

Agnieszka Bukowska-Piestrzyńska✉, Maciej Bielecki
Uniwersytet Łódzki

Technologie Przemysłu 4.0 jako instrumenty wspierające Lean Logistics

Industry 4.0 technologies as instruments supporting Lean Logistics

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

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

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

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

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

Kody JEL: M15, O14, O39

Wprowadzenie

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

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

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

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

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

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

Lean Logistics – zarys zagadnienia

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

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

W logistyce szczególnie istotne jest marnotrawstwo związane z¹:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Cyfryzacja i Przemysł 4.0 w realizacji Lean Logistics

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

* Ten obszar nie został włączony do kwestionariusza ankiety.

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

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

Metody

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

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

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

Wyniki badań i dyskusja

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Źródło: wyniki badań własnych

Source: results of Authors' own research

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

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

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

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

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

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

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

Podsumowanie i wnioski

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Bibliografia

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

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

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

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

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