekowane oprogramowanie), może wysyłać fałszywe polecenia do dowolnego systemu pojazdu, w tym do hamulców czy układu kierowniczego.

Poważnym wektorem ataku są również aktualizacje oprogramowania OTA (Over-the-Air) - pobierane przez internet tak jak aktualizacje telefonu. Jeśli proces ten nie jest odpowiednio zabezpieczony, haker mógłby podsunąć pojazdowi złośliwe oprogramowanie. Dlatego norma ISO/SAE 21434:2021 wymaga stosowania tzw. secure boot (bezpieczny start systemu) oraz weryfikacji kryptograficznej - auto sprawdza podpis cyfrowy każdej aktualizacji przed jej zainstalowaniem (Microsoft Security Architecture, 2020).

Organizacyjny system zarządzania cyberbezpieczeństwem (CSMS)

Postanowienia normy ISO/SAE 21434:2021 traktują cyberbezpieczeństwo nie jako jednorazowy projekt, lecz jako ciągły proces, który trwa przez całe życie pojazdu. Producent musi wdrożyć system zarządzania cyberbezpieczeństwem (CSMS), który obejmuje zasady, procedury, role pracowników i zakres ich odpowiedzialności.

Szczególnym wyzwaniem jest to, że pojazdy są użytkowane przez 15-20 lat. Przez ten czas mogą pojawiać się nowe metody ataku, o których nie było wiadomo w chwili projektowania samochodu. Producent musi więc stale monitorować nowe podatności i reagować na nie, na przykład przez aktualizacje oprogramowania.

W normie zawarto wymaganie posiadania specjalnego zespołu PSIRT (Product Security Incident Response Team), który reaguje na incydenty bezpieczeństwa dotyczące sprzedanych już pojazdów. Działa on podobnie jak znane z branży IT zespoły CSIRT. Firma musi mieć opracowany plan działania na wypadek ataku - od jego wykrycia, przez odizolowanie zagrożenia, aż po przywrócenie normalnego działania i analizę tego, co poszło nie tak (Schmittner i Macher, 2021).

W normie podkreślono również, że technika i procedury to nie wszystko - ogromne znaczenie ma kultura organizacyjna. Pracownicy na wszystkich szczeblach powinni

rozumieć zagrożenia i traktować cyberbezpieczeństwo jako stały element swojej pracy, a nie tylko wymóg prawny (Schmittner i Macher, 2021).

Wyzwania i kierunki rozwoju

Wdrożenie normy ISO/SAE 21434:2021 napotyka w praktyce kilka istotnych trudności. Po pierwsze, trudno jest precyzyjnie oszacować, jak skuteczne są wdrożone zabezpieczenia. Nawet po zastosowaniu środków ochronnych pozostaje ryzyko szczątkowe, które może być wyższe niż oczekiwane. Aby to uwzględnić, można stosować modelowanie matematyczne - np. grafy przepływu - które pozwalają obliczyć i porównać ryzyko przed i po zastosowaniu zabezpieczenia (Ward, 2020).

Po drugie, pojazdy coraz częściej komunikują się z urządzeniami IoT (Internet of Things) - czujnikami drogowymi, latarniami, systemami parkingowymi. Urządzenia te mają często słabe zabezpieczenia i ograniczone możliwości obliczeniowe, co utrudnia zastosowanie zaawansowanej kryptografii. Rozwiązaniem może być tzw. adaptacyjne zarządzanie bezpieczeństwem - system dynamicznie dostosowuje poziom ochrony do bieżącego zagrożenia, zmniejszając obciążenie urządzeń w spokojnych warunkach (Kasprzyk, 2024).

Po trzecie, koordynacja wymagań bezpieczeństwa w rozbudowanym łańcuchu dostaw jest ogromnym wyzwaniem logistycznym i organizacyjnym. Kiedy pojazd składa się z komponentów od setek dostawców, zapewnienie jednolitych standardów bezpieczeństwa we wszystkich ogniwach łańcucha wymaga zaawansowanych systemów zarządzania i audytu.

Podsumowanie

Norma ISO/SAE 21434:2021 to narzędzie dla branży motoryzacyjnej do zastosowania w organizacjach wobec rosnących zagrożeń w cyberprzestrzeni. Wskazano w niej, jak konstruować samochód tak, aby był jak najtrudniejszy do hakowania, a gdyby atak się jednak udał, to jak szybko i skutecznie można byłoby zareagować.

Głównym narzędziem jest metoda TARA, która łączy modelowanie zagrożeń metodą STRIDE z ich oceną punktową DREAD i planowaniem odpowiednich środków zaradczych. Skuteczna ochrona wymaga jednak czegoś więcej niż dobrych narzędzi - wymaga zaangażowania całej organizacji i jej dostawców, ciągłego monitorowania zagrożeń przez cały okres eksploatacji pojazdu oraz kultury, w której cyberbezpieczeństwo jest traktowane poważnie na każdym szczeblu.

Przyszłe badania powinny skupiać się na automatyzacji procesu TARA, lepszym testowaniu zabezpieczeń w realistycznych warunkach oraz na optymalizacji algorytmów sztucznej inteligencji do wykrywania ataków w środowiskach o ograniczonych zasobach obliczeniowych.

Summary

ISO/SAE 21434:2021 is the automotive industry's answer to growing cybersecurity threats. It defines how vehicles should be designed to resist cyberattacks and how manufacturers should respond when incidents occur. The central tool is the TARA method, which combines threat modelling (STRIDE) with risk scoring (DREAD) and countermeasure planning. Effective protection requires more than good tools – it requires organisation-wide commitment, continuous monitoring throughout the vehicle's lifetime, and a culture in which cybersecurity is taken seriously at every level.

Bibliografia

[1] He X., Lang W., V2X Cybersecurity: Threats, Security Requirements and Mitigation Measures, IEEE Communications Standards Magazine, 2022, vol. 6, nr 2, s. 42–49.
[2] ISO/SAE 21434:2021, Road vehicles — Cybersecurity engineering, International Organization for Standardization / SAE International, 2021.
[3] Kasprzyk Z., Wybrane aspekty cyberbezpieczeństwa w inteligentnych środkach transportu, „Journal of KONBIN", 2024, vol. 54, nr 1, s. 73–91.
[4] Khan A., Bryans J., Sabaliauskaite G., Framework for Calculating Residual Cybersecurity Risk of Threats to Road Vehicles in Alignment with ISO/SAE 21434:2021, Computer Security – ACNS 2022 Workshop, Lecture Notes in Computer Science, vol. 13285, s. 235–247.
[5] Macher G., Sporer H., Brenner E. Et al., Supporting Cyber-Security Threat Analysis and Risk Assessment in Automotive Product Development, IEEE International Systems Conference (SysCon), 2018, s. 1–8.
[6] Microsoft Security Architecture, The STRIDE and DREAD Threat Modeling Approaches, Microsoft Developer Network (MSDN), 2020.
[7] Miller C., Valasek C., Remote Exploitation of an Unaltered Passenger Vehicle, Black Hat USA, 2015, s. 1–91.
[8] Schmittner C., Macher G., Automotive Cyber-Security Management System (CSMS) and Incident Response (PSIRT), European Systems and Software Process Improvement and Innovation, Springer, 2021, s. 115–128.
[9] Siddiqui F., Khan R., Yengec Tasdemir S. Et al., Cybersecurity Engineering: Bridging the Security Gaps in Advanced Automotive Systems and ISO/SAE 21434:2021, 97th IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2023, s. 1–7.
[10] Tencent Keen Security Lab, Experimental Security Research of Tesla Autopilot, Tencent Security Conference, 2016, s. 1–25.
[11] Ward D. D., Cybersecurity for Commercial Vehicles: Threat Analysis and Risk Assessment, SAE Technical Paper, 2020, nr 2020-01-0731, s. 1–12.