



Mikołaj Nakonieczny  <https://orcid.org/0009-0004-8766-4316>  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
e-mail: [mikolajnako4@gmail.com](mailto:mikolajnako4@gmail.com)

Paweł Kucharski  <https://orcid.org/0009-0001-5292-6708>  
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie  
e-mail: [kucharskipawel51@gmail.com](mailto:kucharskipawel51@gmail.com)

## **Problematyka eksploatacji pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w transporcie publicznym**

### **Operational challenges of low- and zero-emission vehicles in public transport**

<https://doi.org/10.25312/ziwgib.886>

#### **Streszczenie**

Celem artykułu jest ocena uwarunkowań oraz efektywności eksploatacji pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w systemach transportu publicznego ze szczególnym uwzględnieniem ich implikacji technologicznych, ekonomicznych i organizacyjnych. Opracowanie ma charakter analityczno-przeglądowy i opiera się na analizie regulacji prawnych, danych branżowych oraz dostępnych wyników badań dotyczących funkcjonowania nowoczesnych napędów w transporcie zbiorowym.

Wyniki analizy wskazują, że wdrażanie autobusów elektrycznych, wodorowych i hybrydowych wiąże się z istotnymi wyzwaniami infrastrukturalnymi i operacyjnymi, obejmującymi między innymi zapewnienie odpowiedniej infrastruktury ładowania i tankowania, dostępności mocy przyłączeniowych oraz dostosowanie organizacji pracy zajezdni i rozkładów jazdy. Jednocześnie stwierdzono, że całkowity koszt cyklu życia (TCO) tych pojazdów, mimo wyższych nakładów inwestycyjnych, może być konkurencyjny względem pojazdów konwencjonalnych dzięki niższemu kosztowi energii i utrzymania oraz efektom środowiskowym, takim jak redukcja emisji zanieczyszczeń i hałasu.

Wnioski z przeprowadzonej analizy wskazują, że skuteczna transformacja taboru transportu publicznego wymaga zintegrowanego podejścia uwzględniającego rozwój infrastruktury, stabilne ramy regulacyjne oraz optymalizację procesów eksploatacyjnych, co warunkuje osiągnięcie zarówno efektywności ekonomicznej, jak i celów środowiskowych.

**Słowa kluczowe:** pojazdy niskoemisyjne, pojazdy zeroemisyjne, ekologia, rynek motoryzacyjny, transport publiczny

### Abstract

This article assesses the conditions and efficiency of operating low- and zero-emission vehicles in public transport systems, with particular emphasis on their technological, economic, and organizational implications. The study is based on the analysis of legal regulations, industry data, and available research findings on the performance of modern propulsion systems in public transport.

The results of the analysis indicate that the implementation of electric, hydrogen, and hybrid buses involves significant infrastructural and operational challenges, including the provision of adequate charging and refuelling infrastructure, the availability of grid connection capacity, and the adaptation of depot operations and timetabling. At the same time, it has been found that the total cost of ownership (TCO) of these vehicles, despite higher initial investment costs, can be competitive compared to conventional vehicles due to lower energy and maintenance costs, as well as environmental benefits such as reduced emissions and noise.

The study suggests that an effective transformation of public transport fleets requires an integrated approach that includes infrastructure development, stable regulatory frameworks, and the optimization of operational processes, which together determine both economic efficiency and the achievement of environmental objectives.

**Keywords:** low-emission vehicles, zero-emission vehicles, ecology, automotive market, public transport

## Wprowadzenie

W ostatnich latach w Europie, w tym w Polsce, przyspiesza elektryfikacja i dekarbonizacja transportu publicznego. Coraz więcej przedsiębiorstw decyduje się na zakup autobusów nisko- i zeroemisyjnych, głównie ze względu na regulacje prawne i dostępność wsparcia finansowego. Kluczową rolę odgrywają akty prawne UE: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r.

w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, zastąpiona Rozporządzeniem AFIR (UE) 2023/1804, określającym wymagania dotyczące infrastruktury ładowania i tankowania paliw alternatywnych, oraz Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1161 z dnia 20 czerwca 2019 r. zmieniająca dyrektywę 2009/33/WE w sprawie promowania ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów transportu drogowego, obligująca do określonego udziału pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w zamówieniach publicznych.

Transformacja transportu wpisuje się w politykę klimatyczną UE (Fit for 55, Europejski Zielony Ład) z celem redukcji emisji o 55% do 2030 roku i neutralności klimatycznej do 2050 roku. W Polsce realizacja tych celów jest wspierana między innymi przez Krajowy Plan Odbudowy, fundusze spójności i programy Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska, na przykład „Zielony Transport Publiczny”. Przykładem jest Olsztyn, inwestujący w nisko- i zeroemisyjny tabor oraz rozwój sieci tramwajowej, co poprawia jakość powietrza, redukuje hałas i zwiększa komfort podróży.

Wdrażanie takich pojazdów wiąże się jednak z wyzwaniami: modernizacją infrastruktury, wysokimi kosztami, ograniczonym zasięgiem, czasem ładowania oraz potrzebą szkoleń dla personelu i dostosowania rozkładów jazdy (Rącka, Szczupak, 2025). Jednocześnie pojazdy zeroemisyjne przyczyniają się do poprawy jakości powietrza, redukcji CO<sub>2</sub> i hałasu oraz zwiększenia atrakcyjności transportu zbiorowego (Janczewski, Janczewska, 2022).

Celem artykułu jest przedstawienie problematyki wdrażania pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w transporcie publicznym ze szczególnym uwzględnieniem barier i wpływu na jakość usług.

## **Środki transportu niskoemisyjnego w transporcie publicznym**

W świetle najbardziej aktualnych regulacji i praktyki rynkowej definicja transportu niskoemisyjnego uległa istotnemu doprecyzowaniu. Obecnie – w kontekście zamówień publicznych i polityki UE – kluczowe znaczenie ma Dyrektywa (UE) 2019/1161 (tak zwana dyrektywa w sprawie czystych pojazdów), która określa, jakie pojazdy mogą być uznawane za „czyste” (ang. *low-emission*) oraz „zeroemisyjne”. W przypadku autobusów definicja ta opiera się na progach emisji CO<sub>2</sub> i zanieczyszczeń oraz – w perspektywie po 2026 roku – w coraz większym stopniu premiuje rozwiązania całkowicie bezemisyjne (elektryczne i wodorowe).

Jako środki transportu niskoemisyjne należy rozumieć pojazdy zasilane na gaz (CNG, LNG, LPG), hybrydowe (mHEV, HEV, PHEV „plug-in”) oraz z napędem konwencjonalnym spełniającym normę emisji spalin EURO 6 (*Odbiór stacji ładowania pojazdów elektrycznych krok po kroku*, 2019). W aktualnym ujęciu za pojazdy niskoemisyjne w transporcie publicznym można uznać:

- autobusy zasilane gazem ziemnym (CNG, LNG), w tym w coraz większym stopniu bioCNG i bioLNG,

- autobusy hybrydowe (mHEV, HEV, PHEV),
- wybrane autobusy z silnikiem Diesla spełniające normę EURO 6, jednak ich rola systematycznie maleje w związku z zaostrzaniem celów klimatycznych,
- pojazdy wykorzystujące paliwa alternatywne o obniżonym śladzie węglowym (na przykład biometan).

Jednocześnie należy podkreślić, że w obecnej polityce UE oraz w świetle pakietu Fit for 55 rośnie nacisk na pełną zeroemisyjność, a rozwiązania gazowe czy hybrydowe traktowane są coraz częściej jako technologie przejściowe.

Tab. 1. Rodzaje autobusów zasilanych gazem ziemnym

Rodzaj zasilania gazem	Charakterystyka rodzaju zasilania gazem ziemnym
CNG (ang. <i>compressed natural gas</i> )	<p>Sprężony gaz ziemny (CNG) to paliwo składające się głównie z metanu (zwykle 90–98%). W porównaniu z olejem napędowym umożliwia redukcję emisji tlenków azotu (NOx), cząstek stałych (PM) oraz hałasu. Aktualnie szczególne znaczenie zyskuje bioCNG, czyli biometan oczyszczony do parametrów gazu ziemnego i włączany do tej samej infrastruktury. W ujęciu bilansu „well-to-wheel” bioCNG może znacząco obniżyć emisję CO<sub>2</sub>, a w niektórych analizach – przy odpowiednim pochodzeniu surowca – nawet zbliżyć się do neutralności klimatycznej.</p> <p>Ze względu na niską gęstość energetyczną w przeliczeniu na objętość autobusy CNG wymagają stosowania wysokociśnieniowych zbiorników (zwykle 200–250 bar) montowanych najczęściej na dachu pojazdu. Konstrukcja silnika jest przystosowana do spalania gazu, a jednostki napędowe różnią się od klasycznych silników Diesla (zapłon iskrowy zamiast samoczynnego).</p>
LNG (ang. <i>liquefied natural gas</i> )	<p>LNG to gaz ziemny skroplony poprzez schłodzenie do temperatury około –162°C, co zmniejsza jego objętość około 600-krotnie. W autobusach (rzadziej niż w transporcie ciężkim dalekobieżnym) przechowywany jest w zbiornikach kriogenicznych. Zaletą LNG jest większy zasięg pojazdu w porównaniu z CNG przy podobnej masie paliwa. Obecnie, podobnie jak w przypadku CNG, rośnie znaczenie bioLNG jako paliwa o niższym śladzie węglowym.</p> <p>Należy jednak zaznaczyć, że w świetle długoterminowych celów klimatycznych UE technologie oparte na gazie ziemnym są postrzegane jako etap przejściowy w drodze do pełnej elektryfikacji lub wykorzystania wodoru odnawialnego.</p>

Źródło: Wolański, 2023.

Wśród autobusów hybrydowych wyszczególnić należy te przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Podział autobusów hybrydowych i ich charakterystyka

Rodzaj zasilania hybrydowego	Charakterystyka zasilania hybrydowego
mHEV (ang. <i>mild hybrid</i> – miękka hybryda)	System mHEV w autobusach miejskich opiera się zazwyczaj na architekturze 48 V. Silnik elektryczny (generator/rozrusznik) wspomaga jednostkę spalinową, odzyskuje energię z hamowania (rekuperacja) i umożliwia sprawne wyłączenie silnika podczas postoju (rozszerzony system start-stop). Energia magazynowana jest w niewielkich bateriach litowo-jonowych lub superkondensatorach. W odróżnieniu od pełnej hybrydy mHEV nie umożliwia samodzielnej jazdy wyłącznie w trybie elektrycznym. Celem systemu jest ograniczenie zużycia paliwa (zwykle o kilka–kilkanaście procent) oraz redukcja emisji w ruchu miejskim.
HEV (ang. <i>hybrid</i> – pełna hybryda)	Autobusy HEV wyposażone są w silnik spalinowy (Diesel lub CNG) oraz silnik elektryczny o większej mocy niż w mHEV. Układ może pracować w różnych trybach: szeregowym, równoległym lub mieszanym (power-split). Pojazd może ruszać i poruszać się na krótkich odcinkach wyłącznie w trybie elektrycznym (zwykle do około 15–20 km/h, w nowszych konstrukcjach nawet dłużej w zależności od pojemności baterii). Energia elektryczna pochodzi z: rekuperacji podczas hamowania, pracy silnika spalinowego napędzającego generator, w niektórych konstrukcjach z zewnętrznego ładowania (w przypadku PHEV). W porównaniu z mHEV system HEV zapewnia większe oszczędności paliwa (często 15–25% w ruchu miejskim) oraz wyraźnie niższą emisję zanieczyszczeń lokalnych.
PHEV (ang. <i>plug-in hybrid</i> )	Autobusy typu plug-in hybrid mają możliwość ładowania baterii z zewnętrznego źródła energii. Pozwala to na pokonywanie dłuższych odcinków w trybie całkowicie elektrycznym, szczególnie w centrach miast lub strefach niskoemisyjnych. W praktyce jednak w segmencie autobusów miejskich technologia ta jest mniej rozpowszechniona niż klasyczne HEV i autobusy w pełni elektryczne.

Źródło: Targowski, Wójtowicz, Sochacki, 2025: 73.

Wraz z wejściem w życie Rozporządzenie AFIR (UE) 2023/1804 oraz realizacją celów klimatycznych UE obserwuje się wyraźne przesunięcie akcentu z technologii niskoemisyjnych (gaz, hybrydy) w kierunku technologii zeroemisyjnych – przede wszystkim autobusów bateryjnych (BEV) oraz wodorowych (FCEV). W wielu krajach UE nowe zamówienia publiczne w coraz większym stopniu obejmują wyłącznie pojazdy zeroemisyjne, a rozwiązania gazowe i hybrydowe pełnią rolę pomostową w okresie przejściowym.

## Problematyka eksploatacji poszczególnych napędów nisko- i zeroemisyjnych

Eksploatacja pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w transporcie publicznym wymaga uwzględnienia zarówno aspektów technicznych, infrastrukturalnych, jak i finansowych. Poniżej przedstawiono charakterystykę poszczególnych typów napędów wraz z aktualnymi wyzwaniami eksploatacyjnymi.

## Gaz CNG

Pojazdy zasilane sprężonym gazem ziemnym (CNG – ang. *compressed natural gas*) cechują się wyższymi kosztami zakupu w porównaniu do autobusów Diesla, wynikającymi z konieczności adaptacji jednostki napędowej do właściwości gazu (Glinka, Fice, Setlak, 2006).

Eksploatacja wymaga również dedykowanej infrastruktury tankowania w zajezdniach, w tym kompresorów, osuszaczy i wysokociśnieniowych zbiorników. W Polsce liczba publicznych stacji CNG jest ograniczona, co często zmusza operatorów do inwestycji we własne punkty tankowania. Pod względem środowiskowym autobusy CNG mogą w pewnych warunkach generować wyższą emisję CO, CO<sub>2</sub> oraz węglowodorów w porównaniu do jednostek dieslowskich (około 22%) (Merkisz i in., 2015). Dodatkowo pojazdy te cechuje nieco wyższe zużycie paliwa. Planując trasy, należy uwzględnić ich zwiększoną wysokość wynikającą z montażu zbiorników na dachu, co ogranicza możliwość przejazdu pod niskimi wiaduktami (Wolański, 2012).

## Gaz LNG

Autobusy zasilane skroplonym gazem ziemnym (LNG – ang. *liquefied natural gas*) dzielą część wyzwań charakterystycznych dla CNG, w szczególności związanych z infrastrukturą tankowania. Budowa stacji LNG oraz zapewnienie dostaw paliwa generuje dodatkowe koszty i wymaga planowania logistycznego.

Eksploatacja LNG wiąże się także z koniecznością stosowania rygorystycznych procedur bezpieczeństwa ze względu na ekstremalnie niską temperaturę paliwa (około -162°C). Pracownicy tankujący LNG muszą korzystać ze specjalistycznej odzieży ochronnej i przejść odpowiednie szkolenia (*Shell LNG Outlook 2024*, 2004; Wolański, 2012). Koszty te zwiększają całkowite wydatki eksploatacyjne floty.

## Pojazdy hybrydowe

Autobusy hybrydowe, mimo obecności napędu elektrycznego, nadal wymagają obsługi jednostki spalinowej, w tym wymiany oleju, płynów eksploatacyjnych i filtrów. Dodatkowe ryzyka dotyczą komponentów układu elektrycznego, takich jak baterie, superkondensatory, silnik elektryczny, falownik czy moduł sterujący układem hybrydowym.

W przypadku PHEV (ang. *plug-in hybrid*) konieczne jest rozważenie infrastruktury do ładowania baterii w zajezdniach lub na końcowych przystankach, co generuje dodatkowe koszty i wymaga przestrzeni (Kujda, Pawlak, 2020). Długoterminowa eksploatacja wiąże się również z degradacją baterii i superkondensatorów, co może prowadzić do częstszego uruchamiania silnika spalinowego i wyższego zużycia paliwa.

## Autobusy elektryczne BEV

Autobusy elektryczne zasilane bateriami (BEV – ang. *battery electric vehicles*) stanowią dominujący segment zeroemisyjny w transporcie miejskim. Ich konstrukcja

różni się znacząco od pojazdów spalinowych – brak klasycznej skrzyni biegów i natychmiast dostępny moment obrotowy zapewniają płynną i cichą jazdę. W pełni elektryczne autobusy eliminują emisję spalin w miejscu pracy i znacząco ograniczają hałas, co poprawia komfort pasażerów i jakość życia mieszkańców miast (*Pełna gama zelektryfikowanych autobusów miejskich i najnowszy autokar Volvo na Warsaw Bus Expo*, 2019).

Główne wyzwania eksploatacyjne obejmują konieczność budowy infrastruktury ładowania, w tym ładowarek szybkich i wysokiej mocy w zajezdniach, monitorowanie stanu baterii i ich degradacji w długiej perspektywie, planowanie tras i harmonogramów z uwzględnieniem zasięgu i czasu ładowania pojazdów, a także zarządzanie obciążeniem sieci energetycznej w mieście.

### **Autobusy wodorowe FCEV**

Autobusy wodorowe (FCEV – ang. *fuel cell electric vehicles*) generują energię elektryczną bezpośrednio na pokładzie poprzez reakcję wodoru z tlenem w ogniwach paliwowych. Produktem ubocznym jest wyłącznie woda, co czyni je całkowicie zeroemisyjnymi. Ich główną zaletą jest większy zasięg na jednym tankowaniu oraz czas napełniania porównywalny z tradycyjnymi pojazdami spalinowymi (Kujda, Pawlak, 2020).

Wyzwania eksploatacyjne obejmują przede wszystkim dostępność stacji tankowania wodoru, zapewnienie wodoru pochodzącego ze źródeł odnawialnych w celu utrzymania pełnej neutralności klimatycznej, kontrolę sprawności ogniw paliwowych i ich systematyczną konserwację, a także szkolenia personelu w zakresie bezpieczeństwa i obsługi wodoru.

W praktyce w miastach stosuje się strategie mieszane, w których autobusy elektryczne BEV funkcjonują w gęstych obszarach miejskich, a autobusy wodorowe obsługują trasy podmiejskie i dalekobieżne, zapewniając optymalizację zasięgu i kosztów eksploatacji.

## **Środki transportu zeroemisyjnego w transporcie publicznym**

W segmencie zeroemisyjnym dominują obecnie autobusy elektryczne zasilane z baterii (BEV). Różnią się one znacząco od pojazdów spalinowych nie tylko pod względem konstrukcyjnym – na przykład brakiem klasycznej skrzyni biegów – ale również dynamiką jazdy, dzięki natychmiast dostępnemu momentowi obrotowemu. Nowoczesne autobusy elektryczne eliminują emisję spalin w miejscu pracy i znacząco redukują hałas, co ma bezpośredni wpływ na komfort pasażerów oraz jakość życia mieszkańców w centrach miast (*Pełna gama zelektryfikowanych autobusów miejskich i najnowszy autokar Volvo na Warsaw Bus Expo*, 2019).

W ostatnich latach rośnie także znaczenie autobusów wodorowych (FCEV), które stanowią uzupełnienie oferty zeroemisyjnej w przypadku tras o większej długości lub wymagających szybkiego tankowania. W przeciwieństwie do autobusów

baterijnych w pojazdach wodorowych prąd potrzebny do napędu generowany jest na pokładzie za pomocą ogniw paliwowych, w których wodór reaguje z tlenem, wytwarzając energię elektryczną i wodę jako jedyny produkt uboczny (Kujda, Pawlak, 2020). Ich zaletą jest znacznie większy zasięg na jednym tankowaniu w porównaniu do standardowych autobusów elektrycznych oraz krótszy czas „tankowania” wodorowego, zbliżony do czasów tankowania pojazdów konwencjonalnych.

Warto jednak podkreślić, że efektywność eksploatacyjna autobusów wodorowych zależy od kilku czynników systemowych: jakości i sposobu wytwarzania wodoru (preferowane są źródła odnawialne), sprawności ogniw paliwowych oraz współpracy z infrastrukturą energetyczną i logistyką miejską. Podobnie jak w przypadku autobusów elektrycznych kluczowa jest efektywność baterii, możliwość szybkiego ładowania oraz integracja z siecią energetyczną miasta.

Pomimo że nowoczesne silniki spalinowe spełniające normę Euro 6 mogą osiągać niskie emisje, w centrach miejskich to właśnie pojazdy zeroemisyjne uznawane są za rozwiązanie docelowe. Dążenie do całkowitej eliminacji emisji spalin w aglomeracjach miejskich jest nie tylko wymogiem ekologicznym, ale również narzędziem poprawy jakości powietrza, ograniczenia hałasu i zwiększenia atrakcyjności transportu zbiorowego (Wołoszyn, 2012). W perspektywie kolejnych lat przewiduje się, że rozwój infrastruktury ładowania wysokiej mocy oraz stacji tankowania wodoru, a także postęp w technologii baterii i ogniw paliwowych przyspieszy transformację flot miejskich w kierunku pełnej zeroemisyjności.

Dodatkowo obserwuje się rosnące znaczenie tak zwanych strategii mieszanych, w których autobusy elektryczne i wodorowe funkcjonują równolegle, dopasowując typ napędu do charakterystyki trasy. Autobusy elektryczne sprawdzają się najlepiej w gęstych, miejskich aglomeracjach, gdzie częste ładowanie jest możliwe w zajezdniach lub na pętlach, natomiast autobusy wodorowe są efektywne na trasach podmiejskich i dalekobieżnych, gdzie infrastruktura ładowania bateryjnego byłaby niewystarczająca. Takie podejście pozwala na maksymalizację wykorzystania taboru, minimalizację emisji oraz optymalizację kosztów eksploatacji.

## **Problematyka eksploatacji wymienionych napędów zeroemisyjnych**

W przypadku elektromobilności problemy mają inny charakter i dotyczą przede wszystkim przeciążenia miejskich sieci elektroenergetycznych. W zależności od wybranej strategii ładowania – czy to wolne, realizowane pod zajezdnią, czy szybkie przy pętlach z wykorzystaniem pantografu – potrzebne są odpowiednie przyłącza. Według Volvo Buses systemy szybkiego ładowania wymagają budowy masztów pantografowych o mocy często przekraczającej 300–450 kW, co generuje duże obciążenia dla lokalnych sieci (*Pełna gama zelektryfikowanych autobusów miejskich i najnowszy autokar Volvo na Warsaw Bus Expo, 2019*).

To z kolei zazwyczaj wiąże się z koniecznością budowy nowych stacji transformatorowych, co w ścisłej zabudowie miejskiej – na przykład w Olsztynie – napotyka problemy związane z pozyskiwaniem gruntów i długimi procedurami administracyjnymi (*Audytel. Analiza kosztów i korzyści związanych z wykorzystaniem autobusów zeroemisyjnych dla gminy Olsztyn*, 2021). Do tego dochodzi problem braku pełnej standaryzacji złączy i protokołów komunikacyjnych. Mimo starań o unifikację wymogów wynikających z dyrektywy w praktyce operatorzy mają często do czynienia z niekompatybilnością pomiędzy różnymi dostawcami taboru i infrastrukturą ładowania (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, PE-CONS79/2/14 REV 2). Hybrydy radzą sobie lepiej na tym polu, bo mogą tankować paliwo tradycyjne i nie potrzebują od razu rozbudowanej sieci ładowarek, co ułatwia wejście na rynek mniejszym przewoźnikom (Rusak, 2010; 2018).

Dla autobusów w pełni elektrycznych konieczne bywa jednak gruntowne dostosowanie całej zajezdni, włącznie z systemami przeciwpożarowymi i zarządzaniem energią (Smart Charging), żeby nie przekraczać limitów mocy zamówionej (Gis, 2017). Dodatkowo trzeba także uwzględnić koszty wymiany pakietów bateryjnych po około 6–8 latach użytkowania, co bywa znaczącym wydatkiem w budżecie remontowym. Volvo Buses proponuje systemy zarządzania energią, które wydłużają żywotność baterii, ale ryzyko finansowe związane z ich degradacją pozostaje po stronie operatora (*Pełna gama zelektryfikowanych autobusów miejskich i najnowszy autotokar Volvo na Warsaw Bus Expo*, 2019).

Maciej Gis zwraca uwagę na zmieniające się ceny energii elektrycznej i gazu, co niestety komplikuje prognozy kosztów operacyjnych na okres nawet 10 lat i wprowadza duży margines niepewności (Gis, 2017). Na koniec ekonomiczny sukces wdrożenia w dużej mierze zależy od efektywnego zarządzania infrastrukturą i optymalnego wykorzystania ładowania poza godzinami szczytu (Gis, 2017). Z punktu widzenia planowania ruchu eksploatacja autobusów bateryjnych wymusza wprowadzenie nowych ograniczeń, nieobecnych w tradycyjnych pojazdach spalinowych. Trzeba brać pod uwagę przerwy na ładowanie w ciągu dnia, co wpływa na konstruowanie rozkładów jazdy i obiegi taboru. Ministerstwo Infrastruktury podaje przykłady, gdzie optymalizacja tych aspektów jest kluczowa dla utrzymania ciągłości usług, szczególnie poza miastem, gdzie odległości są większe (*Zero i niskoemisyjny transport zbiorowy (autobusy) – w zakresie komunikacji pozamiejskiej*, b.r.).

W takich miejscach, jak Olsztyn organizacja transportu musi efektywnie łączyć wymagania techniczne z potrzebami pasażerów, co często oznacza konieczność utrzymania większego zapasu pojazdów (*Audytel. Analiza kosztów i korzyści związanych z wykorzystaniem autobusów zeroemisyjnych dla gminy Olsztyn*, 2021). Cicha praca silników elektrycznych, choć jest zaletą z punktu widzenia komfortu, wymaga instalacji systemów ostrzegających dźwiękowo pieszych i rowerzystów (AVAS). Ponadto pożary baterii litowo-jonowych wprowadzają nowe wyzwania dla służb

ratowniczych, które muszą być przygotowane do specyficznych interwencji (Gis, 2017; Wołoszyn, 2012).

Eksploatacja pojazdów wodorowych generuje istotny problem przy ich wdrażaniu, ponieważ cena pojedynczego autobusu wodorowego może wynosić około 8 milionów złotych, dla porównania cena pojazdu z napędem konwencjonalnym jest około osiem razy niższa (Kujda, Pawlak, 2020). Istotnym problemem przy wdrażaniu tego napędu do floty jest zapewnienie stacji tankowania wodoru. Podobnie jak w przypadku sieci stacji paliw CNG w Polsce sieć stacji wodoru jest bardzo mocno ograniczona i liczy jedynie 6 stacji tankowania, co może wymusić na przedsiębiorstwie budowę własnej stacji bądź znalezienie dostawcy (*Stacje wodorowe w Polsce*, 2026).

## Podsumowanie

Wdrażanie pojazdów nisko- i zeroemisyjnych w komunikacji publicznej nie sprowadza się dziś wyłącznie do zakupu nowego taboru. To proces systemowy, który obejmuje zmiany w planowaniu transportu, organizacji pracy zajezdni, zarządzaniu energią, a także w sposobie finansowania inwestycji. Doświadczenia ostatnich lat pokazują, że powodzenie transformacji zależy od spójnego działania na poziomie prawnym, technicznym i ekonomicznym.

Na poziomie europejskim punktem wyjścia była Dyrektywa 2014/94/UE, która zapoczątkowała rozwój infrastruktury paliw alternatywnych. Obecnie jej rolę przejęło Rozporządzenie AFIR (UE) 2023/1804, wprowadzające bezpośrednio obowiązujące cele dotyczące liczby i mocy punktów ładowania oraz stacji tankowania wodoru. Równoległe Dyrektywa (UE) 2019/1161 zobowiązuje podmioty publiczne do stopniowego zwiększania udziału autobusów nisko- i zeroemisyjnych w zamówieniach. W praktyce oznacza to, że transformacja nie jest już wyłącznie wyborem wizerunkowym, lecz elementem realizacji konkretnych zobowiązań prawnych.

Polskie miasta pokazują, że taki proces jest możliwy, choć wymaga konsekwencji i długofalowej strategii. Przykładem może być Olsztyn, który rozwija zarówno sieć tramwajową, jak i flotę autobusów elektrycznych, łącząc inwestycje taborowe z modernizacją infrastruktury i wykorzystaniem środków krajowych oraz unijnych. Kluczowe znaczenie ma tu wsparcie centralne (między innymi programy NFOŚiGW, środki z polityki spójności i KPO), bez którego tempo zmian byłoby znacznie wolniejsze.

Podsumowując, kierunek zmian w transporcie publicznym wydaje się już przesądzony. Elektryfikacja i rozwój napędów alternatywnych są elementem szerszej strategii dekarbonizacji gospodarki. Choć bariery techniczne i finansowe wciąż istnieją, postęp w technologii magazynowania energii, rozwój infrastruktury oraz rosnąca skala produkcji systematycznie je ograniczają. W perspektywie najbliższych lat można oczekiwać dalszego wzrostu udziału autobusów bateryjnych oraz stop-

niowego rozwoju napędów wodorowych, co w dłuższej perspektywie może doprowadzić do niemal całkowitego odejścia komunikacji miejskiej od paliw kopalnych i wzmocnienia fundamentów zrównoważonego rozwoju miast.

## Bibliografia

- Audytel. Analiza kosztów i korzyści związanych z wykorzystaniem autobusów zeroemisyjnych dla gminy Olsztyn* (2021), [https://olsztyn.eu/fileadmin/energia/AKK/2021/20210930\\_AKK\\_Olsztyn\\_wersja\\_po\\_II\\_turze\\_uwag\\_na\\_konsultacje.pdf](https://olsztyn.eu/fileadmin/energia/AKK/2021/20210930_AKK_Olsztyn_wersja_po_II_turze_uwag_na_konsultacje.pdf) [dostęp: 25.02.2026].
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/1161 z dnia 20 czerwca 2019 r. zmieniająca dyrektywę 2009/33/WE w sprawie promowania ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów transportu drogowego, PE/57/2019/REV/2.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, PE-CONS79/2/14 REV 2.
- Gis M. (2017), *Przegląd napędów i paliw stosowanych w autobusach miejskich*, „Transport Samochodowy”, z. 1, s. 65–84.
- Glinka T., Fice M., Setlak R. (2006), *Hybrydowy napęd pojazdu miejskiego*, „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, nr 75, s. 95–100.
- Janczewski J., Janczewska D. (2022), Zrównoważona mobilność miejska – dobre praktyki, „Zarządzanie Innowacyjne w Gospodarce i Biznesie”, nr 33(2), s. 165–196.
- Król E., Flekiewicz M. (1997), *Gaz ziemny jako paliwo do napędu pojazdów samochodowych – doświadczenia i perspektywy*, „Nafta – Gaz”, nr 7–8, s. 327–331.
- Kujda P., Pawlak K. (2020), *Ekologiczne rozwiązania zrównoważonego transportu publicznego – niskoemisyjność i bezemisyjność środków komunikacji miejskiej*, „Journal of TransLogistics”, vol. 16, s. 67–78.
- Merkisz J., Pielecha J., Gis W., Gis M., Jasiński R. (2015), *Ocena porównawcza emisji zanieczyszczeń spalin autobusów: zasilanego CNG i olejem napędowym*, „Combustion Engines”, vol. 54(3), s. 775–781.
- Odbiór stacji ładowania pojazdów elektrycznych krok po kroku* (2019), Warszawa: Polskie Stowarzyszenie Nowej Mobilności.
- Pełna gama zelektryfikowanych autobusów miejskich i najnowszy autokar Volvo na Warsaw Bus Expo* (2019), [https://www.volvobuses.com/pl/news/2019/march/pe\\_na-gama-zelektryfikowanych-autobusow-miejskich-.html](https://www.volvobuses.com/pl/news/2019/march/pe_na-gama-zelektryfikowanych-autobusow-miejskich-.html) [dostęp: 25.02.2026].

- Rącka I., Szczupak L. (2025), *Zrównoważony rozwój transportu zbiorowego w średnich miastach w Polsce: stan obecny, wyzwania i plany na przyszłość*, „Studia Miejskie”, vol. 49, s. 59–71.
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/1804 z dnia 13 września 2023 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych i uchynienia dyrektywy 2014/94/UE (Tekst mający znaczenie dla EOG), Dz.U. UE L 234, 22.9.2023.
- Rusak Z. (2010), *Rodzina hybrydowych autobusów z Bolechowa powiększa się*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, R. 11, nr 4, s. 18–23.
- Rusak Z. (2018), *Mercedes-Benz Citaro C2 Light Hybrid: Autobus roku 2019*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, R. 19, nr 10, s. 12–19.
- Shell LNG Outlook 2024 (2004), <https://www.shell.com/what-we-do/oil-and-natural-gas/liquefied-natural-gas-lng-outlook-2024.html> [dostęp: 28.04.2026].
- Stacje wodorowe w Polsce (2026), <http://gashd.eu/wodor-h2/stacje-wodorowe-w-polsce/> [dostęp: 25.02.2026].
- Targowski F., Wójtowicz S., Sochacki T. (2025), *Transport i mobilność w ujęciu historycznym i współczesnym*, [w:] G. Tchorek, M. Kołtuniak (red.), *Wybrane aspekty transformacji klimatycznej i energetycznej*, Warszawa: Sekcja Wydawnicza Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, s. 73–91.
- Wojewoda P. (2012), *Metodyka doboru silnika spalinowego do wybranej konfiguracji napędu hybrydowego autobusu miejskiego*, Rozprawa doktorska, Rzeszów: Politechnika Rzeszowska.
- Wolański M. (2023), *Analiza rozwoju zeroemisyjnego, zbiorowego transportu drogowego (autobusy, trolejbusy, tramwaje) w Polsce wraz z rekomendacjami działań legislacyjnych i pozalegisacyjnych dla administracji publicznej i samorządowej, które będą dostosowane do krajowych warunków ekonomiczno-społecznych*, <https://zpp.pl/storage/library/2024-08/de94151f1c57314de4aac513d478eb63.pdf> [dostęp: 23.04.2026].
- Wolański W. (2012), *LNG – ekologiczne paliwo w autobusach marki Solbus*, [https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-LOD-C-0003-0020/c/wolanski\\_LNG\\_ss\\_1\\_2012.pdf](https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-LOD-C-0003-0020/c/wolanski_LNG_ss_1_2012.pdf) [dostęp: 25.02.2026].
- Wołoszyn R. (2012), *Technologia redukcji spalin Euro 6 dla autobusów: rozwiązania na przykładzie silników firmy MAN*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, R. 13, nr 10, s. 22–26.
- Zero i niskoemisyjny transport zbiorowy (autobusy) – w zakresie komunikacji pozamiejskiej, b.r., <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/zero-i-niskoemisyjny-transport-zbiorowy-autobusy--w-zakresie-komunikacji-pozamiejskiej> [dostęp: 25.02.2026].

### O autorach

**Mikołaj Nakonieczny** – student pierwszego roku studiów I stopnia na kierunku transport i logistyka na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Członek Studenckiego Koła Naukowego Transport i Spedycja.

**Paweł Kucharski** – student pierwszego roku studiów I stopnia na kierunku transport i logistyka na Wydziale Inżynierii Produkcji Uniwersytetu Przyrodniczego w Lublinie. Członek Studenckiego Koła Naukowego Transport i Spedycja.

### About the Authors

**Mikołaj Nakonieczny** – a first-year undergraduate student in Transport and Logistics at the Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin. He is a member of the Student Academic Circle of Transport and Freight Forwarding.

**Paweł Kucharski** – a first-year undergraduate student in Transport and Logistics at the Faculty of Production Engineering, University of Life Sciences in Lublin. He is a member of the Student Academic Circle of Transport and Freight Forwarding.

