

Szymon Szefer[✉], Michalina Górnecka

Studenckie Koło Doskonalenia Procesów, Politechnika Poznańska

Analiza porównawcza metody załadunku kartonów luzem i na paletach w procesach logistycznych w transporcie drogowym

Comparative analysis of loose carton loading and palletized loading methods in logistics processes in road transport

Synopsis. Celem artykułu jest przeprowadzenie analizy porównawczej metody załadunku kartonów luzem i na paletach transportowych w procesach logistycznych. W pracy omówiono m.in. charakterystykę obu metod, uwzględniono czas załadunku i rozładunku, wykorzystanie przestrzeni ładunkowej, koszty operacyjne, wpływ na sposób i efektywność magazynowania, a także na łańcuch dostaw, w tym elastyczność w planowaniu i realizacji zleceń. Uwzględniono również aspekty środowiskowe oraz poziom bezpieczeństwa przewożonego towaru. Ponadto poświęcono uwagę scenariuszom, w których każde z analizowanych rozwiązań znajduje uzasadnione zastosowanie, oraz możliwościom innowacyjnego usprawnienia procesów załadunku w kontekście automatyzacji i robotyzacji. W badaniu wykorzystano metodę przeglądu literatury oraz badanie ankietowe przeprowadzone wśród ekspertów z branży TSL. Ankieta pozwoliła uzyskać praktyczne opinie dotyczące organizacji pracy, bezpieczeństwa ładunku, ryzyka błędów operacyjnych, wpływu na procesy magazynowe oraz możliwości automatyzacji procesów logistycznych. Wyniki badania wskazują, że załadunek na paletach wiąże się z wyższym poziomem automatyzacji, bezpieczeństwa towaru i elastyczności przy organizacji transportu, natomiast załadunek luzem umożliwia efektywniejsze wykorzystanie przestrzeni ładunkowej i obniżenie kosztów jednostkowych w określonych warunkach. Wnioski podkreślają zasadność indywidualnego podejścia do wyboru metody załadunku w zależności od specyfiki danego transportu, priorytetów operacyjnych i dostępnych technologii.

Słowa kluczowe: załadunek kartonu luzem, załadunek na paletach, logistyka załadunku, łańcuch dostaw, decyzje transportowe

✉ **Szymon Szefer** – Studenckie Koło Doskonalenia Procesów, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Instytut Logistyki; e-mail: szymon.szefer@student.put.poznan.pl; <https://orcid.org/0000-0002-6184-486X>

Michalina Górnecka – Studenckie Koło Doskonalenia Procesów, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, Instytut Logistyki; e-mail: michalina.gornecka@student.put.poznan.pl

Abstract. The objective of this paper is to conduct a comparative analysis of loose carton loading and palletized loading methods in logistics processes. The study discusses the characteristics of both methods, taking into account loading and unloading time, utilization of cargo space, operational costs, the impact on storage methods and efficiency, as well as effects on the supply chain, including flexibility in planning and order execution. Environmental aspects and cargo safety are also considered. Furthermore, the paper examines scenarios in which each solution is justifiably applied, along with opportunities for innovative improvements in loading processes in the context of automation and robotics. The research methodology includes a literature review and a survey conducted among experts from the transport and logistics industry. The survey provided practical insights regarding work organization, cargo safety, operational risk, the impact on warehousing processes, and the potential for the automation of logistics operations. The results indicate that palletized loading supports a higher degree of automation, enhances cargo safety, and offers greater flexibility in transport organization. In contrast, loose loading allows for more efficient use of cargo space and reduces unit costs under specific conditions. The conclusions emphasize the need for an individualized approach to selecting the loading method, depending on the specifics of the transport, operational priorities, and available technologies.

Keywords: loading of loose cartons, palletized loading, loading logistics, supply chain, transport decisions

Kody JEL: R41, L91, O33

Wstęp

Współczesna logistyka, zmierzająca do zwiększenia efektywności procesów transportowych i magazynowych, wymaga optymalizacji również na etapie załadunku towaru. Wybór między załadunkiem kartonów luzem a załadunkiem na paletach wpływa nie tylko na koszty i organizację transportu, ale również na bezpieczeństwo przesyłek i środowisko oraz możliwości automatyzacji procesów logistycznych. Mimo rosnącego znaczenia automatyzacji w branży TSL w praktyce obserwuje się brak jednoznacznych wytycznych odnośnie do optymalnej metody załadunku w różnych scenariuszach operacyjnych. Konieczne staje się więc przeprowadzenie porównawczej analizy efektywności, elastyczności i opłacalności obu metod, uwzględniającej zmieniające się uwarunkowania logistyczne i technologiczne.

W dobie dynamicznych zmian w logistyce oraz rosnącej presji zwiększania efektywności i ograniczania emisji CO₂ optymalizacja procesów załadunku stanowi istotny czynnik konkurencyjności przedsiębiorstw transportowych i logistycznych. Analiza metod załadunku kartonów umożliwia identyfikację rozwiązań, które mogą przynieść realne korzyści kosztowe, operacyjne oraz środowiskowe. Ponadto rozwój technologii automatyzacji i robotyzacji procesów logistycznych sprawia, że wybór odpowiedniej metody załadunku nabiera dodatkowego znaczenia w kontekście przyszłych inwestycji w innowacje.

Celem artykułu było przeprowadzenie analizy porównawczej metody załadunku kartonów luzem i na paletach w procesach logistycznych, z uwzględnieniem efektywności operacyjnej, kosztów, wpływu na procesy magazynowe i bezpieczeństwo, aspektów środowiskowych oraz możliwości automatyzacji.

Zakres opracowania obejmuje analizę dwóch alternatywnych metod załadunku kartonów w kontekście ich zastosowania w operacjach logistycznych. Skupiono się na kluczowych aspektach mających wpływ na efektywność procesów transportowych i magazynowych. Uwzględniono takie obszary, jak czas realizacji załadunku i rozładunku, koszty operacyjne, wykorzystanie przestrzeni ładunkowej, wpływ na organizację magazynu, bezpieczeństwo ładunku i pracowników, a także na cały łańcuch dostaw. Dodatkowo poddano ocenie możliwości automatyzacji i robotyzacji oraz oddziaływanie analizowanych metod na środowisko.

Artykuł oparty został zarówno na przeglądzie literatury branżowej, jak i na danych empirycznych, obejmujących badanie ankietowe, analizę obliczeniową efektywności przestrzennej załadunku oraz obserwację rzeczywistych procesów logistycznych. Wykorzystanie różnych źródeł danych umożliwiło kompleksowe ujęcie badanego zagadnienia. Struktura pracy składa się z kilku powiązanych logicznie części. W pierwszej z nich zawarto przegląd literatury, w którym opisano definicje oraz charakterystykę obu metod załadunku, a także ich wpływ na czas, koszty, bezpieczeństwo, środowisko i funkcjonowanie łańcucha dostaw. Następnie przedstawiono metodykę badawczą, w której opisano przebieg i zakres przeprowadzonych badań. Kolejny rozdział prezentuje wyniki badań, w tym odpowiedzi respondentów ankiety, dane uzyskane dzięki obliczeniom symulacyjnym oraz obserwacje wpływu metod załadunku na sposób magazynowania. Dalsza część artykułu zawiera dyskusję wyników, w tym przegląd innowacyjnych rozwiązań technologicznych oraz analizę przypadków zasadnego zastosowania każdej z metod w określonych warunkach operacyjnych. Całość kończy się zestawieniem kluczowych wniosków wpływających z przeprowadzonych analiz i badań.

W ramach analizy sformułowano trzy pytania badawcze, które ukierunkowały zakres rozważań teoretycznych i empirycznych zawartych w artykule. Po pierwsze, która z metod – załadunek kartonów luzem czy na paletach – jest bardziej efektywna w kontekście czasu operacji oraz wykorzystania dostępnej przestrzeni ładunkowej? Po drugie, w jaki sposób metoda załadunku wpływa na kluczowe aspekty funkcjonowania logistyki, w tym koszty operacyjne, bezpieczeństwo transportu oraz organizację pracy? Po trzecie, w jakich warunkach techniczno-organizacyjnych każda z metod znajduje uzasadnione zastosowanie? Odpowiedzi na powyższe pytania opracowano w oparciu o przegląd literatury, wyniki badania ankietowego oraz analizy symulacyjne i obserwacyjne.

Przegląd literatury

Definicja i charakterystyka metod załadunku

Załadunek kartonów luzem polega na bezpośrednim rozmieszczeniu pojedynczych opakowań jednostkowych (najczęściej kartonów) na podłodze przestrzeni ładunkowej pojazdu lub kontenera, bez zastosowania jakichkolwiek nośników, takich jak palety. Kartony są układane warstwowo, od ściany do ściany i od podłogi po sufit, w celu maksymalnego wykorzystania przestrzeni ładunkowej [Pallet Enterprise 2009]. Główną cechą tej metody załadunku jest w pełni ręczne operowanie ładunkiem – każdy karton jest przemieszczany indywidualnie, co eliminuje możliwość wykorzystania standardowych wózków widłowych lub zautomatyzowanych systemów załadunkowych [Zhang i in. 2024,

s. 82–86]. Metoda ta była w przeszłości stosowana powszechnie przy przewozie drobnicy i do dziś znajduje zastosowanie w niektórych sytuacjach, szczególnie wtedy, gdy kluczowe znaczenie ma maksymalne wykorzystanie przestrzeni ładunkowej [Sowa 2023, s. 7–12]. Efektywne i bezpieczne przeprowadzenie załadunku kartonów luzem wymaga odpowiedniego zaplanowania oraz znajomości zasad układania towaru. Zaleca się układanie paczek w tzw. szachownicę, co pozwala związać ładunek i zapewnić jego większą stabilność [Sieczka 2019, s. 631–633]. Każda warstwa powinna być możliwie płaska i równomiernie upakowana. Puste przestrzenie należy wypełnić materiałami sztauerskimi, takimi jak poduszki powietrzne, kliny, pasy transportowe czy maty antypoślizgowe [Bell 2021; Sieczka 2019, s. 632]. Najcięższe kartony powinny znaleźć się na spodzie środka transportu, a lżejsze wyżej, co zapobiega zgniataniu i poprawia stabilność ładunku, a także obniża środek ciężkości pojazdu [Gallagher, Heberger 2015, s. 6–9; Sowa 2023, s. 18–20]. Należy również unikać nierównomiernego rozłożenia ciężaru, np. skupienia masy tylko z jednej strony naczepy, ponieważ może to doprowadzić do zaburzenia stateczności pojazdu lub przekroczenia poziomu dopuszczalnych nacisków na osie [Sieczka 2019, s. 632–635]. Ręczny charakter załadunku kartonów luzem wiąże się z dużą intensywnością pracy fizycznej. Pracownicy powinni stosować się do zasad ergonomii i bezpieczeństwa pracy, takich jak uginanie nóg przy podnoszeniu ciężarów (zamiast zginania pleców) czy unikanie gwałtownych skrętów tułowia. W przypadku cięższych opakowań zaleca się pracę zespołową lub zastosowanie pomocniczych urządzeń transportowych, takich jak wózki ręczne, taśmy rolkowe czy podnośniki [Gallagher, Heberger 2015, s. 3–4; Zhao 2022, s. 2–4]. Istotne jest również, aby ładunek był prowadzony z przerwami, gdyż zmęczenie pracowników zwiększa ryzyko popełniania przez nich błędów i odnoszenia urazów [Zhao 2022, s. 6–8]. Końcowy etap załadunku kartonów luzem, czyli wypełnienie przestrzeni przy drzwiach, powinien być realizowany ze szczególną starannością. Ostatnie rzędy kartonów należy zabezpieczyć przed przemieszczaniem i wysypaniem się podczas otwierania drzwi. Stosuje się w tym celu bele rozporowe, listwy zabezpieczające lub pasy mocujące montowane do uchwytów w podłodze i ścianach naczepy [Bell 2021; Sieczka 2019, s. 634–635]. Niedopuszczalne jest transportowanie ładunku pod naciskiem wymuszającym domknięcie drzwi, ponieważ może to stanowić zagrożenie dla osób otwierających naczepę oraz dla samego ładunku.

Drugą szeroko stosowaną metodą załadunku jest załadunek paletowy. Polega on na formowaniu zbiorczych jednostek ładunkowych przy użyciu palet, na których układane są kartony. Standardowym nośnikiem w logistyce europejskiej jest paleta EURO (europaleta) o wymiarach 1200 × 800 mm. Kartony umieszcza się na niej warstwowo, stosując układ naprzemienny [Sowa 2023, s. 17–20], który poprawia stabilność ułożenia i zapobiega przesuwaniu się towaru. Zasada układania cięższych kartonów na dole, a lżejszych wyżej obowiązuje również przy paletyzacji, pozwala to uniknąć zgniatania i zwiększyć stabilność jednostki ładunkowej [Gallagher, Heberger 2015, s. 6–9]. Po ułożeniu towaru na palecie całość zabezpiecza się folią stretch, taśmami spinającymi lub kapturami foliowymi, a następnie przewozi przy użyciu wózków widłowych lub ręcznych. Należy także dokonać wizualnej kontroli stanu palet – uszkodzone europalety mogą prowadzić do przewrócenia się ładunku lub jego uszkodzenia podczas transportu. Paletyzacja zyskała status standardu w logistyce przemysłowej, ponieważ znacząco zwiększa efektywność procesów ładunkowych i rozładunkowych, ułatwia magazynowanie, umożliwia auto-

matyzację procesów oraz przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa operacyjnego. Jest rozwiązaniem preferowanym w logistyce wielkoskalowej, szczególnie tam, gdzie znaczenie ma szybkość operacji i powtarzalność jednostek ładunkowych [Sowa 2023, s. 21–23; Singh i in. 2014, s. 51–59].

Metodyka badań

Na potrzeby opracowania przeprowadzono badanie ankietowe, w ramach którego poproszono uczestników o ocenę różnych aspektów analizowanych metod załadunku. Ankieta to technika zbierania danych w formie pisemnej za pomocą kwestionariusza. Charakteryzuje się możliwością uzyskania dużej liczby informacji przy stosunkowo niskich nakładach środków i sił [Sztumski 1995 s. 129–131, 137–138]. Kwestionariusz ankiety przygotowano w formie elektronicznej. Zawarto w nim pytania zamknięte i jedno pytanie otwarte związane ze sprawowanym przez respondenta stanowiskiem. Ankieta została przeprowadzona z wykorzystaniem formularzy Google w maju 2025 roku. Wielkość próby wyniosła osiem osób, przy czym dobór respondentów miał charakter celowy i obejmował ekspertów z branży TSL.

Dokonano również obliczeń symulacyjnych wypełnienia naczepy samochodu ciężarowego o standardowych wymiarach $13,6 \times 2,45 \times 2,7$ m [BTA International 2025] dla załadunku kartonów luzem i paletowego. Przyjęto założenie, że wykorzystywane są kartony (opakowania zbiorcze) o standardowych wymiarach: $600 \times 400 \times 400$ mm i palety EURO o standardowych wymiarach: $1200 \times 800 \times 144$ mm [Deviatkin, Horttanainen 2020, s. 1; Frąs i in. 2018, s. 26–29]. Liczba warstw na palecie wynosi cztery, a kartony można układać jedynie w orientacji poziomej. Założenia symulacji zostały opracowane na podstawie wiedzy eksperckiej i odzwierciedlają realne warunki operacji logistycznych.

Przeprowadzono także obserwację otoczenia zawodowego jednej z fabryk produkujących wyroby tytoniowe. Zakład stosuje obydwie metody załadunku, a obserwacja umożliwiła pozyskanie informacji o wpływie danej metody na proces magazynowania.

Wizualizacja mapy tematycznej słów kluczowych wygenerowana w programie VOSviewer (rys. 1) pozwoliła zidentyfikować główne obszary badawcze związane z logistyką, załadunkiem, optymalizacją i automatyzacją procesów transportowych. Do stworzenia bazy danych publikacji, na podstawie której opracowano mapę, wykorzystano zasoby bazy bibliograficznej Scopus.

Analiza klastrow tematycznych wskazuje na silne powiązania między takimi zagadnieniami jak: logistyka (logistics), załadunek (loading), optymalizacja (optimization), trasowanie pojazdów (vehicle routing), symulacja (simulation), algorytmy genetyczne (genetic algorithms) czy uczenie maszynowe (machine learning). Jednocześnie zauważalna jest marginalizacja takich terminów jak problem rozmieszczenia ładunku na palecie (pallet loading problem) czy problem załadunku kontenera (container loading problem) w kontekście ujęcia operacyjnego oraz praktycznego zastosowania w codziennych procesach logistycznych.

Choć zagadnienie loading zajmuje centralną pozycję w przestrzeni semantycznej i jest silnie skorelowane z terminami inżynierskimi oraz optymalizacyjnymi, to jednak większość analiz skupia się na ujęciu matematycznym i algorytmicznym (np. integer programming, heuristic algorithms, container loading problems). Brakuje natomiast

metod załadunku na efektywność operacyjną, elastyczność systemu logistycznego, koszty oraz przyszłą automatyzację, co jest słabo reprezentowane w dotychczasowej literaturze przedmiotu.

Czas załadunku i rozładunku

Efektywność załadunku i rozładunku to kluczowy element procesów logistycznych, mający bezpośredni wpływ na koszty operacyjne oraz wydajność całego łańcucha dostaw. Poniżej zaprezentowano analizę porównawczą metody załadunku i rozładunku kartonów luzem oraz paletyzowanego. Ładunek kartonów luzem odbywa się najczęściej ręcznie, dlatego również w tej pracy przyjęto takie założenie, natomiast ładunek paletyzowany przebiega w sposób zmechanizowany z użyciem wózków widłowych. Literatura przedmiotu wskazuje, że załadunek i rozładunek palet odbywa się szybciej i łatwiej.

Na przykładzie magazynu zlokalizowanego w Polsce przeanalizowano załadunek 900 kartonów o łącznej masie ok. 27 ton. Ręczny załadunek kartonów luzem wymagałby pracy co najmniej trzech osób przez ok. 4 godziny, co daje łącznie ok. 12 roboczogodzin. Wariant paletyzowany tego samego ładunku (24 palety) umożliwia załadunek w czasie poniżej jednej godziny, wykonywany przez jednego pracownika [DTA 2025]. Opracowanie techniczne firmy Cascade Corporation pokazuje, że wprowadzenie systemu paletowego skróciło czas załadunku naczepy ciężarówki z ok. 150 min do jedynie 30 min (o 80% mniej) [Cascade 1995, s. 6–8]. Inne badania także podkreślają wysoką wydajność załadunku i rozładunku paletyzowanego i jego przewagę nad manipulacją kartonami luzem. W jednym z eksperymentów magazynowych załadunek 33 palet o masie ok. 1815 kg każda zajmowało przeciętnie 38,4 min, czyli średnio 1,2 min na jedną paletę [Burdzik i in. 2014, s. 326–327]. Czas ręcznego załadunku tego samego wolumenu byłby wielokrotnie dłuższy. Z kolei rozładunek spaletyzowanego towaru przebiega szybko i efektywnie dzięki użyciu wózków widłowych – w tym samym eksperymencie zajął on 30,4 min. Jak informuje firma Labor Loop, rozładowanie kontenera luzem trwa średnio pięciokrotnie dłużej niż rozładowanie kontenera z paletami – w analizowanym przypadku rozładunek 800 kartonów luzem zajął ponad 4 godziny, a z użyciem palet niecałą godzinę (przy wykorzystaniu odpowiednich urządzeń) [Labor Loop 2025]. Paletyzacja pozwala zatem skrócić czas rozładunku o co najmniej 75%.

Na podstawie danych literaturowych można uśrednić czasy poszczególnych operacji, uwzględniając ich zakres i wartości orientacyjne (tab. 1).

Tabela 1. Porównanie czasów załadunku i rozładunku

Table 1. Comparison of loading and unloading times

Rodzaj operacji	Metoda	Uśredniony czas operacji
Załadunek	kartony luzem	3,5–4 h
Załadunek	paletyzowany	30–60 min
Rozładunek	kartony luzem	>4 h
Rozładunek	paletyzowany	30–45 min

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Cascade 1995, s. 6–8; Burdzik i in. 2014, s. 326–327; Labor Loop 2025]

Source: own elaboration based on [Cascade 1995, p. 6–8; Burdzik et al. 2014, p. 326–327; Labor Loop 2025]

Koszty operacyjne związane z załadunkiem

Metoda załadunku towarów znacząco wpływa na strukturę i wysokość ponoszonych przez przedsiębiorstwo kosztów logistycznych. Wybór paletyzacji generuje dodatkowe koszty, które nie występują przy załadunku kartonów luzem – kluczowa jest konieczność zakupu palet. Standardowa paleta drewniana kosztuje średnio kilkadziesiąt złotych, dlatego pełen załadunek naczepy wymagającej ok. 33 palet stanowi istotny składnik kosztów jednostkowych operacji. Ponadto eksport ładunków na paletach z surowego drewna wymaga uwzględnienia wymogów fitosanitarnych dotyczących drewnianego materiału opakowaniowego. Zgodnie z międzynarodowym standardem ISPM 15 oraz przepisami państw trzecich wymagania te odnoszą się do samych palet (i innych opakowań z surowego drewna) niezależnie od rodzaju przewożonego towaru, podczas gdy opakowania z drewna przetworzonego (np. sklejka, płyty wiórowe) są z tych obowiązków zwolnione [FAO/IPPC 2019; European Commission 2023; PIORiN 2023]. W praktyce większość krajów spoza UE wymaga, aby opakowania takie były poddane zatwierdzonemu zabiegowi (np. obróbce termicznej) i oznakowane znakiem IPPC zgodnym z ISPM 15, czego koszty ponoszą eksporterzy [FAO/IPPC 2019; Hagedorn 2009, s. 14–16]. Dodatkowym kosztem związanym z paletyzacją jest foliowanie jednostek ładunkowych, co pociąga za sobą konieczność zakupu materiałów, takich jak folia stretch, oraz przeprowadzenia samej operacji foliowania. Paletyzacja umożliwia jednak efektywne wykorzystanie sprzętu mechanicznego, takiego jak wózki widłowe oraz przenośniki, a dzięki mechanizacji istotnie zredukowane są koszty pracy manualnej. Chociaż zakup oraz utrzymanie sprzętu mechanicznego wiążą się z określonymi nakładami finansowymi (np. koszt zakupu wózka widłowego to ok. 22,5 tys. euro), rozłożenie tych kosztów na dużą liczbę operacji logistycznych okazuje się korzystniejsze ekonomicznie niż ciągłe finansowanie pracy ręcznej [Carlan i in. 2023, s. 2–4]. Krótszy czas pracy wynikający z paletyzacji wpływa korzystnie na koszty zasobów ludzkich. Zgodnie z danymi zaprezentowanymi wcześniej, załadunek paletowy może być nawet pięciokrotnie bardziej efektywny czasowo niż ręczny załadunek kartonów luzem. Przy założeniu, że szacunkowy koszt pracownika wynosi 40 zł/h, przeprowadzono następujące obliczenia:

- załadunek paletowy (45 minut): $45/60 \times 40 \text{ zł} = 30 \text{ zł}$;
- załadunek kartonów luzem (225 minut): $225/60 \times 40 \text{ zł} = 150 \text{ zł}$.

Zatem również koszty pracy ludzkiej przy ręcznym załadunku mogą być nawet pięciokrotnie wyższe niż przy załadunku paletowym. Różnice te mogą okazać się jeszcze bardziej znaczące w praktyce, gdyż operacje ręczne wymagają zazwyczaj zaangażowania większej liczby pracowników. Przy dużej skali operacji logistycznych, rzędu np. 20 wysyłek dziennie, różnica kosztów wynikająca z metody załadunku może wynieść miesięcznie nawet 70 tys. zł (przy przyjęciu przedstawionych wyżej parametrów).

Paletyzacja czy załadunek kartonów luzem oznacza wybór między wyższymi kosztami transportu a wyższymi kosztami pracy. Kwestia opłacalności wyboru konkretnej metody załadunku zależy w dużej mierze od struktury kosztów danego przedsięwzięcia logistycznego. Kluczowym czynnikiem determinującym tę opłacalność jest relacja między oszczędnościami wynikającymi z frachtu a dodatkowymi kosztami związanymi z pracą manualną oraz zakupem i obsługą palet. Modelowa analiza kosztów przeprowadzona przez Virginia Tech wskazuje, że przy obecnych stawkach frachtu w przypadku

większości typowych dóbr szybko zbywalnych bardziej ekonomiczną opcją jest załadunek luzem [Hagedorn 2009, s. 14–16]. Nawet w krajach o relatywnie wysokich kosztach pracy dodatkowy wydatek związany z obsługą ręczną nie przewyższa oszczędności wynikających z możliwości załadunku większej liczby towarów do pojedynczego kontenera. Jeśli zastosowanie palet wymagałoby użycia dodatkowego kontenera, załadunek kartonów luzem będzie zdecydowanie bardziej opłacalny. Odwrotna sytuacja występuje w przypadku towarów ciężkich, gdzie ograniczeniem nie jest objętość, lecz masa kontenera. W takich przypadkach różnica w liczbie możliwych do załadowania kartonów przy zastosowaniu którejkolwiek z analizowanych metod będzie znikoma. Bardziej opłacalna staje się wówczas paletyzacja, ponieważ pozwala na szybszą i bardziej zautomatyzowaną obsługę ładunku, co przekłada się na obniżenie kosztów operacyjnych. Innymi słowy, jeśli paletyzacja pozwala w pełni wykorzystać dopuszczalną wagę kontenera, to jej zastosowanie przynosi korzyści w postaci sprawniejszego przeładunku oraz niższych kosztów pracy. Natomiast gdyby objętość zajmowana przez palety wymagała załadunku do dodatkowego kontenera, bardziej racjonalne byłoby ładowanie kartonów luzem, co pozwala uniknąć nadmiernych kosztów frachtu i zoptymalizować ekonomiczną efektywność transportu.

Wpływ metody załadunku na łańcuch dostaw

Wysyłka paletowa znacząco usprawnia działanie łańcucha dostaw, ponieważ standaryzowane wymiary i nośniki umożliwiają dokładne zaplanowanie przestrzeni ładunkowej w pojazdach i kontenerach, co poprawia przewidywalność załadunku oraz skraca czas operacji przeładunkowych [Rushton 2010, s. 236–256]. Mechaniczne podnoszenie i transport palet za pomocą wózków widłowych, przenośników rolkowych czy suwnic pozwala zautomatyzować procesy magazynowe, a etykiety RFID lub kody kreskowe umieszczone na paletach ułatwiają szybkie śledzenie lokalizacji i rotacji zapasów w systemach WMS [Rushton 2010, s. 323–326]. Dzięki temu skraca się czas realizacji zamówień, rośnie liczba cykli magazynowych, a ryzyko błędów czy uszkodzeń towarów maleje, co przekłada się na większą wydajność całego łańcucha dostaw. Załadunek kartonów luzem, choć często bardziej ekonomiczny pod względem kosztu transportu przypadającego na jednostkę produktu, wiąże się z niską standaryzacją i koniecznością ręcznego układania, zabezpieczania i oznaczania każdej sztuki ładunku. W warunkach dynamicznych łańcuchów dostaw, gdzie zmiany w grafiku czy typie ładunku mogą nastąpić z dnia na dzień, brak możliwości szybkiego przeorganizowania układu bez użycia palet utrudnia elastyczne reagowanie na nowe zamówienia [Rushton 2010, s. 236–256].

Jednocześnie rozwój technologii chwytaków kartonowych pozwala częściowo łączyć zalety obu podejść. Hydrauliczne chwytaki wyposażone w gumowe nakładki o wysokim współczynniku tarcia potrafią bezpiecznie unieść ciężkie opakowania bez palet pod warunkiem odpowiedniego doboru ciśnienia docisku, uwzględniającego dynamiczne wstrząsy, sięgające nawet 2 G podczas gwałtownego zatrzymania ładunku. W praktycznych testach przy zastosowaniu minimalnego ciśnienia obliczonego na podstawie modelu numerycznego zaobserwowano średni poślizg wynoszący jedynie ok. 3 mm [Park i in. 2017, s. 25–34], co uznano za akceptowalne i pozwalające zacho-

wać ciągłość operacji magazynowych bez konieczności stosowania tradycyjnych palet. Elastyczna organizacja transportu wymaga nie tylko mechanicznych rozwiązań, lecz także zaawansowanej integracji z systemami informatycznymi. W przypadku paletyzacji dane o każdym ładunku są od razu dostępne w WMS, co umożliwia automatyczne generowanie planów załadunku, optymalizację i szybką zmianę konfiguracji pojazdów. Brak automatyzacji przy załadunku kartonów luzem skutkuje wydłużeniem czasu przyjęcia towaru do magazynu oraz większym ryzykiem pomyłek przy inwentaryzacji i przydziale miejsca składowania. Nawet przy zastosowaniu chwytaków kartonowych konieczne jest oznakowanie każdej jednostki, co jest dodatkowym obciążeniem dla pracowników i systemów IT.

Podsumowując, choć załadunek kartonów luzem może być korzystny w niektórych sytuacjach (np. niestandardowe gabaryty, niski wolumen), to z perspektywy efektywności, przejrzystości przepływu towarów i zdolności szybkiego dostosowania się do zmieniających warunków rynkowych znacznie lepiej sprawdza się podejście paletowe. Ustandaryzowane jednostki ładunkowe, wsparcie automatyzacji i pełna integracja z WMS nie tylko przyspieszają operacje przeładunkowe, ale także pozwalają dynamicznie zarządzać zasobami transportowymi, co przekłada się na wysoką elastyczność organizacji transportu w nowoczesnych łańcuchach dostaw.

Ekologiczność prezentowanych rozwiązań

Załadunek kartonów luzem pozwala optymalnie wypełnić przestrzeń ładunkową, dzięki czemu na jednostkę towaru przypada mniej kursów transportowych. Przekłada się to na mniejsze zużycie paliwa i obniżoną emisję CO₂ [Baumel 2011, s. 79–81] w całym łańcuchu dostaw. W przypadku wysyłki paletowej część przestrzeni zajmują same palety, co obniża efektywność ładowności i może wymagać dodatkowego transportu tych jednostek pomocniczych.

Transport kartonów luzem nie wymaga stosowania palet, folii stretch czy kątowników, co zmniejsza liczbę generowanych odpadów opakowaniowych [Scioșteanu, Criveanu 2023]. Jednak brak mechanicznego zabezpieczenia zwiększa ryzyko uszkodzeń towarów, co skutkuje większą ilością odpadów produktowych i koniecznością ponownej produkcji. Z kolei paletyzacja umożliwia lepsze ułożenie ładunku, co zmniejsza ryzyko uszkodzenia produktów [White 2017, s. 5–7], ale generuje znaczące ilości materiałów zabezpieczających, zwłaszcza przy jednorazowym użyciu, co niekorzystnie wpływa na ślad węglowy transportu.

Palety drewniane czy plastikowe można zazwyczaj poddawać recyklingowi lub eksploatować wielokrotnie, co częściowo niweluje negatywne skutki ich produkcji i utylizacji. Niemniej jednak każdorazowe wprowadzenie nowej partii palet wiąże się ze zużyciem surowców (drewna, tworzyw sztucznych) oraz energii potrzebnej do produkcji i konserwacji palet [White 2017, s. 5–6].

Badania nad chwytakami kartonowymi pokazują, że ich zastosowanie umożliwia obsługę ciężkich opakowań bez konieczności użycia palet, co sprzyja ograniczeniu zużycia drewna i materiałów opakowaniowych. Rozwój tych rozwiązań był napędzany m.in. potrzebą redukcji wykorzystania palet wynikającą z konieczności optymalizacji kosztów

i dostosowania się do wymagań fitosanitarnych dotyczących drewna używanego w paletach. Jednocześnie odgrywają one kluczową rolę w zmniejszeniu strat towarowych podczas przewozu, co przekłada się także na ograniczenie liczby odpadów i lepszy bilans ekologiczny całego procesu logistycznego [Park i in. 2017, s. 25–34].

Z perspektywy zrównoważonego rozwoju optymalny wybór między załadunkiem kartonów luzem a paletowym powinien uwzględniać nie tylko koszty i efektywność operacyjną, ale również analizę cyklu życia opakowań i poziomu strat produktowych. W praktyce najlepsze rezultaty ekologiczne osiąga się dzięki minimalizacji odpadów opakowaniowych (poprzez redukcję lub wielokrotne użycie palet), przy jednoczesnym zapewnieniu wystarczającej ochrony towarów, dzięki czemu zmniejsza się zarówno zużycie surowców, jak i emisja związana z dodatkowymi kursami transportowymi [Scrioșteanu, Criveanu 2023].

Aspekty bezpieczeństwa a metody załadunku

Wybór formy załadunku bezpośrednio determinuje poziom ochrony przewożonych towarów, bezpieczeństwa pracowników oraz stabilności całego procesu transportowego.

Załadunek kartonów luzem, choć pozwala na maksymalne wykorzystanie przestrzeni, wiąże się z wysokim ryzykiem przemieszczania się ładunku podczas transportu. Towary układane pojedynczo bez ustandaryzowanych jednostek ładunkowych mogą się przesuwać pod wpływem drgań, przyspieszeń lub gwałtownych manewrów pojazdu, co prowadzi do ich uszkodzeń mechanicznych [Park i in. 2017, s. 25–34]. Brak możliwości mechanicznej obsługi każdej jednostki wymusza ręczne przenoszenie, układanie i zabezpieczanie towarów, czyli czynności powtarzalne i obciążające układ mięśniowo-szkieletowy pracowników, co znacząco zwiększa ryzyko kontuzji związanych z przeciążeniami, nienaturalną postawą czy pośpiechem.

W załadunku paletowym towary są grupowane na standaryzowanych paletach, a operacje dokonywane przede wszystkim przy użyciu wózków widłowych lub przenośników. Mechanizacja pozwala zmniejszyć bezpośrednie obciążenie fizyczne pracowników, ustandaryzowany kształt palety minimalizuje ryzyko przesunięć ładunku i związanych z tym uszkodzeń, a uporządkowany układ ładunku ułatwia zachowanie właściwych procedur BHP na rampach i w magazynach [Park i in. 2017, s. 25–34; Grabowska 2023, s. 171–172].

Niestandardowy charakter ładunku luzem utrudnia zastosowanie systemów automatycznego monitoringu i zabezpieczeń, co może prowadzić do przerw w realizacji dostaw lub uszkodzeń sprzętu [Ferreira, Reis 2023]. Natomiast paletyzacja, dzięki integracji z systemami WMS i prostemu sterowaniu ruchem wózków widłowych, wspiera szybkie i bezpieczne przeładunki oraz umożliwia wprowadzenie nowoczesnych rozwiązań, takich jak suwnice czy systemy AS/RS, minimalizujące ryzyko wystąpienia błędów ludzkich [Mourral 2020, s. 7–28].

W efekcie najbardziej kompleksową ochronę, zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa, jak i pracowników, zapewni zastosowanie palet lub dobrze zaprojektowanych chwytaków kartonowych, przy jednoczesnym zachowaniu właściwych parametrów roboczych wynikających z przeprowadzonych badań nad tarciem i obciążeniami dynamicznymi [Park i in. 2017, s. 25–34; Grabowska 2023, s. 179–181].

Wyniki badań

Wyniki badania ankietowego

W ramach przeprowadzonych badań ankietowych zebrano opinie ośmiu ekspertów z branży TSL (transport, spedycja, logistyka), reprezentujących różne doświadczenie zawodowe (od 0–2 lat do 6–10 lat praktyki) i stanowiska (m.in. spedytor, specjalista ds. logistyki wewnętrznej oraz pracownik transportowy). Celem badania było poznanie ocen różnych aspektów organizacyjnych i technologicznych załadunku towarów, a przedstawione wnioski mają charakter eksploatacyjno-poglądowy z uwagi na wielkość próby. Wyniki badania przedstawiono w tabeli 2 (wartości w niej podane oznaczają liczbę głosów oddanych na daną metodę załadunku). Wskazują one na zdecydowanie preferowanie przez ekspertów załadunku paletowego. Metoda ta uzyskała przewagę we wszystkich ocenianych aspektach – od organizacji pracy, przez bezpieczeństwo, po odporność na błędy, efektywność przy dużych wolumenach, możliwość automatyzacji oraz nadzór. Choć w przypadku jednego z pytań pojawiły się głosy wskazujące także rozwiązania alternatywne, ogólny wynik jednoznacznie potwierdza dominującą rolę załadunku paletowego we współczesnych i przyszłościowych procesach logistycznych.

Tabela 2. Zestawienie odpowiedzi ekspertów dotyczących oceny metod załadunku
Table 2. Summary of experts' responses regarding the evaluation of loading methods

Kryterium oceny	Załadunek kartonów luzem	Załadunek kartonów na paletach
Łatwiejsza organizacja	1	7
Bezpieczniejszy sposób załadunku	0	8
Metoda mniej podatna na błędy ludzkie	0	8
Bardziej odpowiednia przy dużych wolumenach przesyłek	2	6
Bardziej przyszłościowa (automatyzacja/robotyzacja)	0	8
Wymaga większego nadzoru logistycznego	8	0

Źródło: opracowanie własne na podstawie badania ankietowego

Source: own elaboration based on survey study

Wyniki obliczeń symulacyjnych – wykorzystanie powierzchni ładunkowej

Do analizy załadunku przyjęto standardową naczepę o wymiarach: 13,6 m dł., 2,45 m szer. i 2,70 m wys., co daje całkowitą objętość ładunkową ok. 90 m³ [DSV 2025]. Naczepa ta może pomieścić 33 palety typu EURO [Gładeko 2025]. Przedmiotem analizy był pojedynczy karton o wymiarach: 0,6 m dł., 0,4 m szer. i 0,4 m wys., co odpowiada objętości 0,096 m³. Przeprowadzono porównanie dwóch wariantów załadunku kartonów – luzem oraz na europaletach o standardowych wymiarach 1200 × 800 × 144 mm. Wyznaczono dla nich maksymalną liczbę kartonów, wykorzystywaną objętość oraz efektywność przestrzeni ładunkowej.

W pierwszym wariantcie załadunku luzem kartony ułożone zostały poziomo, najkorzystniej pod kątem wymiarów naczepy (0,6 m na szerokość i 0,4 m na długość). W takiej konfiguracji możliwe było umieszczenie 34 kartonów wzdłuż długości naczepy (13,6 m) oraz czterech kartonów w poprzek (2,4 m). Jedna warstwa składała się zatem

ze 136 kartonów. Maksymalna wysokość ładunku wynosiła sześć warstw (łącznie 2,4 m wysokości), co umożliwia załadunek 816 kartonów. Łączna objętość zajmowana przez kartony wyniosła 78,34 m³, co oznacza efektywność wykorzystania przestrzeni ładunkowej na poziomie 87,1%. W drugim wariantcie, z zastosowaniem palet o wym. 1200 × 800 mm, każda paleta mieściła w jednej warstwie cztery kartony ułożone poziomo. Maksymalna liczba palet wyniosła 33, co jest zgodne z typową pojemnością naczepy tego typu. Każda paleta została załadowana sześcioma warstwami kartonów, co przy wysokości palety 144 mm daje łączną wysokość załadunku 2,544 m (ograniczoną wysokością naczepy – 2,7 m). Załadowano w sumie 792 kartony. Objętość kartonów wyniosła 76,03 m³, dodatkowa objętość zajmowana przez palety wyniosła ok. 4,56 m³, zatem całkowita objętość ładunku wraz z paletami wyniosła 80,59 m³, co oznacza efektywność wykorzystania przestrzeni ładunkowej na poziomie 89,58%.

Przeprowadzona analiza wskazuje, że zastosowanie palet skutkuje większą efektywnością wykorzystania przestrzeni ładunkowej w porównaniu do załadunku luzem (pomimo zajmowania dodatkowej przestrzeni przez same nośniki). Jeśli natomiast zmienilibyśmy wysokość kartonu na 445 mm, uzyskamy zupełnie inne wyniki (tab. 3). W takim przypadku załadunek kartonów luzem odznacza się wyższą efektywnością wykorzystania przestrzeni ładunkowej w porównaniu do załadunku paletowego.

Tabela 3. Wykorzystanie powierzchni ładunkowej wypełnionej kartonem o wymiarach 600 × 400 × 445 mm

Table 3. Utilization of the loading area (cardboard boxes 600 × 400 × 445 mm)

Wariant	Liczba kartonów	Wykorzystana objętość [%]	Efektywność [%]
Załadunek kartonów luzem	816	87,15	96,87
Załadunek na paletach	660	75,05	83,42

Źródło: opracowanie własne na podstawie [Cascade 1995; Burdzik i in. 2014; Labor Loop 2025]

Source: own elaboration based on [Cascade 1995; Burdzik i in. 2014; Labor Loop 2025]

Wyniki obserwacji – wpływ na sposób magazynowania

Analiza wykazała istotny wpływ metody załadunku na przebieg procesu magazynowania. W przypadku załadunku paletowego standardową praktyką jest magazynowanie gotowych do wysyłki paletowych jednostek ładunkowych (PJŁ), jeśli tylko pozwalają na to możliwości technologiczne przedsiębiorstwa. W praktyce jednak występują ograniczenia, takie jak niemożność stworzenia przez roboty paletyzujące jednostek o wymaganej wysokości lub bariery ergonomiczne podczas ręcznego układania jednostek przez pracowników. Mimo tych trudności magazynowanie gotowych PJŁ jest uważane za rozwiązanie wysoce efektywne, do którego przedsiębiorstwa dążą ze względu na znaczną oszczędność czasu podczas załadunku oraz zwiększoną efektywność operacyjną.

W przypadku załadunku kartonów luzem niemal zawsze pojawia się konieczność ich uprzedniego magazynowania po zakończeniu procesu produkcyjnego. Często praktykowane jest również ich przechowywanie na paletach, co sprzyja automatyzacji oraz umożliwia lepsze zarządzanie przestrzenią magazynową. Kluczową różnicą jest jednak sposób formowania paletowej jednostki ładunkowej. W tym przypadku dąży się do maksymalizacji wykorzystania dostępnej przestrzeni poprzez zastosowanie np. palety che-

micznej o wymiarach 1200 × 1200 mm, czyli znacząco większej od standardowej palety EURO (1200 × 800 mm). Dzięki zastosowaniu większych palet możliwe jest zwiększenie liczby opakowań zbiorczych przypadających na jedną warstwę. Liczba warstw także jest maksymalizowana przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z dostępnej technologii paletyzacji oraz wymagań związanych ze stabilnością palety. Pozwala to na zwiększenie ilości towarów przechowywanych w jednym gnieździe magazynowym, co prowadzi do bardziej efektywnego wykorzystania powierzchni magazynowej.

Innowacyjność

W obliczu rosnących wymagań dotyczących efektywności i zrównoważonego rozwoju w logistyce intensywnie poszukuje się rozwiązań eliminujących konieczność stosowania tradycyjnych palet. Jedną z obiecujących koncepcji jest nanoszenie na ścianki kartonów heksagonalnej struktury metalizowanej wykonanej w technologii PVD (physical vapor deposition). Proces ten polega na precyzyjnym wytłoczeniu na wyznaczonych fragmentach ścian kartonów subtelnymi wgłębieniami mającymi kształt plastra miodu, a następnie selektywnym napyleniu cienkiej, kilkumikrometrowej powłoki metalu (np. aluminium lub stopu Al-Zn). Tak powstałe uchwyty łączą w sobie lekkość i biodegradowalność papieru z wytrzymałością oraz przewodnością metalu, umożliwiając bezramowe i bezklamrowe mocowanie pasów lub lin transportowych.

Metalizowane punkty mocowania cechują się znaczną nośnością oraz wysoką odpornością na ścieranie, przy jednoczesnym przyroście masy kartonu na poziomie zaledwie kilkunastu gramów. Tak minimalna zmiana wagi nie ma istotnego wpływu na zużycie paliwa podczas transportu, ułatwia natomiast recykling: papier ulega hydrolizie, a cienka powłoka metalu oddziela się w procesie odzysku surowców.

Wdrożenie tej technologii wymaga modyfikacji istniejących linii produkcyjnych, a personel produkcyjny powinien przejść szkolenie w zakresie metod spinania ładunków z wykorzystaniem nowych uchwytów, z uwzględnieniem możliwości monitoringu naprężeń dzięki powłoce przewodzącej.

Technologia metalizowanych uchwytów znakomicie współgra z klasycznymi metodami klejenia kartonów. W obszarach pozbawionych napyłonej struktury można stosować kleje hot-melt lub wodne, które uszczelniają i wzmacniają krawędzie opakowania. Dzięki takiemu połączeniu mechaniczna wytrzymałość uchwytów zyskuje wsparcie adhezyjne, co poprawia stabilność wielowarstwowych układów ładunkowych oraz zwiększa odporność na przesunięcia i drgania podczas transportu.

Mimo licznych korzyści implementacja tego rozwiązania wiąże się z pewnymi wyzwaniem. Do najważniejszych należą: konieczność precyzyjnej kontroli parametrów procesu napylenia oraz zapewnienie właściwej segregacji odpadów w zakładach recyklingu. Ponadto niewłaściwie zabezpieczona powłoka może ulec korozji w warunkach podwyższonej wilgotności.

Pomimo tych ograniczeń, przy odpowiednim zarządzaniu procesem i dostosowaniu procedur produkcyjnych oraz recyklingowych technologia metalizowanych uchwytów ma potencjał, by stać się standardem w nowoczesnym transporcie drogowym i przyczynić się do redukcji kosztów logistycznych i odpadów paletowych oraz poprawy bezpieczeństwa i zwiększenia możliwości monitorowania ładunków.

Przypadki zasadnego zastosowania obu rozwiązań

Wybór odpowiedniej metody załadunku kartonów powinien być uzależniony od warunkowań technicznych, ekonomicznych oraz organizacyjnych konkretnego procesu logistycznego. Analiza literatury, danych empirycznych i wyników przeprowadzonych badań ankietowych pozwala na wskazanie typowych scenariuszy, w których każda z opisywanych metod znajduje uzasadnione zastosowanie.

Załadunek kartonów luzem, polegający na ręcznym umieszczaniu opakowań zbiorczych bezpośrednio w przestrzeni ładunkowej pojazdu lub kontenera, znajduje zastosowanie przede wszystkim wtedy, gdy priorytetem jest maksymalne wykorzystanie dostępnej objętości. Metoda ta pozwala zminimalizować straty przestrzenne związane z użyciem nośników, takich jak palety, co bywa istotne w przypadku lekkich i regularnych gabarytowo produktów, których transport ograniczany jest przez objętość, a nie masę. W takich przypadkach możliwe jest znaczące zwiększenie liczby przewożonych jednostek ładunkowych bez zwiększania liczby operacji transportowych.

Załadunek kartonów luzem może być również korzystny w warunkach ograniczonego dostępu do infrastruktury magazynowej i sprzętu przeładunkowego, np. w lokalizacjach niewyposażonych w wózki widłowe lub rampy. Brak konieczności wykorzystywania palet obniża również koszty materiałowe i eliminuje potrzebę ich magazynowania, wymiany lub zwrotu. Badania ankietowe wykazały, że część praktyków decyduje się na ten wariant szczególnie w przypadku transportu produktów trwałych mechanicznie, przy mniejszych zamówieniach lub w sytuacjach wymagających większej elastyczności układu ładunku.

Warto jednak podkreślić, że w przypadku ładunków ciężkich wymienione powyżej zalety załadunku kartonów luzem przestają mieć znaczenie. Gdy niezależnie od sposobu pakowania pojazd osiąga dopuszczalną masę, dołożenie dodatkowego wolumenu przestaje być możliwe, a głównymi przewagami stają się efektywność przeładunkowa i koszt pracy.

Załadunek na paletach znajduje szerokie zastosowanie w nowoczesnych systemach logistycznych, szczególnie tam, gdzie kluczowe są standaryzacja, mechanizacja oraz bezpieczeństwo. Kartony ułożone na paletach mogą być sprawnie załadowywane i rozładowywane przy użyciu wózków widłowych lub systemów przenośnikowych, co znacząco skraca czas operacji i redukuje koszty robocizny. Metoda ta zapewnia również większą stabilność ładunku, ogranicza ryzyko uszkodzeń oraz umożliwia łatwiejsze śledzenie i zarządzanie jednostkami ładunkowymi w systemach magazynowych.

Wyniki badania ankietowego wskazują, że większość respondentów preferuje rozwiązanie paletowe – podkreślali oni jego większą efektywność, bezpieczeństwo oraz zgodność z infrastrukturą magazynową. Jest to rozwiązanie szczególnie korzystne w przypadku ograniczeń czasowych, dużej skali operacji oraz możliwości wykorzystania sprzętu zmechanizowanego. Paletyzacja jest również często wymagana przez odbiorców instytucjonalnych oraz operatorów logistycznych, co czyni ją bardziej uniwersalnym i przewidywalnym rozwiązaniem w łańcuchach dostaw. W przypadku towarów ciężkich lub transportowanych na dalsze odległości, gdzie głównym ograniczeniem jest masa, a nie objętość, metoda paletowa umożliwia pełne wykorzystanie ładowności przy zachowaniu wysokiej efektywności przeładunku.

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań można stwierdzić, że żadna z analizowanych metod załadunku nie jest jednoznacznie lepsza. Załadunek kartonów luzem

sprawdza się tam, gdzie kluczowe jest maksymalne wykorzystanie przestrzeni i minimalizacja kosztów materiałowych, a załadunek paletowy dominuje wtedy, gdy istotna jest szybkość, standaryzacja i bezpieczeństwo operacji logistycznych. W praktyce optymalizacja procesu logistycznego powinna się opierać na kompleksowej analizie: rodzaju produktu, dostępnej infrastruktury, ograniczeń transportowych oraz oczekiwań odbiorcy.

Wnioski

Przeprowadzone badania umożliwiły sformułowanie odpowiedzi na postawione pytania badawcze, a także wskazanie najistotniejszych implikacji praktycznych wynikających z porównania metod załadunku kartonów luzem i na paletach w procesach logistycznych.

W odpowiedzi na pierwsze pytanie badawcze stwierdzono, że załadunek paletowy cechuje wyraźnie krótszy czas realizacji oraz niższe zapotrzebowanie na zasoby ludzkie. Dzięki wysokiemu stopniowi mechanizacji oraz integracji z systemami WMS metoda ta umożliwia standaryzację operacji, co przekłada się na zwiększoną wydajność i bezpieczeństwo pracy oraz mniejsze ryzyko błędów operacyjnych. Z drugiej strony, załadunek kartonów luzem, pomimo większej pracochłonności, zapewnia wyższą efektywność wykorzystania przestrzeni ładunkowej, zwłaszcza w przypadku towarów lekkich o regularnych kształtach, których transport ogranicza wolumen, a nie masa.

Odpowiadając na drugie pytanie badawcze, wykazano, że załadunek paletowy sprzyja automatyzacji, elastycznemu planowaniu operacyjnemu oraz przejrzystości przepływów materiałowych, natomiast załadunek kartonów luzem, choć ogranicza możliwości mechanizacji i utrudnia śledzenie ładunku, może być korzystny w warunkach nierozwiniętej infrastruktury technicznej lub wysokich kosztów frachtu.

Na trzecie pytanie badawcze, dotyczące zasadności zastosowania każdej z metod, odpowiedziano na podstawie zarówno danych empirycznych, jak i literaturowych. Załadunek kartonów luzem znajduje zastosowanie przede wszystkim w przypadku lekkich produktów objętościowych, niskich kosztów pracy i ograniczeń przestrzennych, podczas gdy metoda paletowa dominuje w środowiskach wymagających wysokiej powtarzalności, szybkości operacji oraz zgodności z wymaganiami odbiorców instytucjonalnych.

Syntetyzując wyniki badań, należy podkreślić, że optymalny wybór metody załadunku powinien być każdorazowo determinowany specyfiką operacyjną, profilem towaru, możliwościami infrastrukturalnymi oraz strategią przedsiębiorstwa w zakresie automatyzacji i zrównoważonego rozwoju. Wskazane jest indywidualne podejście do decyzji operacyjnych, uwzględniające również potencjał wdrażania innowacyjnych rozwiązań technologicznych, takich jak chwytaki kartonowe czy struktury metalizowane, które mogą w przyszłości redefiniować tradycyjne modele załadunku.

Bibliografia

- Baumel C.P., 2011: Measuring bulk product transportation fuel efficiency, *Journal of the Transportation Research Forum* 50(1), 79–88.
- Bell J., 2021: Investigation of the forces of a load securing strap in different plants, *EVU Online*, <https://www.evu-online.org/investigation-of-the-forces-of-a-load-securing-strap-in-different-plants> [dostęp: 12.05.2025].

- BTA International, 2025: Dimensions of trucks and trailers, <https://www.bta-international.com/en/information/dimensions-trucks-trailers> [dostęp: 12.05.2025].
- Burdzik R., Cieśla M., Śladowski A., 2014: Cargo loading and unloading efficiency analysis in multimodal transport, *Promet – Traffic & Transportation* 26(4), 323–331.
- Carlan V., Ceulemans D., van Hassel E. et al., 2023. Automation in cargo loading/unloading processes: do unmanned loading technologies bring benefits when both purchase and operational cost are considered? *Journal of Shipping and Trade* 8, 20.
- Cascade, 1995: Push/Pull & Slipsheet Handling Manual, Cascade Corporation, Portland, OR.
- Deviatkin I., Horttanainen M., 2020: Carbon footprint of an EUR-sized wooden and a plastic pallet, *E3S Web of Conferences* 158, 03001.
- DSV, 2025: Naczepa kurtynowa – standard, <https://www.dsv.com/pl-pl/nasze-rozwiazania/rodzaje-transportu/transport-drogowy/wymiary-naczep/naczepa-kurtynowa> [dostęp: 12.05.2025].
- DTA, 2025: Co to jest paletyzacja i jakie są jej korzyści?, <https://dta.com.pl/blog-dta/paletyzacja-magazyn/> [dostęp: 12.05.2025].
- European Commission, 2023: Requirements for wood packaging & dunnage, Directorate-General for Health and Food Safety, https://food.ec.europa.eu/plants/plant-health-and-biosecurity/trade-plants-plant-products-non-eu-countries/requirements-wood-packaging-dunnage_en [dostęp: 12.05.2025].
- FAO/IPPC, 2019: ISPM 15. Regulation of wood packaging material in international trade, Food and Agriculture Organization of the United Nations, <https://www.ippc.int/en/publications/regulation-wood-packaging-material-international-trade-0/> [dostęp: 12.05.2025].
- Ferreira B., Reis J., 2023: A systematic literature review on the application of automation in logistics, *Logistics* 7(4), 80.
- Frań J., Olsztyńska I., Scholz S., 2018: Standardization and certification of the wooden packaging in international trade, *Research in Logistics and Production* 8(1), 25–37.
- Gallagher S., Heberger J.R., 2015: The effects of operator position, pallet orientation, and palletizing condition on low back loads in manual bag palletizing operations, *International Journal of Industrial Ergonomics* 47, 84–92.
- Gladeko, 2025: Naczepa standard/mega – wymiary i ładowność, <https://www.gladeko.com.pl/tabor,Naczepa-standardmega,23> [dostęp: 12.05.2025].
- Grabowska J., 2023: Safety of transportation of pallet shipments by a selected logistics operator, *Scientific Papers of Silesian University of Technology, Organization and Management Series* 189, 167–182.
- Hagedorn A.J., 2009: The effect of pallets and unitization on the efficiency of intercontinental product movement using ocean freight containers, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.
- Labor Loop, 2025: How Long Does It Take to Unload a Shipping Container?, <https://www.laborloop.com/how-long-does-it-take-to-unload-a-shipping-container> [dostęp: 12.05.2025].
- Mourral E., Lesaffre C., 2020: Benefits and challenges of an automated storage and retrieval system: A theoretical study on Food and Pharmaceutical automated storage and retrieval process, Master Thesis, Linnaeus University, Växjö–Kalmar.
- Pallet Enterprise, 2009: Floor Loading Versus Palletization for Sea Transit: New Tool Developed at Virginia Tech Provides Optimum Solutions, <https://palletenterprise.com/floor-loading-versus-palletization-for-sea-transit-new-tool-developed-at-virginia-tech-provides-optimum-solutions/> [dostęp: 19.11.2025].

- Park J., Kim J., Park J., Horvath L., Kim G., 2017: Numerical analysis of clamping pressure during carton clamp handling of heavyweight corrugated packages, *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 10(5), 25–34.
- PIORiN, 2023: Opakowania drewniane, Państwowa Inspekcja Ochrony Roślin i Nasiennictwa, <https://www.gov.pl/web/piorin/opakowania-drewniane> [dostęp: 19.11.2025].
- Rushton A., Croucher P., Baker P., 2010: *The handbook of logistics and distribution management: Understanding the supply chain*, 4th ed., Kogan Page, London.
- Scrioșteanu A., Criveanu M.M., 2023: Reverse logistics of packaging waste under the conditions of a sustainable circular economy at the level of the European Union states, *Sustainability* 15(20), 14727.
- Sieczka J., 2019: Bezpieczeństwo w przewozach ładunku transportem samochodowym, *Gospodarka Materiałowa i Logistyka* 71(5), 627–649.
- Singh P., Singh J., Antle J., Topper E., Grewal G., 2014: Load securement and packaging methods to reduce risk of damage and personal injury for cargo freight in truck, container and intermodal shipments, *Journal of Applied Packaging Research* 6(1), 47–62.
- Sowa M., 2023: Palety ładunkowe. Teoretyczne i praktyczne wymiary eksploatacji w aspekcie zrównoważonego rozwoju, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego, Szczecin.
- Sztumski J., 1995: *Wstęp do metod i technik badań społecznych*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
- White M.S., 2017: A comparison of pallet strength and functionality: Litco's engineered molded wood pallets compared to GMA-style new and repaired wooden pallets, Litco International, Vienna, OH.
- Zhang X., Zheng D., Li B., 2024: Current problems in a new distribution center under labor shortage, *Advances in Economics and Management Research ICMEDTI 2024*, 11, 82–88.
- Zhao Y.S., Jaafar M.H., Mohamed A.S.A., Azraai N.Z., Amil N., 2022: Ergonomics risk assessment for manual material handling of warehouse activities involving high shelf and low shelf binning processes: application of marker-based motion capture, *Sustainability* 14(10), 5767.