



Politechnika
Śląska

Rozprawa doktorska

Środowiskowa ocena cyklu życia zastosowania wodoru
w transporcie drogowym

mgr inż. Iga Przytuła

Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej
Katedra Transportu Drogowego
Dyscyplina: Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

PROMOTOR
prof. dr hab. inż. Dorota Burchart

KATOWICE, 2026

Spis treści

1.	Wprowadzenie.....	3
2.	Przegląd literatury	5
2.1.	Emisje gazów cieplarnianych z sektora transportu w krajach Unii Europejskiej	5
2.2.	Aspekty prawne związane z rozwojem rynku wodoru jako paliwa alternatywnego .	8
2.3.	Stan transportu publicznego autobusowego w Polsce.....	13
2.4.	Autobusy z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem	15
2.5.	Ogniwa paliwowe oraz ich zastosowanie w pojazdach drogowych.....	17
2.6.	Stacje tankowania wodorem oraz infrastruktura towarzysząca	22
2.7.	Produkcja wodoru	24
2.8.	Istota analizy LCA w transporcie	27
2.9.	Ślad węglowy pojazdów elektrycznych	29
3.	Podsumowanie przeglądu literatury	32
4.	Cel i zakres pracy	34
	CZĘŚĆ BADAWCZA	37
5.	Metodyka badawcza	37
5.1.	Narzędzie badawcze	37
5.2.	Określenie granic systemu	37
5.3.	Wyznaczenie jednostki funkcjonalnej.....	40
5.4.	Wybór metody oceny środowiskowej	40
6.	Identyfikacja i inwentaryzacja danych	44
6.1.	Produkcja energii elektrycznej ze spalania biomasy	44
6.2.	Produkcja wodoru	46
6.3.	Transport wodoru i jego sprężanie	49
6.4.	Eksploatacja autobusu 12 metrowego z ogniwami paliwowymi	52
6.5.	Wyniki analizy cyklu życia wodoru jako paliwa alternatywnego.....	57
7.	Analiza LCA autobusu z ogniwami paliwowymi	63
7.1.	Inwentaryzacja danych i struktura podzespołów.....	63
7.2.	Wyniki oceny wpływu produkcji autobusu z ogniwami paliwowymi	69
8.	Analiza całego cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi	75
9.	Analiza niepewności danych metodą Monte Carlo	81
10.	Analiza scenariuszowa- ocena wpływu zmiany parametrów wejściowych na cały cykl życia autobusu z ogniwami paliwowymi	87
10.1.	Analiza porównawcza paliw wykorzystywanych w transporcie autobusowym ..	87
10.2.	Analiza porównawcza metod produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania procesu elektrolizy	98
10.3.	Porównanie różnych metod produkcji wodoru	106

10.4.	Analiza porównawcza wyników analizy scenariuszowej	113
11.	Podsumowanie i wnioski.....	119
	Bibliografia.....	123

1. Wprowadzenie

Światowe problemy środowiskowe, takie jak zmniejszające się zasoby paliw kopalnych i rosnące zanieczyszczenie środowiska, zwiększyły zainteresowanie rozwojem alternatywnych źródeł energii. Szczególne znaczenie widoczne jest w sektorze transportu, który odpowiada za dużą część emisji gazów cieplarnianych. Ograniczenie emisji jest jednym z głównych elementów transformacji energetycznej i środowiskowej. Stanowi ono także jedno z największych wyzwań dla sektora transportu, spedycji i logistyki.

Raport Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (IPCC, ang. Intergovernmental Panel on Climate Change) z marca 2023 r. potwierdza, że działalność człowieka w dużym stopniu wpływa na zmiany klimatyczne [1]. Wskazuje on na konieczność szybkiej redukcji emisji gazów cieplarnianych, aby ograniczyć ryzyko coraz częstszych i bardziej intensywnych zjawisk pogodowych, takich jak fale upałów, długotrwałe susze czy gwałtowne opady deszczu. Według raportów IPCC, aby utrzymać globalny wzrost temperatury w granicach 1,5 °C, emisje GHG muszą zostać obniżone o 43% do 2030 r. i aż o 84% do 2050 r. w porównaniu z 2019 r. Oznacza to, że osiągnięcie neutralności klimatycznej, czyli zerowej emisji netto CO₂, do połowy XXI wieku staje się nie tylko celem, ale wręcz koniecznością [1].

Sektor transportu należy do największych źródeł emisji gazów cieplarnianych zarówno w Europie, jak i na świecie. W 2021 r. odpowiadał on za 24,1% całkowitej emisji w Unii Europejskiej, z czego aż 76% przypadało na transport drogowy [2,3,4]. W skali globalnej w 2022 r. emisje CO₂ z transportu osiągnęły poziom około 8 000 000 Mg, a w stosunku do roku 2021 był to wzrost o 3% [2,5]. Dane te wyraźnie pokazują, że konieczne jest podjęcie bardziej zdecydowanych działań na rzecz dekarbonizacji tego sektora. Szczególne znaczenie w tym zakresie ma rozwój technologii niskoemisyjnych, w tym napędów elektrycznych, hybrydowych czy z ogniwami paliwowymi.

Już na początku lat 80. XX wieku w Unii Europejskiej rozpoczęto prace nad wykorzystaniem wodoru jako nośnika energii. Wodór, dzięki szerokim możliwościom wykorzystania i braku emisji zanieczyszczeń podczas użytkowania zyskał status paliwa przyszłości, mogącego w długim okresie pozytywnie oddziaływać na wiele sektorów gospodarki. Jego znaczenie wzrasta szczególnie w czasach teraźniejszych, kiedy to coraz bardziej restrykcyjne przepisy emisyjne wymuszają wdrażanie technologii przyjaznych środowisku. W ostatnich latach głównie koncentrowano się na pojazdach elektrycznych z akumulatorami litowo-jonowymi, jednak równolegle rozwijana była alternatywa w postaci pojazdów elektrycznych z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem.

Wodór ma najwyższą przewodność cieplną spośród gazów oraz wysoką wartość opałową, co czyni go bardzo wydajnym nośnikiem energii. Proces wytwarzania energii w pojazdach zasilanym wodorem jest praktycznie bezemisyjny. Jedynym produktem ubocznym procesów elektrochemicznych w ogniwie paliwowym jest para wodna. Dodatkową zaletą jest możliwość produkcji wodoru przy wykorzystaniu energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł. Mimo zalet, technologia ta wciąż napotyka bariery rozwojowe. W 2023 r. w Unii Europejskiej zarejestrowano zaledwie 5939 pojazdów z ogniwami paliwowymi [6], podczas gdy liczba nowych rejestracji samochodów elektrycznych z akumulatorami litowo-jonowymi wyniosła aż do 2,4 mln pojazdów [7].

W Polsce skoncentrowano się głównie na rozwoju flot komunikacji miejskich, poprzez zwiększanie w nich udziału autobusów z ogniwami wodorowymi. Pierwszy autobus miejski zasilany wodorem został zarejestrowany w 2020 roku. Do lipca 2025 roku ich liczba systematycznie rosła, osiągając 108 pojazdów eksploatowanych w regularnym ruchu pasażerskim [8]. Równolegle rozwijano infrastrukturę tankowania. Do maja 2025 roku funkcjonowało już 8 ogólnodostępnych stacji wodorowych. [9]

Należy podkreślić, że ocena technologii wodorowych nie powinna ograniczać się wyłącznie do etapu eksploatacji pojazdów, w którym nie występują emisje bezpośrednie. Konieczne jest spojrzenie całościowe, obejmujące proces produkcji paliwa, wytwarzania pojazdu oraz jego utylizacji. Do tego celu wykorzystuje się metodę oceny cyklu życia LCA (ang. Life Cycle Assessment), która pozwala określić, które fazy cyklu życia w największym stopniu oddziałują na środowisko, a także uwzględnić uwarunkowania lokalne, takie jak struktura miksu energetycznego czy specyfika gospodarki danego państwa. W tym kontekście niniejsza praca doktorska koncentruje się na analizie cyklu życia wodoru, wykorzystywanego w transporcie publicznym miejskim w Polsce. Jest to pierwsza praca w Polsce uwzględniająca dane rzeczywiste i przedstawiająca analizy konkretnego przypadku w warunkach krajowych. Jej celem jest wskazanie etapów generujących największe obciążenia środowiskowe oraz porównanie potencjalnych scenariuszy rozwojowych, w tym: różnych metod produkcji wodoru, produkcji energii elektrycznej oraz różnych paliw wykorzystywanych w transporcie drogowym. W pracy uwzględniono rzeczywiste dane dotyczące łańcucha produkcji i dostaw wodoru, użytkowania autobusów oraz ich produkcji, odnosząc się do polskich warunków na rzeczywistych przypadkach.

Wyniki badań mogą umożliwić ocenę, czy wdrożenie technologii wodorowych w polskich warunkach znajduje rzeczywiste uzasadnienie środowiskowe, a także czy mogą stanowić podstawę do formułowania rekomendacji dla polityki transportowej i energetycznej.

Tym samym praca wpisuje się w szersze działania na rzecz zrównoważonego rozwoju i realizacji celów klimatycznych Polski oraz Unii Europejskiej.

2. Przegląd literatury

W celu scharakteryzowania zagadnień związanych z wykorzystaniem wodoru jako paliwa w transporcie oraz jego oddziaływaniem na środowisko dokonano przeglądu stanu wiedzy. Rozdział obejmuje analizę problemu emisji gazów cieplarnianych z transportu, a także aspekty prawne, w tym kwestie związane z rozwojem alternatywnych napędów. W ramach części teoretycznej przedstawiono rodzaje metod produkcji wodoru z różnych źródeł energii, omówiono zasadę działania ogniw paliwowych oraz ich potencjał w transporcie. Dodatkowo opisano uzasadnienie zastosowania analizy cyklu życia (LCA) jako metody pozwalającej na całościową ocenę wpływu technologii transportowych na środowisko z uwzględnieniem wszystkich etapów od pozyskania surowców aż po zakończenie cyklu życia. W ramach przeglądu literatury przedstawiono główne wnioski oraz istniejące luki badawcze wymagające dalszej analizy.

2.1. Emisje gazów cieplarnianych z sektora transportu w krajach Unii Europejskiej

Transport odpowiadał w 2021 roku za około 24,1% całkowitych emisji gazów cieplarnianych w Europie. Ponad 70% emisji w tym sektorze generowanych jest przez transport drogowy, pozostała część pochodzi z lotnictwa, żeglugi morskiej i kolei [10,11]. Wzrost emisji wynika przede wszystkim ze zwiększonego zapotrzebowania na przewozy towarowe i pasażerskie, które są konsekwencją rosnącej mobilności oraz intensywnego rozwoju wymiany handlowej.

W skład gazów cieplarnianych emitowanych z transportu wchodzi związek taki jak m.in. [12,13]:

- Dwutlenek węgla (CO_2) - będący produktem spalania płynnych paliw kopalnych tj. benzyna czy olej napędowy.
- Metan (CH_4)- uwalniany jest na skutek niespalonych węglowodorów w układzie wydechowym. Cechuje się znacznie wyższym potencjałem cieplarnianym niż dwutlenek węgla.
- Podtlenek azotu (NO_2)- jest produktem m.in. reakcji chemicznych zachodzących w katalizatorach.

- Fluorowane gazy cieplarniane (F-gazy)- przykładowo hydrofluorowęglowodory wykorzystywane w systemach klimatyzacji samochodowej. W skutek niewłaściwego serwisowania, uszkodzenia, bądź złomowania pojazdu, gazy te uwalniają się do atmosfery.

Na przestrzeni lat Unia Europejska podjęła działania na rzecz ograniczania emisji w transporcie, wprowadzając system norm Euro, które od lat dziewięćdziesiątych stopniowo zaostrzały dopuszczalne poziomy zanieczyszczeń [14]. Kolejne generacje (od Euro I do obecnie obowiązującej Euro VI) określały coraz niższe limity emisji tlenków azotu (NO_x), cząstek stałych (PM), tlenku węgla (CO) oraz węglowodorów (HC). Wymusiło to na producentach wdrożenie zaawansowanych rozwiązań technicznych, takich jak układy selektywnej redukcji katalitycznej (SCR, ang. Selective Catalytic Reduction), systemy recyrkulacji spalin (EGR, ang. Exhaust Gas Recirculation) czy filtry cząstek stałych (DPF, ang. Diesel Particulate Filter). Ważnym uzupełnieniem tych regulacji stało się wprowadzenie testów emisji w rzeczywistych warunkach jazdy (RDE, ang. Real Driving Emissions). Celem tego rozwiązania było ograniczenie różnic pomiędzy wynikami uzyskiwanymi w warunkach laboratoryjnych a faktycznymi emisjami w ruchu drogowym. W efekcie producenci zmuszeni zostali zapewnić zgodność z normami emisyjnymi, również przy zmiennych warunkach, takich jak zmienne prędkości, nachylenie terenu czy obciążenie pojazdu.

Dane opublikowane przez Joint Research Centre (Tab. 1) ukazują aktualność problemu emisji gazów cieplarnianych [15].

Tab. 1. Światowe emisje gazów cieplarnianych według sektorów w latach 1990–2023 [15].

Sektor	2023 vs. 1990	2023 vs. 2005
Energetyczny	+96%	+36%
Przemysłowy	+91%	+41%
Budowlany	+1%	+3%
Transportu	+78%	+26%
Wydobywczy	+48%	+23%
Rolnictwa	+20%	+15%
Odpadów	+56%	+37%
Wszystkie sektory	+62%	+28%

W latach 1990–2023 światowe emisje z transportu wzrosły o 78%, co stanowiło trzeci najwyższy wynik wśród wszystkich przedstawionych sektorów. Wyższe wartości odnotowano jedynie w sektorze energetyki (+96%) oraz w sektorze przemysłowym (+91%).

Inaczej sytuacja przedstawia się w Unii Europejskiej (Tab 2), gdzie większość sektorów odnotowało spadki emisji gazów cieplarnianych w okresie ponad 30 lat. Transport był jedynym sektorem, w którym odnotowano wzrost emisji w tym okresie o 19%. Wzrost ten wskazuje, że pomimo działań podejmowanych w ramach polityki klimatycznej UE, sektor transportu pozostawał wciąż istotnym źródłem emisji.

Tab. 2. Unijne (UE-27) emisje gazów cieplarnianych według sektorów w latach 1990–2023 [15].

Sektor	2023 vs. 1990	2023 vs. 2005
Energetyczny	-51%	-50%
Przemysłowy	-42%	-30%
Budowlany	-37%	-31%
Transportu	+19%	-6%
Wydobywczy	-46%	-27%
Rolnictwa	-27%	-6%
Odpadów	-35%	-26%
Wszystkie sektory	-34%	-29%

W porównaniu z 2005 rokiem emisje z sektora transportu zmniejszyły się o 6%, co odzwierciedla początkowy efekt wdrożonych strategii, jednak ich ostateczna skuteczność względem poziomu z 1990 roku pozostaje ograniczona. W związku z tym oprócz zaostrzania norm emisji Euro, w Unii Europejskiej podjęto szereg decyzji o wsparciu rozwoju alternatywnych napędów w transporcie. Szczególną uwagę skupiono na wdrożeniu na rynek pojazdów elektrycznych, hybrydowych, czy z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem, które w dłuższej perspektywie mogą zmniejszyć zależność od paliw konwencjonalnych.

2.2.Aspekty prawne związane z rozwojem rynku wodoru jako paliwa alternatywnego

Regulacje światowe i unijne

W odpowiedzi na rozwój globalnego ocieplenia klimatu, przyjęto międzynarodowe przepisy prawne, w tym umowy takie jak: Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu z 1992 roku, Protokół z Kioto z 1997 roku i Porozumienie Paryskie z 2015 roku [16,17,18]. W tabeli 3 przedstawiono główne założenia wymienionych umów. Co istotne, Protokół z Kioto i Porozumienie Paryskie zostały zawarte w ramach Konwencji Klimatycznej ONZ, której cele i zasady nadal obowiązują.

Tab. 3. Charakterystyka ramowych międzynarodowych aktów prawnych regulujących działania w zakresie ograniczenia emisji gazów cieplarnianych [16,17,18].

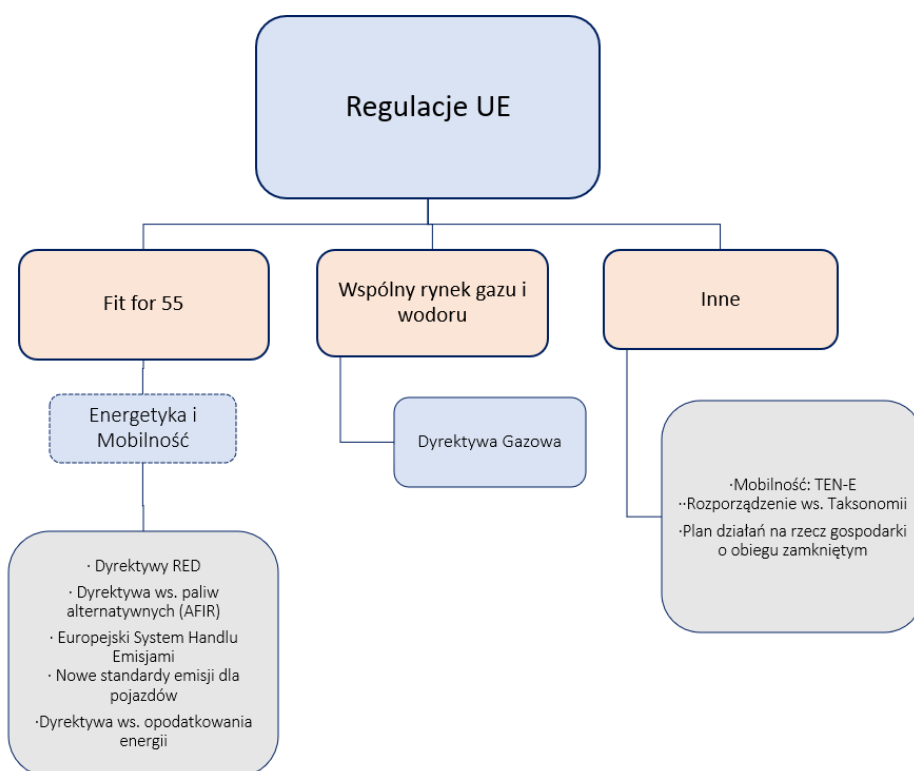
Nazwa aktu prawnego	Rok ogłoszenia	Główne założenia
Ramowa Konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu	1992	Określa wstępne założenia ponadnarodowej współpracy w zakresie ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Umowa zachęca do podejmowania odpowiednich działań i nie zawiera wiążących nakazów.
Protokół z Kioto	1997	Traktat uzupełnia Ramową Konwencję Narodów Zjednoczonych. Zobowiązuje kraje ratyfikujące dokument do redukcji emisji gazów cieplarnianych o 5% w latach 2008-2012 w stosunku do poziomu z 1990 roku.
Porozumienie Paryskie	2015	Umowa zakłada ograniczenie wzrostu średniej temperatury na Ziemi do poniżej 2°C względem epoki przedprzemysłowej oraz wprowadza nową formę międzynarodowej współpracy, zobowiązując państwa do aktualizacji celów co 5 lat.

Przedstawione wyżej dokumenty stanowiły punkt wyjścia do rozwoju bardziej złożonych porozumień i regulacji, ukierunkowanych na coraz silniejsze ograniczanie emisji gazów cieplarnianych.

Wodór, zwłaszcza ten produkowany z odnawialnych źródeł energii, postrzegany jest jako kluczowa alternatywa w procesie dekarbonizacji. Dzięki możliwości magazynowania energii może on przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa i niezależności energetycznej, a jednocześnie stanowi odpowiedź na wyzwania związane z redukcją emisji CO₂ w sektorach trudnych do zdekarbonizowania.

Ponad to według danych Parlamentu Europejskiego wdrożenie nowych technologii związanych z wodorem może wesprzeć rynek pracy. Oszacowano, że powstanie około miliona bezpośrednich miejsc pracy do 2030 roku i 5,4 miliona do 2050 roku [19]. Co więcej, technologie wodorowe są jednym z filarów transformacji energetycznej przewidzianej w ramach Europejskiego Zielonego Ładu [20].

W celu zapewnienia spójności działań, standaryzacji oraz wdrażania odpowiednich regulacji i strategii, Unia Europejska opracowała szereg aktów prawnych oraz planów rozwoju technologii wodorowych. Obejmują one m.in. sektory mobilności, energetyki, finansów oraz rynku wewnętrznego gazów odnawialnych i gazu ziemnego (rys. 1). Ze względu na dużą liczbę dokumentów, które podlegają ciągłym aktualizacjom, w dalszej części pracy przedstawiono wybrane z nich, umożliwiające pełniejsze zrozumienie szerszego kontekstu Europejskiej Strategii Wodorowej i podzielono je na trzy obszary legislacyjne.



Rys. 1. Przegląd kluczowych aktów prawnych wpływających na rozwój rynku paliw alternatywnych w transporcie w Unii Europejskiej. Opracowanie własne na podstawie: [21].

Pierwszym istotnym obszarem regulacyjnym w ramach Europejskiego Zielonego Ładu był pakiet Fit for 55 [22]. Zawiera on przepisy dotyczące energii i transportu, które wspierają rozwój infrastruktury dla paliw alternatywnych, w tym także wodoru. W skład najważniejszych regulacji w tym zakresie zaliczają się:

- a) Dyrektywa w sprawie odnawialnych źródeł energii II (RED II, ang. Renewable Energy Directive II)- określa cele zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych, obejmując także produkcję zielonego wodoru [23].
- b) Dyrektywa w sprawie infrastruktury paliw alternatywnych (AFIR, ang. Alternative Fuels Infrastructure Regulation)- nakłada obowiązek rozwoju infrastruktury do tankowania paliw alternatywnych, w tym wodoru, zarówno w miastach, jak i wzdłuż transeuropejskiej sieci transportowej TEN-T (ang. Trans-European Transport Network) [24].
- c) Europejski System Handlu Emisjami (ETS, ang. Emissions Trading System)- wprowadza mechanizmy ograniczania emisji gazów cieplarnianych i wspiera sektor transportu do inwestowania w technologie niskoemisyjne [25].
- d) Nowe normy emisyjne dla pojazdów- przewidują zaostrzone limity emisji dla samochodów osobowych, ciężarowych i autobusów [22].
- e) Dyrektywa w sprawie opodatkowania energii (ETD, ang. Energy Taxation Directive)- określa zasady opodatkowania energii w sposób sprzyjający wykorzystaniu paliw odnawialnych i niskoemisyjnych, takich jak wodór [22].

Kolejnym obszarem regulacji jest rynek wodoru i gazów zdekarbonizowanych, gdzie szczególne znaczenie ma dyrektywa dotycząca gazu odnawialnego, gazu ziemnego i wodoru [26]. Jej celem było dostosowanie ram prawnych dla infrastruktury gazowej do wymagań związanych z paliwami niskoemisyjnymi oraz wsparcie inwestycji w produkcję i dystrybucję wodoru. Rozwiązania te mogą być szczególnie istotne dla transportu ciężkiego, morskiego i kolejowego, gdzie wodór może być alternatywą dla paliw kopalnych.

Ostatnia grupa regulacji obejmuje inne akty prawne wspierające zrównoważony rozwój transportu, w tym:

- a) Transeuropejską Sieć Energetyczną (TEN-E, ang. Trans-European Networks for Energy)- umożliwiającą rozwój kluczowej infrastruktury energetycznej, w tym stacji tankowania wodoru wzdłuż głównych korytarzy transportowych [27].
- b) Taksonomię UE dla zrównoważonych działań (ang. EU Taxonomy for Sustainable Activities)- określającą kryteria inwestycji przyjaznych dla środowiska, co ułatwia m.in. finansowanie projektów związanych z transportem wodorowym [28].

- c) Plan działania na rzecz gospodarki o obiegu zamkniętym (ang. Circular Economy Action Plan)- wspierający innowacje w zakresie produkcji, użytkowania i recyklingu technologii związanych z wodorem [29].

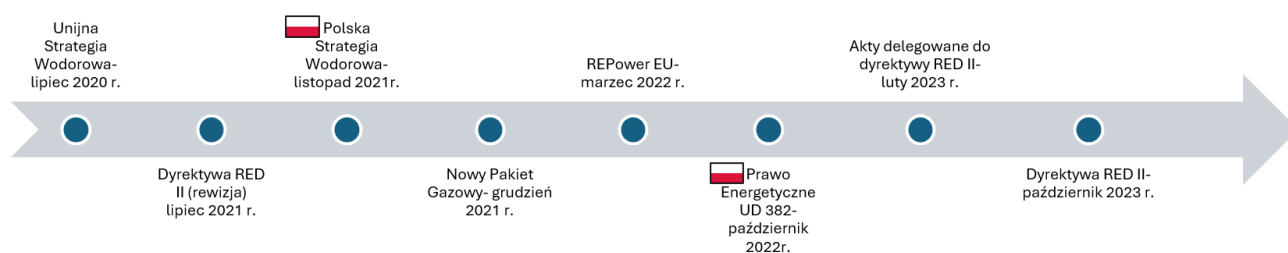
Dodatkowe kierunki strategiczne zostały również wskazane w komunikacie Komisji Europejskiej z 2020 roku dotyczącym strategii wodorowej na rzecz neutralności klimatycznej Europy (ang. EU Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe) [30]. Dokument ten wyznacza główne etapy rozwoju m.in.:

- a) rozbudowę infrastruktury wodorowej,
- b) zwiększenie produkcji wodoru odnawialnego do 10 milionów Mg rocznie,
- c) budowę sieci stacji tankowania w ramach sieci bazowej dróg TEN-T,
- d) zwiększenie finansów na badania i rozwój w tym obszarze,
- e) stymulowanie popytu na wykorzystanie wodoru produkowanego z OZE.

Wszystkie wymienione wyżej regulacje, tworzą więc podstawy do wdrażania wodoru jako paliwa alternatywnego, a także wyznaczają kierunki jego rozwoju na poziomie europejskim.

Regulacje krajowe dotyczące rozwoju wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie

W dniu 14 stycznia 2021 roku Ministerstwo Klimatu i Środowiska ogłosiło projekt Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030 z perspektywą do 2040 r [31]. Jest to dokument strategiczny określający główne cele rozwoju wodoru jako paliwa alternatywnego w Polsce. Został on opracowany w odpowiedzi na strategię Unii Europejskiej oraz zmieniającą się legislację we wspólnocie europejskiej (rys. 2). Strategia przedstawia aktualny stan rynku wodoru, identyfikuje bariery biznesowe i technologiczne. Wskazuje również kierunki rozwoju, które w dłuższej perspektywie umożliwią na konkurowanie z paliwami konwencjonalnymi.



Rys. 2. Etapy rozwoju ram legislacyjnych dla rozwoju wodoru w Unii Europejskiej oraz Polsce. Opracowanie własne.

Dokument wyznacza sześć szczegółowych celów do osiągnięcia w perspektywie 2030 lub 2040 roku [31,32]:

- Wdrożenie technologii wodorowych w energetyce i ciepłownictwie.
- Wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie.
- Wsparcie dekarbonizacji przemysłu.
- Rozwój nowych instalacji do produkcji wodoru.
- Zapewnienie sprawnego i bezpiecznego transportu, dystrybucji oraz magazynowania wodoru.
- Stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

Zgodnie ze Strategią największy potencjał wykorzystania wodoru w Polsce dotyczy sektora transportu drogowego w tym miejskiego publicznego. W kontekście transformacji sektorów górniczych, zagrożonych redukcją zatrudnienia, przewidziano także możliwości przekwalifikowania kadr.

Dokument określa ponadto wskaźniki osiągnięcia celów do 2030 roku [31]:

- Moc instalacji do produkcji niskoemisyjnego wodoru wyniesie 50 MW do 2025 roku oraz 2 GW do 2030 roku.
- Powstanie co najmniej 5 dolin wodorowych.
- W eksploatacji znajdzie się od 100 do 250 autobusów wodorowych do 2025 roku oraz od 800 do 1000 do roku 2030.
- Do 2025 roku powstanie minimum 32 stacje tankowania wodorem.
- Zostanie zawarte Porozumienie na rzecz rozwoju wodoru jako paliwa alternatywnego.
- Opracowany zostanie Ekosystem Innowacji Dolin Wodorowych.
- Utworzone zostanie Centrum Technologii Wodorowych.

Doliny wodorowe stanowią inicjatywy o charakterze polityczno-społeczno-gospodarczym, których celem jest tworzenie lokalnych rynków wodoru obejmujących pełny cykl, czyli od produkcji, przez magazynowanie i dystrybucję, aż po wykorzystanie w miejscu przeznaczenia [33]. Do roku 2026 w Polsce powstało 10 dolin wodorowych, zróżnicowanych pod względem specjalizacji: Śląsko-Małopolska Dolina Wodorowa, Centralny Klaster Wodorowy im. Braci Łaszczyńskich, Mazowiecka Dolina Wodorowa, Pomorska Dolina Wodorowa, Zachodniopomorska Dolina Wodorowa, Wielkopolska Dolina Wodorowa, Dolnośląska Dolina Wodorowa, Bursztynowa Dolina Wodorowa, Lubelska Dolina Wodorowa oraz Podkarpacka Dolina Wodorowa. Obecnie jedną z wyżej rozwiniętych dolin jest Wielkopolska Dolina Wodorowa, w której zlokalizowana jest firma Solaris produkująca autobusy elektryczne z

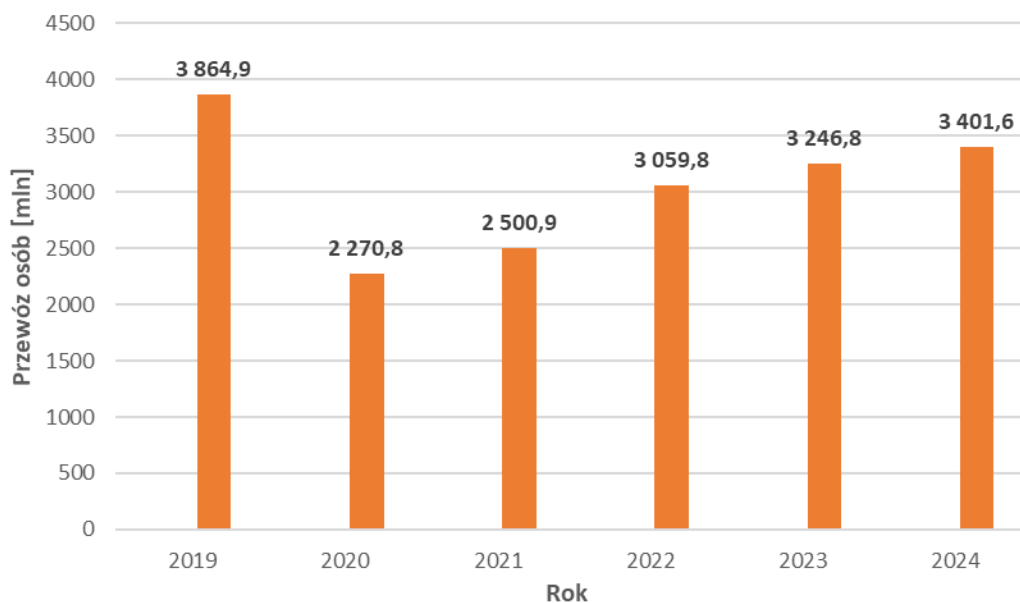
ogniwem paliwowym zasilanym wodorem oraz elektrownia ZE PAK w Koninie produkująca wodór z odnawialnych źródeł energii [34].

Mimo założonych celów, do 2025 roku w Polsce powstało jedynie 8 ogólnodostępnych oraz 4 niekomercyjne stacje tankowania wodoru, co odzwierciedla skalę trudności w realizacji krajowej strategii. Autobusy z ogniwami paliwowymi do tego czasu zasilły flotę komunikacji miejskich m.in. w Poznaniu, Gdańsku, Wałbrzychu, Rybniku, Koninie i Chełmie [35]. Na koniec lipca 2025 roku polska flota autobusów w pełni elektrycznych liczyła 1525 pojazdów, natomiast flota autobusów zasilanych wodorem obejmowała jedynie 108 pojazdów [8].

Opracowana strategia stanowi ambitny plan dekarbonizacji gospodarki, jednak w obliczu kryzysu energetycznego i napięć geopolitycznych w Europie istotna jest jej bieżąca aktualizacja, tak aby odpowiadała na aktualne i przewidywane potrzeby rynkowe oraz wyzwania. Proces ten jest kluczowy, aby cele i założenia strategii były zgodne z realiami gospodarczymi.

2.3. Stan transportu publicznego autobusowego w Polsce

Na rozwój transportu autobusowego w Polsce wpływ mają zarówno czynniki ekonomiczne i społeczne, jak i regulacje krajowe oraz międzynarodowe. Tabor autobusowy odgrywa kluczową rolę w systemie komunikacji publicznej, stanowiąc podstawowy środek transportu w wielu miastach i regionach. W latach 2019-2024 łącznie przewieziono za pomocą komunikacji miejskiej (autobusy, tramwaje, metro, kolej miejska) 18,34 miliarda pasażerów (rys.3) [36]. Pomimo tendencji wzrostowej rynek nie osiągnął jeszcze poziomu sprzed pandemii, kiedy w 2019 roku przewieziono blisko 3865 mln osób. Dla porównania w Niemczech w 2023 roku zrealizowano około 8856 mln przewozów pasażerskich w komunikacji miejskiej [37]. Jednakże porównanie tych wartości w odniesieniu do liczby ludności obu państw ukazuje, że różnice są mniejsze. W Polsce w 2023 roku przeciętny mieszkaniec odbył średnio 86 przejazdów komunikacją miejską, podczas gdy w Niemczech było to 105 przejazdów na osobę.



*Rys. 3. Przewóz pasażerów komunikacją miejską w milionach osób w latach 2019-2024.
Opracowanie własne na podstawie [36].*

W 2023 roku łączna długość linii autobusowych osiągnęła 56 483,3 km, a przebieg floty autobusowej w tym samym roku wyniósł 698,9 mln kilometrów, co stanowiło 82,3% przebiegu całego transportu miejskiego. Średni dzienny przebieg autobusu w Polsce wynosił 191 km. Najdłuższe dystanse pokonywały autobusy w województwie małopolskim, gdzie średnia wyniosła 213 km, natomiast najkrótsze w województwie warmińsko-mazurskim- 142 km.

W tym samym roku najwięcej w polskich flotach było autobusów z silnikiem o zapłonie samoczynnym (9559 szt.), co stanowiło 76,4% ogółu. W dalszej kolejności znajdowały się autobusy elektryczne z akumulatorami litowo-jonowymi (1213 szt., 9,7%), a także autobusy zasilane sprężonym gazem ziemnym (CNG, ang. Compressed Natural Gas) (940 szt., 7,5%). Udział autobusów hybrydowych, wyniósł 675 pojazdów, czyli 5,4% całej floty. Niski udział również miały autobusy zasilane skroplonym gazem ziemnym (LNG, ang. Liquefied Natural Gas)- 125 szt., co stanowiło 1% całkowitej liczby autobusów.

Tab. 4. Liczba oraz udział procentowy autobusów niskoemisyjnych we flocie autobusów miejskich w Polsce [36- 38].

Rok	2017	2024
Całkowita liczba autobusów	12 118	12 512
Liczba autobusów niskoemisyjnych	512	2953
Procentowy udział autobusów niskoemisyjnych	4,2%	23,6%

Pomimo wysokiego udziału autobusów z silnikiem ZS, w polskiej komunikacji miejskiej coraz większe znaczenie mają pojazdy wykorzystujące alternatywne źródła energii (tab. 4). W ciągu 7 lat (2017-2024) udział autobusów niskomisyjnych w całej flocie wzrósł o blisko 20%. Przedstawia to coraz bardziej rosnącą rolę napędów alternatywnych w transporcie publicznym w Polsce.

2.4. Autobusy z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem

Autobusy elektryczne zasilane ogniwami paliwowymi (FCEV, ang. Fuel Cell Electric Buses) stanowią szczególną grupę pojazdów elektrycznych. Konstrukcja napędu różni się od typowych pojazdów elektrycznych z akumulatorami litowo-jonowymi. W tych autobusach energia elektryczna nie jest magazynowana w akumulatorach, lecz wytwarzana na bieżąco w procesach elektrochemicznych, podczas reakcji wodoru z tlenem w ogniwach paliwowych.

Do głównych zalet autobusów FCEV należy dłuższy zasięg w porównaniu z autobusami elektrycznymi oraz krótki czas tankowania, wynoszący średnio około 6-10 minut [39, 40]. Dodatkowo pojazdy te charakteryzują się brakiem emisji bezpośrednich na etapie eksploatacji. Istotną zaletą jest również redukcja hałasu, który podczas jazdy jest niższy średnio o około 10 dB, a na postoju różnica względem autobusów konwencjonalnych sięga 20 dB [41].

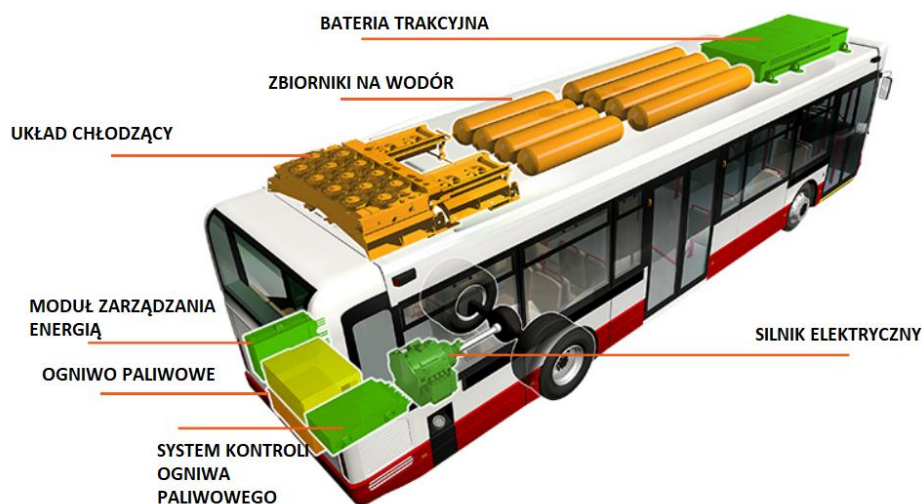
Pierwszy autobus FCEV został zarejestrowany w 2020 roku. Od tego czasu liczba zarejestrowanych pojazdów wzrasta, co wiąże się przede wszystkim z postępującym rozwojem infrastruktury tankowania wodoru oraz systematycznym zaostrzaniem wymagań prawnych i środowiskowych stawianych operatorom flot autobusowych. Według najnowszych danych pod koniec lipca 2025 roku w Polsce eksploatowanych było około 108 autobusów z ogniwami paliwowymi, a nowelizacja ustawy o elektromobilności wskazuje, że planowany jest dalszy wzrost tego rodzaju pojazdów w najbliższych latach, szczególnie w dużych miastach liczących powyżej 100 tysięcy mieszkańców [42].

Zestawienie danych krajowych z sytuacją w Japonii pozwala lepiej zobrazować sytuację polskiego rynku, która dopiero się rozwija. Japonia uznawana jest za jednego ze światowych liderów we wdrażaniu technologii ogniw paliwowych w transporcie publicznym. Pierwszy autobus FCEV został wprowadzony do eksploatacji w Tokio w 2018 roku. Do początku 2023 roku liczba ta wzrosła do 124 pojazdów. Według zapowiedzi do 2030 roku liczba autobusów wodorowych w Japonii ma wzrosnąć do 1200 sztuk. Plany te są ściśle powiązane z rozwojem infrastruktury technicznej, obejmującej budowę około 1000 stacji tankowania wodoru [43,44,45].

W Polsce wśród autobusów miejskich większość stanowią pojazdy zaliczane do klasy MAXI. Są to konstrukcje o długości od 11 do 13 metrów, które pozwalają przewieźć około 90-100 pasażerów. Popularność tej klasy wynika z korzystnego połączenia zwrotności i kompaktowych wymiarów z relatywnie dużą pojemnością, co sprawia, że pojazdy te dobrze sprawdzają się zarówno na trasach miejskich, jak i podmiejskich. W ofercie producentów obecnych na polskim rynku znajduje się obecnie pięć autobusów FCEV tego segmentu. Ich podstawowe parametry techniczne zestawiono w tabeli 5. Schemat rozmieszczenia poszczególnych podzespołów w autobusie z ogniwami paliwowymi zobrazowano na rysunku 4.

Tab. 5. Przegląd parametrów technicznych autobusów FCEV dostępnych na rynku polskim [46,47,48,49,50].

Model	NesoBus 12	Solaris Urbino 12 Hydrogen	Mercedes-Benz eCitaro Fuel Cell	Arthur Bus H2 Zero	Autosan Sancity 12LFH
Moc ogniwa paliwowego [kW]	70	70	60	70	70
Długość [mm]	12 000	12 000	12 135	12 015	12 000
Masa całkowita [kg]	19 500	19 200	20 000	brak danych	brak danych
Pojemność zbiorników [kg]	37,5	37,5	25	37,5	31
Ciśnienie [bar]	350/700	350	350	350	350
Bateria [kWh]	30,4 (LTO, Litowo-tytanowo-tlenkowa)	30,47 (Li-ion, litowo-jonowa)	294 (NMC3, niklowo-manganowo-kobaltowa)	brak danych	45 (LTO, Litowo-tytanowo-tlenkowa)
Maksymalna moc [kW]	2 × 125	2 × 125	250	2 × 125	253
Maksymalny zasięg [km]	450	350	600	350	400



Rys. 4. Uproszczony schemat budowy autobusu z ogniwami paliwowymi. Źródło: [51, 52]

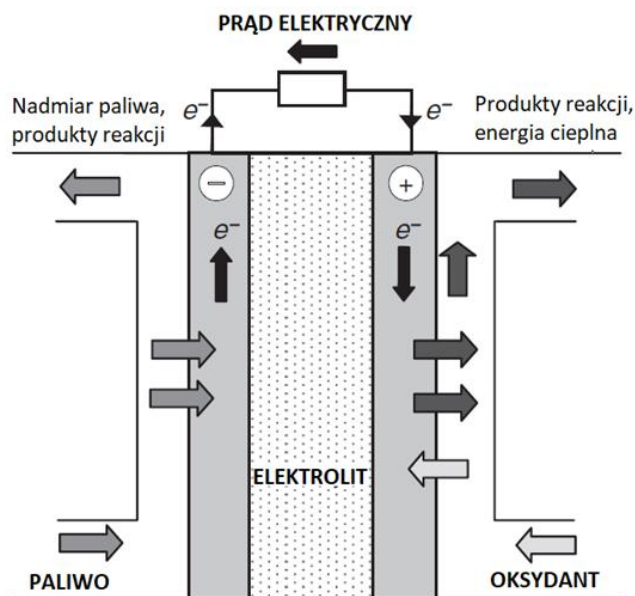
Analiza danych technicznych zestawionych w tabeli pokazuje, że autobusy z ogniwami paliwowymi klasy MAXI opierają się na zbliżonych rozwiązaniach konstrukcyjnych. Moc ogniwa paliwowego we wszystkich modelach wynosi około 70 kW. Zbliżone są także parametry dotyczące ciśnienia magazynowania wodoru, które utrzymuje się na poziomie 350 bar, a pojemność zbiorników waha się w granicach 31–38 kg. Podobieństwa widoczne są również w zakresie mocy układu napędowego (2×125 kW) oraz maksymalnych osiągnięć w postaci zasięgu 350–450 km.

Na tle tej grupy szczególnie wyróżnia się Mercedes-Benz eCitaro Fuel Cell, którego konstrukcja oparta została na innej konstrukcji napędowej. W tym modelu głównym źródłem energii jest akumulator trakcyjny o znacznie większej pojemności, natomiast ogniwo paliwowe pełni jedynie rolę układu zwiększającego zasięg. Takie rozwiązanie zwiększa masę całkowitą pojazdu, lecz umożliwia osiągnięcie najwyższego zasięgu spośród analizowanych modeli (do 600 km) i pozwala na bardziej stabilne warunki pracy ogniwa, co może mieć korzystny wpływ na jego trwałość.

2.5. Ogniwa paliwowe oraz ich zastosowanie w pojazdach drogowych

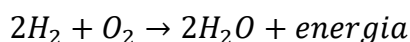
Za pierwsze praktyczne rozwiązanie w tej dziedzinie uznaje się ogniwo AFC (ang. Alkaline Fuel Cell), opracowane w latach 50. XX wieku. Konstrukcja ta wykorzystywała elektrolit alkaliczny oraz elektrody wykonane z proszku niklowego [53]. Podstawowe elementy konstrukcyjne każdego ogniwa obejmują: anodę, katodę, warstwę elektrolitu oraz obwód

zewnątrzny. Na anodzie zachodzi reakcja z udziałem wodoru, natomiast na katodzie z tlenem. Cały proces jest odwrotnością elektrolizy, podczas której przepływ prądu przez wodę prowadzi do rozdzielenia jej na składniki elementarne, czyli atomy tlenu i wodoru. Rysunek 5 obrazuje ogólny schemat procesu zachodzącego w ogniwie paliwowym.



Rys.5. Ogólny schemat przebiegu procesów elektrochemicznych w ogniwie paliwowym. Źródło: opracowanie własne na podstawie [54].

Szczegółowy przebieg reakcji elektrochemicznych zależy zarówno od rodzaju ogniwa, jak i od charakterystyki paliwa oraz utleniacza, które zostają do niego wprowadzone. Równanie ogólne przedstawia się następująco:



Dzięki temu, że produktem ubocznym procesu jest para wodna, to brak jest emisji bezpośrednich podczas eksploatacji. Powoduje to, że ogniwa paliwowe są uważane za jedną z kluczowych alternatyw dla sektorów, gdzie energia jest oparta na paliwach kopalnych.

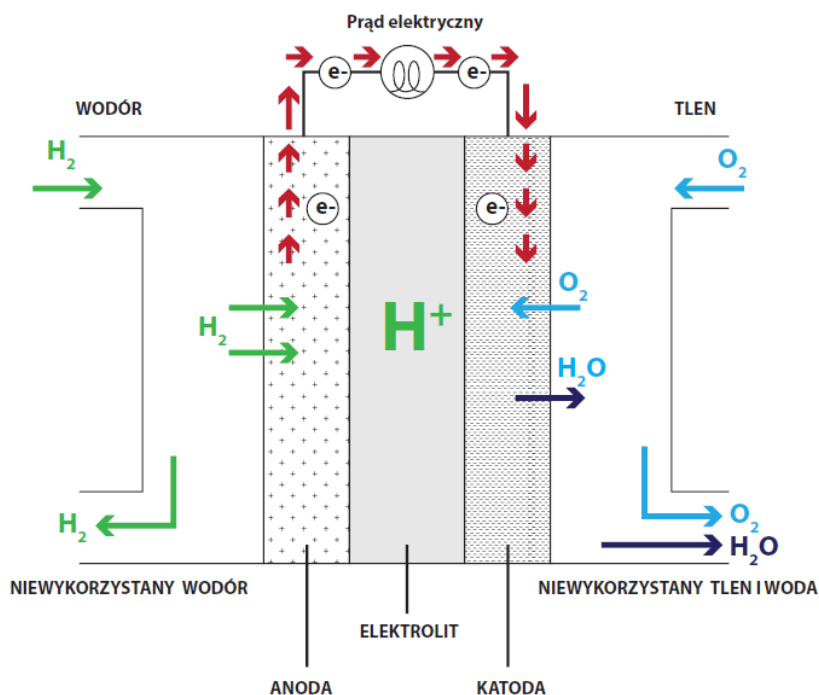
Ogólny przegląd różnych typów ogniw paliwowych, ich budowy, charakterystyki pracy i zastosowania przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Charakterystyka wybranych rodzajów ogniw paliwowych [54,54].

Rodzaj ogniwa	Wykorzystywane paliwo	Elektrolit / membrana	Parametry pracy	Obszary zastosowania
AFC (ang. Alkaline fuel cell)	Wodór	Wodny roztwór wodorotlenku potasu	temp. 60–100 °C; sprawność 50–60%; czas rozruchu < 0,1 h	Sektor wojskowy i kosmiczny
PAFC (ang. Phosphoric acid fuel cell)	Wodór	Ciekły kwas fosforowy	temp. 150–200 °C; sprawność 35–45%; czas rozruchu 1–4 h	Produkcja energii cieplnej i elektrycznej
SOFC (ang. Solid oxide fuel cell)	Wodór, tlenek węgla, metan	Stały tlenek cyrkonu z domieszką tlenku itru	temp. 800–1000 °C; sprawność 35–43%; czas rozruchu 1–5 h	Ogrzewanie i źródła pomocnicze w energetyce
PEM (ang. Polymer exchange membrane fuel cell)	Wodór	Stały polimer, kwas perfluorosulfonowy	temp. 60–80 °C; sprawność 53–58%; czas rozruchu ok. 0,1 h	Transport i ogrzewanie

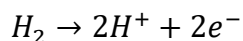
Szczególną rolę w zastosowaniach motoryzacyjnych odgrywają ogniwa typu PEM (ang. Polymer Electrolyte Membrane). Charakteryzują się one niewielką masą, krótkim czasem rozruchu oraz optymalną temperaturą pracy, mieszczącą się w zakresie 60–80 °C [53]. Właściwości te sprawiają, że są one znacznie lepiej dostosowane do potrzeb transportu drogowego niż inne ogniwa, takie jak wysokotemperaturowe ogniwa tlenkowe SOFC.

Schemat zachodzących procesów w tym ogniwie przedstawiono na rysunku 6. Podstawowymi elementami ogniwa paliwowego PEM są dwie elektrody, katoda o ładunku dodatnim oraz anoda o ładunku ujemnym. Rozdzielone są one przez polimerową membranę przewodzącą protony, która pełni rolę elektrolitu. Na początku procesu wodór jako paliwo jest transportowane do anody.

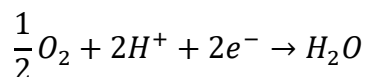


Rys.6. Schemat procesu pracy ogniwa paliwowego typu PEM. Źródło: opracowanie własne na podstawie [54].

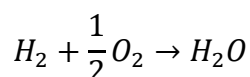
Na powierzchni katalizatora platynowego zachodzi proces jego utleniania, w wyniku którego cząsteczki wodoru rozpadają się na protony i elektrony. Równanie przedstawia się następująco [56]:



Następnie protony migrują przez membranę w kierunku katody, natomiast elektrony kierowane są do zewnętrznego obwodu elektrycznego, gdzie generowana jest energia elektryczna. Równocześnie na katodzie dochodzi do reakcji redukcji tlenu. Protony przepuszczone przez membranę łączą się z tlenem oraz elektronami wracającymi z obwodu elektrycznego, tworząc cząsteczki wody, która jest produktem ubocznym całego procesu:

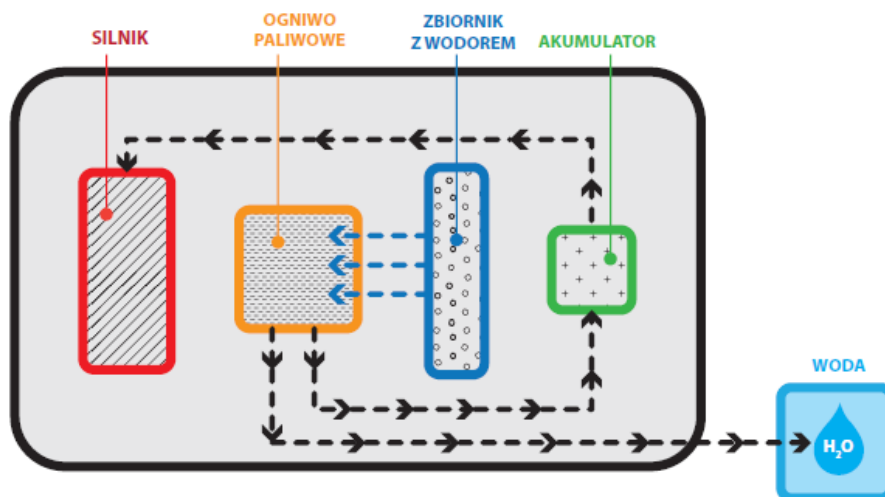


Sumaryczny zapis całego procesu można zapisać jako:



Obecność katalizatora platynowego jest niezbędna, aby reakcje na anodzie i katodzie przebiegały z odpowiednią szybkością. Jednak wysoki koszt i ograniczona dostępność platyny pozostają jednym z głównych ograniczeń technologicznych. Mimo wielu zalet technologia ta posiada także istotne wady. Efektywność ogniw typu PEM zależy od jakości oraz czystości wodoru. Konstrukcja jest wrażliwa na tlenki węgla oraz cząsteczki siarki, które negatywnie oddziałują na katalizator [57]. Aktualnie badania koncentrują się na zwiększeniu sprawności ogniw PEM poprzez udoskonalanie konstrukcji membran oraz ograniczanie ilości metali szlachetnych w katalizatorach [55, 56].

W przypadku zastosowania w transporcie ogniwa paliwowe wchodzi w skład systemu napędu. Uproszczony schemat współpracy ogniw PEM z pozostałymi podzespołami w pojazdach przedstawiono na rysunku 7.



Rys.7. Proces pracy systemu napędu z ogniwami paliwowymi w pojazdach drogowych.
Opracowanie własne.

Pojazdy z ogniwami paliwowymi są w praktyce pojazdami elektrycznymi, ale zamiast korzystać wyłącznie z energii zgromadzonej w akumulatorze, wytwarzają ją na bieżąco w ogniwie paliwowym. Wodór zatankowany do zbiorników ciśnieniowych dostarczany jest do ogniw, gdzie reaguje z tlenem. W efekcie tego powstaje energia elektryczna zasilająca silnik oraz woda, która stanowi jedyny produkt uboczny procesu. Akumulator pełni rolę magazynu, który przechowuje nadmiar energii produkowanej w ogniwie, a także energię odzyskiwaną podczas hamowania. Całym procesem zarządza system elektroniczny kontrolujący przepływ energii, co pozwala dostosowywać moc i prędkość silnika do warunków jazdy. Ważnym elementem jest także układ chłodzenia, który utrzymuje odpowiednie temperatury poszczególnych komponentów i zapewnia stabilną pracę całego pojazdu [54].

2.6. Stacje tankowania wodorem oraz infrastruktura towarzysząca

Aktualnie infrastruktura tankowania wodoru w Polsce dopiero się rozwija i ogranicza się do kilku stacji zlokalizowanych głównie w największych aglomeracjach. Pomimo różnic konstrukcyjnych poszczególnych obiektów, większość stacji tankowania wodoru opiera się na podobnym zestawie elementów technicznych. W wszystkich rodzajach stacji wykorzystuje się układy oczyszczania wodoru, które zapewniają odpowiednią jakość paliwa zgodnie z wymaganiami dla pojazdów z ogniwami paliwowymi [58]. Kluczowym elementem są również zbiorniki do magazynowania wodoru. Gaz trafiający do pojazdu musi zostać sprężony, a w tym celu wykorzystuje się kompresory przygotowujące go do napełniania zbiorników wysokociśnieniowych.

Dodatkowo stacje wyposażane są w układy chłodzenia, które obniżają temperaturę wodoru do około $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, co zapobiega nadmiernemu nagrzewaniu się zbiornika w trakcie tankowania. Koniecznymi elementami wchodzącymi w skład systemu bezpieczeństwa są m.in. zawory, systemy detekcji wycieków, kominy wentylacyjne. Jeśli chodzi o instalacje mechaniczne są to rurociągi i zawory, a także komponenty elektryczne, obejmujące panele sterowania, przyłącza wysokiego napięcia czy liczniki energii [58].

Pierwsza w pełni funkcjonalna ogólnodostępna stacja tankowania wodoru powstała w 2023 roku w Warszawie i została sfinansowana przez spółkę PAK-PCE Stacje H₂ [59]. To wydarzenie uznaje się za symboliczny początek komercyjnego wdrażania technologii wodorowych w Polsce. W 2024 roku liczba ogólnodostępnych stacji tankowania wynosiła 8, natomiast liczba stacji niekomercyjnych wyniosła 4 stacje. Zestawienie stacji wraz z ich lokalizacjami w Polsce przedstawiono na tabeli 7 oraz 8.

Tankowanie na stacjach tankowania wodoru przebiega w sposób bardzo zbliżony do obsługi tradycyjnych stacji paliw i nie wymaga żadnych dodatkowych uprawnień ze strony użytkownika. Sam proces tankowania trwa zazwyczaj od kilku do kilkunastu minut, w zależności od pojemności zbiornika w pojeździe oraz standardu ciśnienia stosowanego podczas napełniania. Szybkość tankowania jest ściśle regulowana, w przypadku standardu H35 nie przekracza 120 g/s, a szczegółowe zasady określone są w protokole SAE J2601 [64]. Dokument ten precyzuje dopuszczalne parametry techniczne związane z przebiegiem tankowania, takie jak zakres temperatur, ciśnienie robocze, sposób komunikacji pomiędzy pojazdem a dystrybutorem czy klasy wydajności stacji.

Tab. 7. Ogólnodostępne stacje tankowania wodorem w Polsce [60,61,62,63].

Lokalizacja	Właściciel	Nr EIPA
Warszawa, ul. Tango 4	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000104
Rybnik, ul. Budowlanych 6	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000136
Gdańsk, ul. Jabłoniowa	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000140
Gdynia, ul. Starochwaszczyńska	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000139
Wrocław, ul. Obornicka 187	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000135
Lublin, ul. E. Plewińskiego	PAK-PCE Stacje H2 Sp. z o.o.	PL-A54-P00000153
Katowice, ul. Murkowska 22	ORLEN S.A.	PL-PKN-P04280000
Poznań, ul. Warszawska 231	ORLEN S.A.	PL-PKN-P13280000

Tab. 8. Niekommercyjne stacje tankowania wodorem w Polsce [60,61,62,63].

Lokalizacja	Właściciel	Opis
Kraków	ORLEN S.A.	Mobilna stacja tankowania
Konin	ZE PAK	Mobilna stacja tankowania
Solec Kujawski	SOLBET	Na potrzeby zakładu (wózki widłowe i samochody osobowe)
Wałbrzych	ORLEN S.A.	Mobilna stacja tankowania

W przypadku mobilnych stacji tankowania wodoru (rys. 8) pojawiają się pewne ograniczenia techniczne związane z brakiem dodatkowego systemu sprężania. W takich instalacjach ciśnienie robocze nie przekracza około 200 bar, co sprawia, że zbiorniki pojazdów nie są napełniane w pełni. Efektem tego jest mniejsza ilość zatankowanego wodoru, a tym samym skrócony zasięg pojazdu w porównaniu ze stacjami stacjonarnymi, które standardowo działają w zakresie 350-700 bar. Tego rodzaju stacje mają jednak swoje zalety i ze względu na mobilność mogą być stosowane jako rozwiązanie tymczasowe w fazie testów lub we wczesnych etapach rozwoju sieci infrastruktury. Umożliwiają szybkie uruchomienie punktu tankowania bez konieczności prowadzenia kosztownych inwestycji budowlanych i mogą wspierać pilotażowe wdrożenia flot autobusów wodorowych.



Rys.8. Proces tankowania pojazdu wodorem za pomocą mobilnej stacji [65].

Istotną kwestią jest również zapewnienie ciągłości dostaw paliwa. Stacje mogą być zasilane wodorem ciekłym (LH_2) lub gazowym (GH_2). W wielu przypadkach wodór przechodzi przez centralne huby magazynowe, gdzie w formie gazowej jest poddawany procesowi skraplania. Proces ten jednak jest kosztowny i wymaga wykorzystania zaawansowanej infrastruktury [66]. Każdy z tych wariantów wymaga dedykowanych instalacji na stacjach tj. kriogenicznych zbiorników do magazynowania wodoru ciekłego czy wysokociśnieniowych zasobników dla wodoru sprężonego. Dostępność wodoru zależy głównie od sprawności sieci przesyłowych i pojemności magazynów przy stacjach. Ograniczenia techniczne i logistyczne spowalniają rozwój rynku, dlatego rozbudowa i modernizacja infrastruktury stacji tankowania są kluczowe dla zwiększenia dostępności paliwa i wspierania dekarbonizacji transportu.

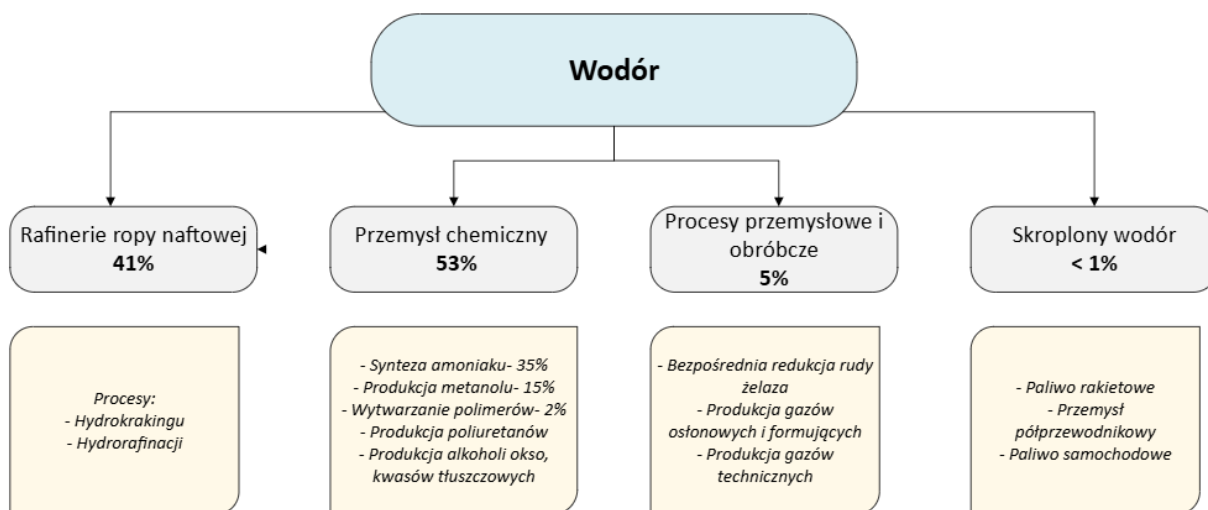
2.7.Produkcja wodoru

Produkcja wodoru jest obecnie jednym z kluczowych filarów rozwoju technologii wodorowych. Przewiduje się, że do 2050 roku światowa gospodarka stopniowo będzie opierać się na odnawialnych i alternatywnych źródłach energii, co w konsekwencji pozwoli na redukcję emisji gazów cieplarnianych (CO_2 , NO_x , SO_x) o około 60% i tym samym na ograniczenie skutków globalnego ocieplenia [18]. Część państw już dziś deklaruje dążenie do osiągnięcia neutralności klimatycznej w nadchodzących latach [67]. Kluczową rolę w tym procesie odegra rozwój wysokoefektywnych technologii i zrównoważonych metod wytwarzania energii,

umożliwiających ograniczenie szkodliwych emisji oraz realizację celów związanych z neutralnością klimatyczną [68,69]. Aby jednak transformacja energetyczna była skuteczna, konieczne jest opracowanie różnorodnych strategii opartych na nisko- lub bezemisyjnych nośnikach energii.

W 2023 roku światowa produkcja tego paliwa wyniosła około 97 Mt ton rocznie, z czego blisko 30% wytworzono w Chinach, 14% w Stanach Zjednoczonych, 14% w krajach Bliskiego Wschodu, a 9% w Indiach [70].

Prognozy Międzynarodowej Agencji Energii Odnawialnej (IRENA, ang. International Renewable Energy Agency) wskazują, że wodór stanie się jednym z najważniejszych paliw przyszłego miksu energetycznego, odgrywając istotną rolę w redukcji emisji CO₂ do 2050 roku [71]. Obecnie wodór ma szerokie zastosowania w przemyśle, a ponad 30 % całkowitej produkcji jest wykorzystywane w sektorze rafineryjnym. Jest tam wykorzystywany w procesach hydrrafinacji, hydrokrakingu i hydrokonwersji ropy naftowej (Rys.9).



Rys.9. Światowe zastosowanie wodoru w różnych sektorach [72, 73].

W przemyśle chemicznym wodór służy przede wszystkim do produkcji amoniaku i metanolu, a w metalurgii do redukcji rud metali. Najbardziej pożądanym rodzajem wodoru dla ogniw paliwowych na potrzeby transportu jest tzw. czysty wodór, czyli gaz o bardzo niskiej zawartości zanieczyszczeń i domieszek, który jednak nie występuje w środowisku w stanie wolnym i musi być wytwarzany w procesach przemysłowych.

Pod względem bezpieczeństwa wodór nie stanowi większego zagrożenia niż tradycyjne paliwa [74]. Wodór charakteryzuje się mniejszą gęstością niż powietrze i opary benzyny, dzięki czemu szybko się rozprasza, co ogranicza ryzyko zapłonu, a do wybuchu wymaga wyższego

stężenia tlenu niż inne paliwa. Dodatkowo płomienie wodoru generują mniej ciepła niż benzyny, co redukuje ryzyko pożarów wtórnych. Porównanie parametrów fizykochemicznych wodoru oraz paliw konwencjonalnych przedstawiono w tabeli 9.

Tab.9. Porównanie wartości fizykochemicznych wybranych paliw oraz wodoru. [54].

Parametr	Benzyna	Metan	Propan	Wodór
Ciepło spalania, MJ/kg	46,7	55,5	48,9	141,9
Temperatura samozapłonu, °C	222,0	534,0	466,0	585,0
Wartość opałowa, MJ/kg	44,4	50,0	46,4	120,0
Prędkość płomienia, cm/s	30,0	34,0	38,0	270,0
Ciepło parowania, kJ/kg	302,0	577,0	388,0	444,0
Energia zapłonu, mJ	0,3	0,3	0,3	0,0

Pod względem energetycznym wodór wyróżnia się na tle paliw kopalnych. Spalenie 1 kg wodoru uwalnia około trzykrotnie więcej energii niż spalenie 1 kg benzyny. Jednak jego bardzo niska gęstość powoduje, że zajmuje znacznie więcej powierzchni np. w procesie magazynowania. Dodatkowo do uzyskania energii odpowiadającej 1 litrowi benzyny potrzeba aż 4,6 litra sprężonego wodoru pod ciśnieniem 700 bar [54]. Wartość opałowa oraz ciepło spalania wodoru należą do najwyższych spośród paliw. Jedynym produktem ubocznym spalania jest woda, a śladowe ilości tlenków azotu powstają jedynie w warunkach bardzo wysokich temperatur. Do szczególnych cech wodoru należą: niska temperatura wrzenia, szeroki zakres palności, niska energia zapłonu, wysoka dyfuzyjność w powietrzu oraz wysoka prędkość płomienia [54].

Wodór można produkować przy wykorzystaniu różnych źródeł energii, zarówno odnawialnych, jak i nieodnawialnych. Do uproszczenia klasyfikacji stosuje się podział na tzw. kolory wodoru [54] ze względu na metodę produkcji (tab. 10).

Tab.10. Klasyfikacja wodoru ze względu na rodzaj produkcji [54].

Rodzaj wodoru	Technologia produkcji	Źródło energii zasilającej	Ślad węglowy
Wodór zielony	Elektroliza	Wiatrowa, słoneczna, geotermalna, wodna	Bardzo niski
Wodór fioletowy		Jądrowa	
Wodór niebieski	Reforming parowy + CCUS (ang. Carbon Capture, Utilisation and Storage)	Gaz ziemny	Niski
Wodór turkusowy	Piroliza		
Wodór szary	Reforming parowy		Średni
Wodór brązowy	Zgazowanie węgla	Węgiel brunatny	Wysoki
Wodór czarny		Węgiel kamienny	

Zielony wodór uznaje się za najbardziej pożądany, ponieważ powstaje w procesie elektrolizy przy wykorzystaniu energii odnawialnej. Mimo niskiego śladu węglowego, sam proces elektrolizy jest wysoce energochłonny i kosztowny. Obecnie produkcja zielonego wodoru na świecie stanowi około 2% całkowitej produkcji. Jego przeciwieństwem jest czarny wodór, wytwarzany z procesu zgazowania węgla, co wiąże się z najwyższą emisją gazów cieplarnianych. Najpopularniejszą metodą produkcji wodoru na świecie i w Polsce jest reforming parowy metanu. Obecnie ponad 90% wodoru wytwarzane jest właśnie tą metodą [75].

2.8. Istota analizy LCA w transporcie

Ocena cyklu życia (LCA) jest metodą wspierającą podejmowanie decyzji środowiskowych dotyczących różnych systemów. Obejmuje cały cykl życia produktu lub procesu: od etapu produkcji, przez użytkowanie, aż po utylizację i recykling. Metoda ta jest uregulowana w normach ISO 14040 [76] i ISO 14044 [77], które definiują ją jako analizę wejść, wyjść oraz potencjalnych oddziaływań środowiskowych w całym cyklu życia produktu.

Geneza metodyki LCA sięga lat siedemdziesiątych XX wieku, kiedy to w odpowiedzi na pierwszy kryzys naftowy rozpoczęto prace nad narzędziami umożliwiającymi racjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych [78, 79]. Początkowo analizy koncentrowały się na bilansowaniu energii i surowców, z czasem jednak zakres badań rozszerzono o kompleksową ocenę oddziaływań środowiskowych. Współcześnie LCA stanowi powszechnie akceptowaną metodę wspomagającą podejmowanie decyzji w obszarze zrównoważonego rozwoju [79].

Istota metody LCA polega na analizie systemów produktowych lub procesów z uwzględnieniem różnych oddziaływań środowiskowych. Umożliwia to identyfikację potencjalnych obciążeń środowiskowych. Zasadniczym celem badania jest identyfikacja faz i procesów generujących największe obciążenia środowiskowe (tzw. hotspotów) w całym cyklu życia systemu. Elementem uzupełniającym mogą być analizy scenariuszowe, które pozwalają na porównanie różnych przypadków w szerszym aspekcie.

Analizy LCA opierają się na międzynarodowych standardach ISO, które określają wymagania metodyczne oraz zapewniają spójność badań. Kluczowe znaczenie mają dwie normy: ISO 14040:2006 określająca zasady ogólne i strukturę ramową oraz ISO 14044:2006 definiująca szczegółowe wymagania i wytyczne [76, 77].

Norma ISO 14040:2006 wprowadza zestaw zasad przewodnich warunkujących wiarygodność badania LCA [76]:

- Zasada perspektywy cyklu życia- nakazuje uwzględnienie wszystkich etapów istnienia produktu lub usługi. W kontekście niniejszego badania determinuje ona konieczność objęcia analizą nie tylko fazy eksploatacji pojazdów, ale całego łańcucha dostaw wodoru wraz z infrastrukturą oraz procesami końca cyklu życia.
- Zasada podejścia relatywnego i jednostki funkcjonalnej- stanowi fundament metodyczny LCA. Wszystkie wyniki odnoszone są do jednostki funkcjonalnej, czyli miary funkcji pełnionej przez badany system, co umożliwia wewnętrzną spójność analizy oraz porównywanie różnych systemów realizujących tę samą funkcję.
- Zasada iteracyjności- uznaje, że badanie LCA rzadko przebiega sekwencyjnie tzn. uzyskanie nowych informacji może wymagać poprawy wcześniejszych założeń.
- Zasada transparentności- wymaga jasnego dokumentowania wszystkich założeń, danych i metod. W przypadku innowacyjnych technologii jest to szczególnie istotne ze względu na ograniczoną dostępność danych.
- Zasada kompleksowości- nakazuje uwzględnienie wszystkich istotnych kategorii oddziaływania. Koncentracja wyłącznie na emisjach gazów cieplarnianych może prowadzić do niepełnych bądź błędnych wniosków.

Struktura LCA według normy ISO 14044:2006 dzieli się na 4 etapy [77]:

- Cel i zakres- stanowi etap kluczowy, na którym precyzuje się cel badania, jednostkę funkcjonalną, granice systemu, procedury alokacji oraz wymagania dotyczące jakości danych.

- Inwentaryzacja cyklu życia (LCI, ang. Life Cycle Inventory)- obejmuje gromadzenie danych i kwantyfikację przepływów wchodzących i wychodzących z systemu. Rezultatem jest zestawienie wszystkich przepływów elementarnych w odniesieniu do jednostki funkcjonalnej.
- Ocena wpływu cyklu życia (LCIA, ang. Life Cycle Impact Assessment)- przekłada wyniki inwentaryzacji na wskaźniki odzwierciedlające potencjalne oddziaływanie środowiskowe. Obowiązkowe elementy obejmują wybór kategorii oddziaływania, klasyfikację i charakteryzowanie.
- Interpretacja- to faza analizy wyników w kontekście zdefiniowanego celu, obejmująca identyfikację istotnych kwestii, ocenę wrażliwości oraz formułowanie wniosków i rekomendacji.

Norma ISO 14044 określa również wymagania jakościowe obejmujące: pokrycie czasowe i geograficzne danych, pokrycie technologiczne, precyzję, kompletność, reprezentatywność oraz odtwarzalność [77]. Dla dynamicznie rozwijających się technologii, aktualność danych ma szczególne znaczenie ze względu na szybki postęp technologiczny.

2.9. Ślad węglowy pojazdów elektrycznych

Przeprowadzony przegląd literatury dotyczył zarówno metod oceny śladu węglowego pojazdów elektrycznych w transporcie drogowym, standardów i zasad obliczania śladu węglowego oraz czynników determinujących ocenę śladu węglowego w cyklu życia pojazdu elektrycznego. Wykonano również obszerny przegląd literatury badań związanych ze środowiskową analizą cyklu życia pojazdów z ogniwami paliwowymi oraz przegląd aktualnych aspektów prawnych Komisji Europejskiej dla rynku wodoru jako paliwa alternatywnego. Szczegółowy przegląd literatury dotyczący analizowanego obszaru badawczego został przedstawiony w publikacjach własnych. [21, 80]

W tabeli 11 zestawiono podsumowanie wykonanego przeglądu literatury.

Tab.11. Podsumowanie przeglądu literatury dotyczącego śladu węglowego pojazdów elektrycznych

Lp.	Autorzy	Wniosek
1	Lubecki A. i in. (2023) [82]; Gazda-Grzywacz M. i in. (2024) [83]; Ahmadi P. i in. (2022) [84]; Jelti F. i in. (2021) [85]; Grazieschi G. i in. (2023) [86]; Iannuzzi L. i in. (2021) [87]	Oddziaływania środowiskowe autobusów są zróżnicowane w zależności od zastosowanego układu napędowego. Analizowane technologie obejmują autobusy z ogniwami paliwowymi (FCEV, ang. Fuel Cell Electric Vehicle), elektryczne (BEV, ang. Battery Electric Vehicle), hybrydowe (HEV, ang. Hybrid Electric Vehicle), spalinowe (ICEV, ang. Internal Combustion Engine Vehicle) oraz hybrydowe z ogniwami paliwowymi (FC-HEV, ang. Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle). Badania prowadzono w różnych regionach geograficznych, m. W zakresie metodologii stosowano różne podejścia do oceny cyklu życia (LCA) m.in. ISO 14040/44, metodę ReCiPe 2016, model GREET, metodę Environmental Footprint (EF) oraz oprogramowanie ADVISOR. Jednostki funkcjonalne przyjęte w poszczególnych badaniach były zróżnicowane. Najczęściej wybierano 1km lub 100km.
2	Iannuzzi L. i in. (2021) [87]; Pederzoli D.W. i in. (2022) [88]; Caputi M. i in. (2022) [89]; Ahmadi P. i in. (2022) [84]; Ribau J.P. i in. (2014) [90]	W literaturze najczęściej porównywano autobusy FCEV i ICEV, choć część badań obejmowała również BEV i HEV. Niektóre analizy uwzględniały konkretne modele pojazdów (np. Nova LFS Diesel Bus, New Flyer DE40LF, New Flyer H40LFR), zapewniając bardziej kompleksową ocenę oddziaływań środowiskowych w pełnym cyklu życia.
3	Skrúcaný T i in. (2019) [91]; Sheng M. S. i in. (2021) [92]; Gazda-Grzywacz M. i in. (2024) [83]; Folęga P. (2024) [81]; Lubecki A. i in. (2023) [82]; Burchart-Korol D. i in. (2018) [93]	Struktura miksu energetycznego danego kraju jest kluczowym determinantem śladu węglowego pojazdów elektrycznych. W krajach, gdzie wykorzystanie węgla dominuje w miksie (np. Polska), emisje w cyklu WtW pojazdów elektrycznych mogą być wyższe niż emisje pojazdów spalinowych. W krajach z wysokim udziałem źródeł odnawialnych, (np. Austria, Nowa Zelandia), pojazdy elektryczne mogą przyczynić się do zmniejszenia emisji nawet do 90%.
4	Wong, E. Y. C. i in. (2021) [94]; He X. i in. (2021) [95]; Wang Q. i in. (2020) [96]; Sadeghi i Ghandehariun (2020) [97]	Pojazdy z ogniwami paliwowymi zasilane wodorem mogą istotnie przyczyniać się do redukcji emisji gazów cieplarnianych w ujęciu Well-to-Wheel (WtW). Wykorzystanie wodoru produkowanego z odnawialnych źródeł energii umożliwia ograniczenie emisji w całym cyklu WtW nawet o 90–92% w porównaniu z pojazdami wyposażonymi w silnik spalinowy. Jednakże, wykorzystanie wodoru wytwarzanego przy wykorzystaniu paliw kopalnych może generować emisje wyższe od pojazdów spalinowych (według różnych badań) od 56% do nawet 158%.

5	Ren L. i in. (2022) [98]; Qian S. i in. (2023) [99]	Pojazdy ciężkie zasilane ogniwami paliwowymi i wykorzystujące tzw. "zielony wodór" emitują 5,59 g CO ₂ /km. Dla porównania pojazdy ciężkie z silnikiem ZS (o zapłonie samoczynnym) emitują 215,15 g CO ₂ /km. Wykorzystanie wodoru produkowanego z paliw kopalnych znacząco może zwiększyć emisje względem pojazdów spalinowych.
6	Qiao Q. i in. (2017) [100]; Usai L. i in. (2021) [101]	Faza produkcji w cyklu życia pojazdów elektrycznych stanowi istotne źródło emisji gazów cieplarnianych. Etap produkcji pojazdu, w tym akumulatorów generuje wyższe emisje CO ₂ o 59%, w porównaniu do produkcji pojazdu spalinowego. W przypadku pojazdów z ogniwami paliwowymi, produkcja systemu ogniw paliwowych generuje około 5t CO ₂ eq. Za wysokie emisje w tym etapie odpowiada również produkcja zbiorników na wodór z włókna węglowego (ok. 40%) oraz produkcja katalizatorów platynowych do ogniw paliwowych (ok. 24%).
7	Ahmadi P. i in. (2022) [84]; Grazieschi G. i in. (2023) [86]; Iannuzzi L. i in. (2021)[87]; Pederzoli D. i in. (2022) [88]; Ribau J. i in. (2014) [90]	Autobusy z ogniwami paliwowymi zasilane „zielonym” wodorem redukują emisje GHG (ang. Greenhouse Gases) o 50-70% względem autobusów z silnikiem ZS. Zastosowanie wodoru produkowanego z paliw kopalnych, może prowadzić do zwiększenia emisji gazów cieplarnianych nawet o 171%. Dodatkowo przy pełnym obciążeniu pasażerskim zużycie paliwa rośnie o 24%, co podkreśla konieczność uwzględniania rzeczywistych warunków eksploatacyjnych w analizach środowiskowych.
8	Lie K. i in. (2021) [102]; Harris A. i in. (2018) [103]	Elektryfikacja flot autobusowych może przyczynić się do redukcji emisji GHG o 10–58% w porównaniu do flot złożonych z autobusów z silnikiem ZS. Co istotne, w krajach gdzie występuje miks energetyczny z udziałem OZE (Odnawialne źródła energii), emisje mogą się obniżyć o nawet 52%. Należy jednak uwzględnić, całkowite koszty cyklu życia autobusów elektrycznych, które są o 129-247% wyższe niż dla autobusów z silnikiem ZS.
9	Ahmadi P. i in. (2022) [84]; Jelti F. i in. (2021) [85]; Muñoz P. i in. (2022) [104]	Badania prowadzone w regionach takich jak UE, Argentyna, Kanada i Maroko pokazują, że autobusy FCEV mogą być skutecznym rozwiązaniem tylko wtedy, gdy dostępna jest odpowiednia infrastruktura energetyczna, a miks energetyczny danego kraju oparty jest na OZE. Wyniki dla autobusów BEV przedstawiają ich korzyści dla użytkownika w obszarach miejskich, ze względu na zerową emisję spalin podczas użytkowania.

Zestawione w tabeli 11 wyniki analiz w oparciu o wykonany przegląd literatury publikacje wskazują, że pojazdy elektryczne, w tym z ogniwami paliwowymi mogą znacząco przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych w sektorze transportu. Potencjał tej technologii

przełożył się na rosnące zainteresowanie oraz zwiększone inwestycje w branży motoryzacyjnej. Przegląd potwierdza, że pojazdy z ogniwami paliwowymi stanowią realną alternatywę zarówno dla tradycyjnych pojazdów z silnikiem spalinowym, jak i pojazdów w pełni elektrycznych z akumulatorami.

3. Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie wykonanego przeglądu literatury wysunięto następujące wnioski:

1. Środowiskowa analiza cyklu życia (LCA) jest powszechnie stosowaną metodą oceny wpływu środowiskowego paliw i pojazdów, w tym samochodów osobowych, pojazdów ciężarowych oraz autobusów. Badania wskazują, że kluczowe kategorie oddziaływań środowiskowych dla pojazdów FCEV obejmują emisję gazów cieplarnianych (GHG), skumulowane zapotrzebowanie na energię (CED, ang. Cumulative Energy Demand), szczególnie w kontekście zużycia paliw kopalnych, oraz zakwaszenie środowiska.
2. Ponadto stwierdzono, że wiele badań LCA dotyczących pojazdów FCEV koncentruje się głównie na podejściu Well-to-Wheel (WTW). Podejście to obejmuje przede wszystkim analizę produkcji, dystrybucji oraz zużycia paliwa, często pomijając inne etapy cyklu życia pojazdu, takie jak jego produkcja, eksploatacja oraz zagospodarowanie po zakończeniu użytkowania.
3. Etap eksploatacji autobusu jest etapem, który ma największy wpływ na wyniki analizy cyklu życia. Zastosowanie różnych technologii wytwarzania wodoru może prowadzić do znaczących różnic w poziomie emisji oraz zużyciu energii w całym cyklu życia pojazdu.
4. Analiza literatury wykazała również, że stosowane jednostki funkcjonalne różniły się w zależności od celu badania oraz rodzaju pojazdu. W większości przypadków wykorzystywano jednostkę 1 km, także dla pojazdów ciężkich i autobusów. Wybór jednostki funkcjonalnej, podobnie jak przyjęte granice systemu oraz zastosowane metody LCA, może wpływać na porównywalność wyników między poszczególnymi badaniami. Jednocześnie zróżnicowanie to umożliwia dostosowanie analiz do specyfiki lokalnej infrastruktury, systemów energetycznych oraz warunków eksploatacji pojazdów, co zwiększa ich trafność i dokładność.
5. Ponad 50% przeanalizowanych publikacji dotyczyło samochodów osobowych. Tylko około 30% artykułów obejmowało analizę LCA autobusów miejskich

wodorowych (FCEV), co wskazuje na potrzebę rozwoju badań w tym obszarze. W przypadku analizy autobusów FCEV jedynie w 3 publikacjach określono jednostkę funkcjonalną jako 1pkm (pasażerokilometr), która uwzględnia obciążenie pasażerskie i co może wpływać na ostateczny wynik analiz LCA.

6. Ponadto przegląd literatury potwierdził, że analiza cyklu życia (LCA) jest kluczowym narzędziem do porównywania różnych technologii pojazdów i paliw. Wykazano, że zastosowanie tej metody do oceny pojazdów FCEV w odniesieniu do innych układów napędowych, takich jak BEV, HEV oraz ICEV, pozwala uwzględnić cały cykl życia oraz różne kategorie oddziaływań środowiskowych.
7. Stwierdzono również, że w krajach, w których węgiel pozostaje dominującym źródłem energii, takich jak Polska i Czechy, emisje związane z użytkowaniem pojazdów elektrycznych mogą być porównywalne lub nawet większe niż w przypadku pojazdów spalinowych. Wpływ środowiskowy pojazdów zależy w dużym stopniu od warunków lokalnych, w szczególności od struktury krajowego lub regionalnego systemu energetycznego. Dlatego istotne jest prowadzenie analiz w warunkach krajowych, aby wiarygodnie ocenić ich oddziaływanie na środowisko.
8. Przegląd literatury wykazał również ograniczone uwzględnienie analizy wrażliwości zmiennych wpływających na wyniki LCA. Istnieje niewiele badań dotyczących tego, w jakim stopniu zmiany kluczowych parametrów, takich jak miks energetyczny, sposób produkcji wodoru, przyjęte granice systemu czy jednostka funkcjonalna, wpływają na końcowe wyniki.

Przeprowadzony przegląd literatury potwierdza aktualność i znaczenie podjętej tematyki, a jednocześnie wskazuje konkretne luki badawcze. W szczególności brakuje całościowych analiz LCA autobusów z ogniwami paliwowymi, które uwzględniałyby pełny cykl życia pojazdu, obciążenie pasażerskie jako jednostkę funkcjonalną, specyfikę miksu energetycznego oraz produkcji paliwa, a także analizę wrażliwości. Wskazane ograniczenia stanowią bezpośrednie uzasadnienie dla realizacji niniejszych badań oraz podjęcia bardziej szczegółowej analizy w warunkach lokalnych.

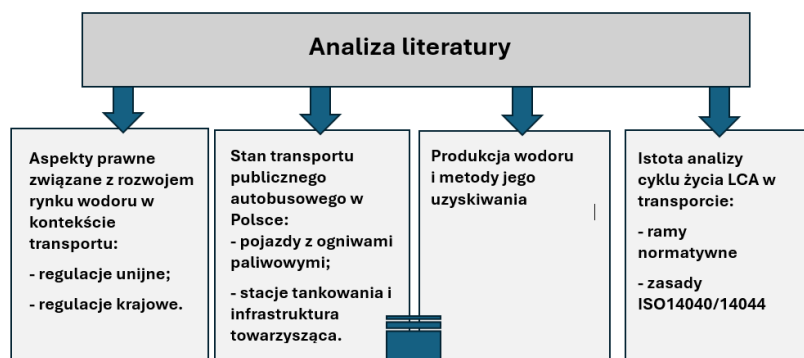
4. Cel i zakres pracy

Głównym celem niniejszej pracy była środowiskowa ocena cyklu życia wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie obejmująca zarówno cykl życia paliwa, jak i cykl życia autobusu z ogniwami paliwowymi oraz identyfikację kluczowych czynników determinujących oddziaływanie środowiskowe.

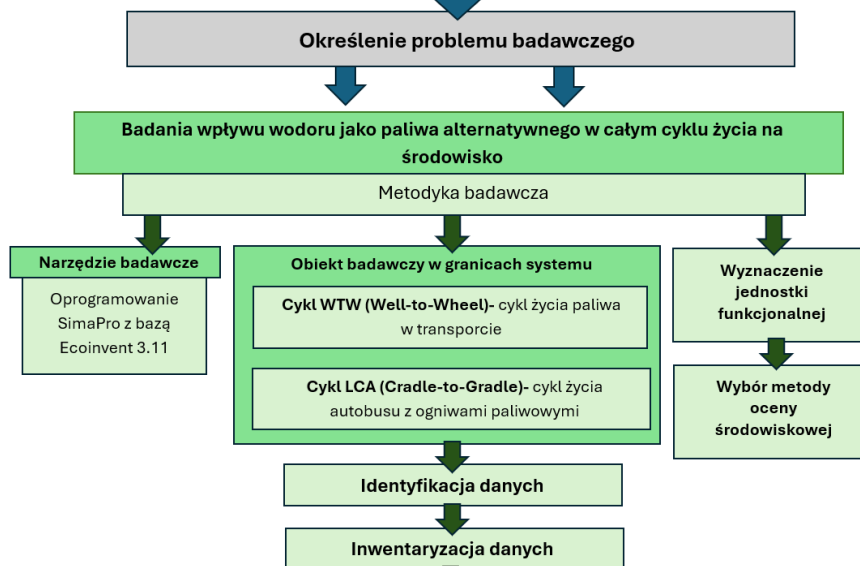
Osiągnięcie zasadniczego celu pracy było możliwe dzięki realizacji następujących zadań przedstawionych na rysunku 10:

1. Analizę aktualnego stanu wiedzy z zakresu: aspektów prawnych związanych z rozwojem rynku wodoru w kontekście transportu, stanu transportu publicznego autobusowego, metod produkcji wodoru oraz istoty analizy cyklu życia.
2. Określenie problemu badawczego.
3. Wybór narzędzia badawczego.
4. Określenie granic systemu analizy LCA dla analizowanego obiektu badań.
5. Wybór jednostki funkcjonalnej oraz uzasadnienie wyboru.
6. Wybór metody oceny oddziaływań środowiskowych zastosowanej w pracy w celu modelowania i określenia wpływu na środowisko.
7. Identyfikacja oraz wykonanie analizy inwentaryzacji danych dla następujących etapów:
 - a. produkcja wodoru w instalacji elektrolizy na podstawie rzeczywistych danych,
 - b. transport wodoru z wykorzystaniem autocystern (tzw. wodorowozów) do stacji tankowania obsługującej flotę autobusową komunikacji miejskiej.
 - c. eksploatacja floty autobusowej komunikacji miejskiej, uwzględniającej zużycie paliwa.
 - d. produkcja autobusów z ogniwami paliwowymi.
 - e. utylizacja pojazdów.
8. Wykonanie analizy LCA w ramach określonych granic systemu dla badanego obiektu.
9. Identyfikację kluczowych obszarów wpływających negatywnie na kategorie wpływu.
10. Wykonanie analizy niepewności metodą Monte Carlo.
11. Wykonanie analizy scenariuszowej w celu oceny alternatywnych wariantów, w tym porównanie: paliw wykorzystywanych w transporcie autobusowym, metod produkcji energii elektrycznej do zasilania procesu elektrolizy oraz metod produkcji wodoru
12. Sformułowanie zaleceń i wytycznych na podstawie wyników, mających na celu wspomaganie decyzji dotyczących wyboru odpowiedniej technologii napędu w transporcie publicznym w zależności od uwarunkowań lokalnych.

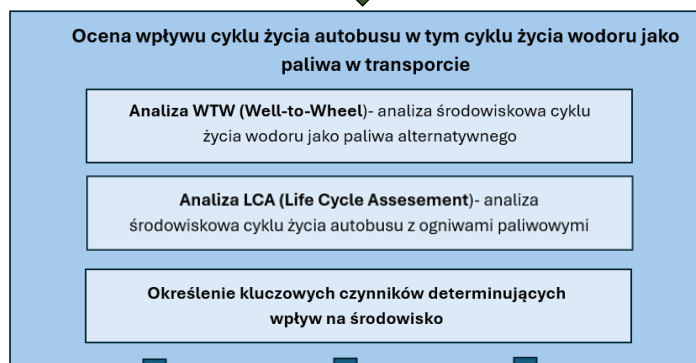
ETAP I



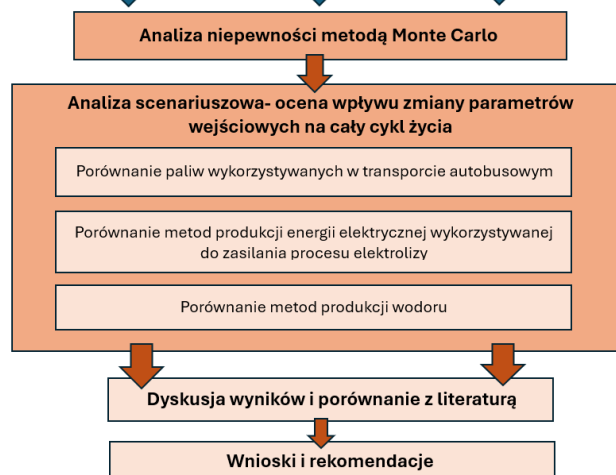
ETAP II



ETAP III



ETAP IV



Rys. 10. Struktura pracy

W celu realizacji pracy sformułowano problem badawczy w postaci pytania:

Czy zastosowanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie autobusowym prowadzi do ograniczenia negatywnego oddziaływania środowiskowego w całym cyklu życia, w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi?

Tak zdefiniowany problem badawczy wyznacza kierunek dalszych analiz i stanowi podstawę do oceny potencjału wykorzystania wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie publicznym, z uwzględnieniem polskich warunków energetycznych i transportowych.

Na podstawie przeglądu literatury sformułowano następującą tezę:

Oddziaływanie środowiskowe w cyklu życia autobusu elektrycznego z ogniwami paliwowymi jest zależne od metod produkcji wodoru oraz źródeł wykorzystywanej energii elektrycznej.

CZĘŚĆ BADAWCZA

5. Metodyka badawcza

Badania LCA obejmuje: metodę produkcji wodoru jako paliwa w procesie elektrolizy przy wykorzystaniu energii elektrycznej pochodzącej ze spalania biomasy, transport wodoru, dystrybucję oraz eksploatację autobusów 12 m z ogniwami paliwowymi. Dodatkowo obejmuje produkcję autobusu oraz jego utylizację. Zebrane dane są danymi rzeczywistymi i odzwierciedlają warunki lokalne.

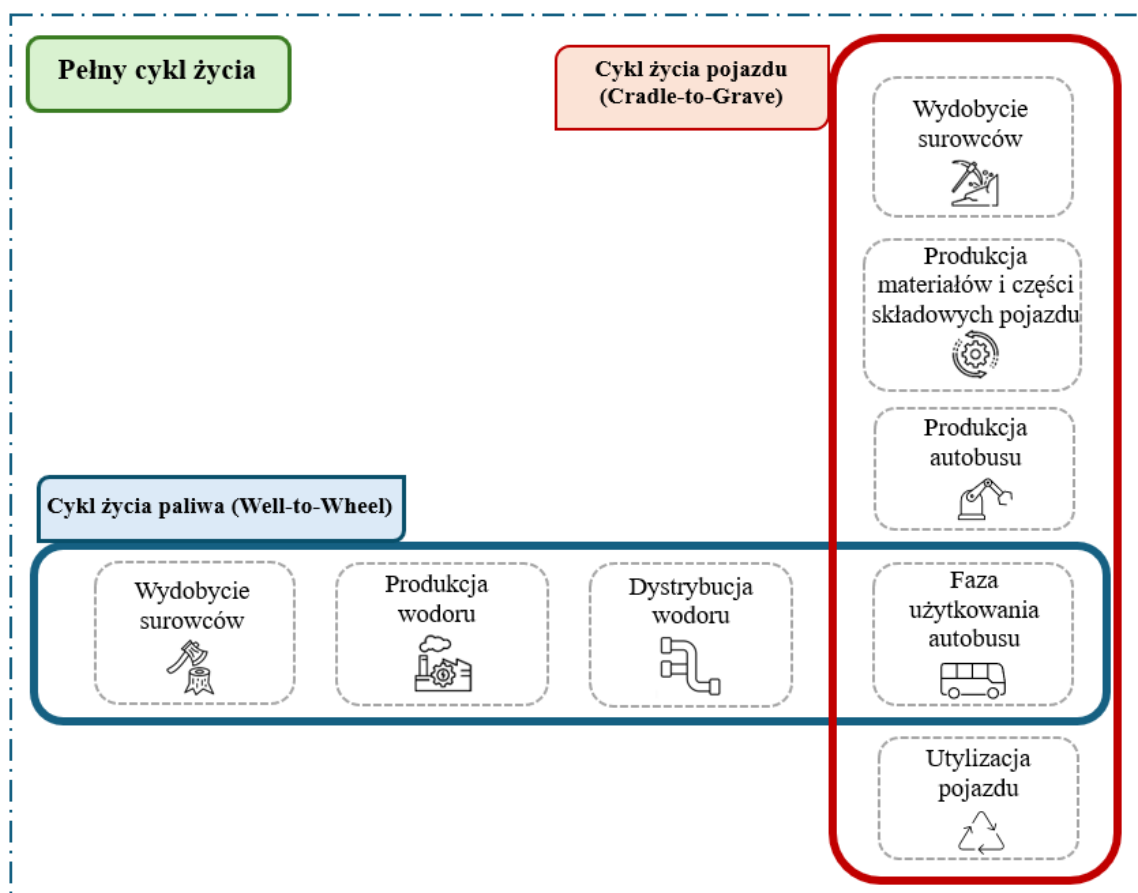
5.1. Narzędzie badawcze

Obliczenia poszczególnych wskaźników środowiskowych wykonano przy zastosowaniu oprogramowania SimaPro z bazą danych Ecoinvent w wersji 3.11. Program SimaPro jest jednym z najbardziej popularnych narzędzi LCA w środowisku naukowym i przemysłowym. Oprogramowanie umożliwia przejrzyste modelowanie złożonych systemów produktowych. Istotną zaletą SimaPro jest jego integracja z wieloma metodami oceny środowiskowej, w tym Environmental Footprint, co zapewnia pełną spójność obliczeniową.

5.2. Określenie granic systemu

Granice systemu definiują zakres procesów uwzględnionych w analizie LCA. Określają one, które procesy i przepływy materiałowo-energetyczne są włączone do badania, a które zostały wyłączone. Prawidłowe zdefiniowanie granic systemu ma fundamentalne znaczenie dla wiarygodności i porównywalności wyników analizy.

W niniejszym badaniu przyjęto podejście "od kołyski do grobu" (ang. cradle-to-grave), obejmujące wszystkie istotne etapy cyklu życia pojazdu, od pozyskania surowców, przez produkcję, użytkowanie, aż po końcowe zagospodarowanie. Analizowany system składa się z dwóch współzależnych podsystemów przedstawionych na rysunku 11. Pierwszy podsystem obejmuje cykl życia paliwa (Well-to-Wheel), natomiast drugi dotyczy cyklu życia pojazdu (Cradle-to-Grave). Oba podsystemy są ze sobą ściśle powiązane i tworzą spójny obraz oddziaływań środowiskowych.



Rys. 11. Granice systemu analizy cyklu życia. Pełny cykl życia obejmujący cykl wodoru jako paliwa oraz cykl autobusu z ogniwami paliwowymi.

a) Cykl życia wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie

Cykl życia paliwa obejmuje wszystkie procesy związane z pozyskaniem, przetworzeniem i dostarczeniem nośników energii do miejsca ich wykorzystania w pojeździe. Sposób wytwarzania paliwa lub energii ma znaczący wpływ na całkowite obciążenia środowiskowe związane z eksploatacją pojazdu. Analizy własne dotyczące tego etapu obejmują rzeczywisty przypadek produkcji wodoru w procesie elektrolizy, przy wykorzystaniu energii elektrycznej pochodzącej ze spalania biomasy w jednej z elektrowni zlokalizowanej w Polsce.

Cykl życia wodoru rozpoczyna się od pozyskania biomasy wykorzystywanej jako surowiec energetyczny. Biomasa jest następnie przekształcana w energię elektryczną w procesie spalania w elektrocieplowni. Wytworzona energia elektryczna zasila proces elektrolizy wody, w którym powstaje wodór. Jest to kluczowy etap łańcucha dostaw wodoru, charakteryzujący się znacznym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Efektywność tego procesu oraz struktura

miksu energetycznego użytego do zasilania elektrolizera mają bezpośredni wpływ na wyniki analizy cyklu życia.

Po wytworzeniu wodoru jest sprężany, co jest niezbędne do jego magazynowania w zbiornikach pojazdu. Sprężanie również wymaga nakładów energetycznych i generuje dodatkowe obciążenia środowiskowe. Następnie sprężony wodór jest transportowany wodorowozami do stacji tankowania autobusów. Zużywanie wodoru podczas eksploatacji autobusu stanowi końcowy etap analizy cyklu życia wodoru.

b) Cykl życia autobusu z ogniwami paliwowymi

Cykl życia pojazdu obejmuje wszystkie procesy związane z wytworzeniem, eksploatacją i zagospodarowaniem pojazdu po zakończeniu jego użytkowania. Ten podsystem różni się w zależności od zastosowanej technologii napędowej.

Pierwszym etapem jest wydobywanie surowców niezbędnych do produkcji materiałów i komponentów pojazdu, czyli surowców metalicznych oraz niemetalicznych (tworzywa sztuczne, szkło, gumy). W przypadku autobusów elektrycznych szczególnie istotne jest wydobywanie surowców do produkcji akumulatora (lit, kobalt, nikiel, grafit) oraz ogniw paliwowych (platyna jako katalizator). Procesy wydobywcze są energochłonne i związane ze znaczącymi oddziaływaniami środowiskowymi, takimi jak degradacja ekosystemów, zużycie wody czy emisje zanieczyszczeń.

Faza użytkowania pojazdu obejmuje okres eksploatacji o przebiegu 800 000 km. Jest to referencyjny przebieg dla pojazdów ciężkich, co zostało wskazane w Dyrektywie 2009/33/WE. W tej fazie uwzględnia się zużycie paliwa (wodoru lub oleju napędowego). Etap serwisowania pojazdu oraz wymiany części eksploatacyjnych (opony, klocki hamulcowe, filtry, płyny) został pominięty. Pominięcie tych etapów jest częstą praktyką w wielu badaniach naukowych [88, 106, 107].

Kończącym etapem w analizie cyklu życia autobusu jest zagospodarowanie odpadów po zakończeniu eksploatacji pojazdu. W ramach zastosowanego podejścia, etap ten obejmuje wyłącznie procesy związane z przetwarzaniem odpadów. Wynika to z przyjętego systemu alokacji, w którym korzyści wynikające z recyklingu są przypisywane do kolejnego cyklu życia materiału, a nie do analizowanego systemu.

5.3. Wyznaczenie jednostki funkcjonalnej

Dotychczas większość autorów w badaniach LCA autobusów stosowała jednostki odniesienia w postaci 1 km lub 100 km przebiegu pojazdu. Takie podejście nie uwzględnia jednak rzeczywistej funkcji systemu transportu publicznego, jaką jest przemieszczanie osób. Autobusy charakteryzują się zmiennym obciążeniem w zależności od pory dnia, dnia tygodnia i obsługiwanej linii. Efektywność środowiskowa systemu transportowego zależy nie tylko od charakterystyki technicznej pojazdów, ale również od intensywności ich wykorzystania. Z tego względu pasażerokilometr lepiej odzwierciedla rzeczywistą usługę transportową i pozwala na prawidłową alokację obciążeń środowiskowych. **Dlatego w niniejszej pracy jednostkę funkcjonalną zdefiniowano jako przewóz jednego pasażera na dystansie jednego kilometra, wyrażoną jako 1 pasażerokilometr (1 pkm).**

Według badań przeprowadzonych przez Fundusz Doradztwa Infrastrukturalnego Banku Światowego (PPIAF), wskaźnik obciążenia zależy od charakteru trasy, ale w praktyce wynosi zazwyczaj około 30–40% [108]. Zasadność wybranej wartości wskaźnika potwierdza również praca autorów J. Hellekes i C. Winkler z 2021 roku [109], gdzie średni wskaźnik obciążenia miejsc w mieście średniej wielkości w Niemczech wyniósł 37% w ciągu 24 godzin. Zgodnie z analizami literatury przyjęto wskaźnik zapelnienia autobusu jako 35%.

5.4. Wybór metody oceny środowiskowej

W oparciu o wykonany przegląd literatury dotyczący metod LCIA wykazano, że metoda GREET (ang. Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) była stosowana w około 40% badanych przypadków. Jednak aż 75% zastosowań tej metody dotyczyło badań realizowanych poza Europą, głównie w Stanach Zjednoczonych i Chinach. W tych regionach struktura miksu energetycznego, uwarunkowania technologiczne oraz ramy regulacyjne istotnie różnią się od warunków europejskich. Inną, metodą wykorzystywaną do analiz cyklu życia pojazdów elektrycznych była metoda ReCiPe. Wykorzystywana była ona w około 14% przeanalizowanych przypadkach. Co istotne, wszystkie te zastosowania dotyczyły wyłącznie badań europejskich. Mimo, że wyżej opisane metody są najczęściej wybierane w literaturze do obliczeń w ramach analiz LCA, w ramach niniejszej pracy zdecydowano się na wybór metody Environmental Footprint 3.1 (EF 3.1).

Jest to jedna z najnowszych metod oceny wpływu na środowisko, zalecana na poziomie Unii Europejskiej do analizy produktów i systemów, w tym w sektorze transportu. Do tej pory

była wykorzystywana w niewielu pracach, co wynika z tego, że jest to stosunkowo nowa metoda z 2021 roku.

Metoda ta jest oficjalnie rekomendowana przez Komisję Europejską jako ujednolicone narzędzie do oceny środowiskowej produktów i organizacji [110]. Została ona opracowana przez Wspólne Centrum Badawcze Komisji Europejskiej (JRC, ang. Joint Research Centre), z uwzględnieniem specyfiki europejskich warunków środowiskowych, a także systemu prawnego [110]. Dodatkowo, uwzględnia warunki energetyczne i środowiskowe Europy-

Metoda EF stanowi również fundament projektowanego rozporządzenia w sprawie ekoprojektowania dla zrównoważonych produktów (ang. Ecodesign for Sustainable Products Regulation, ESPR) [1]. Co ważne, jest również w pełni zgodna z normami dla analiz cyklu życia ISO 14040 [76] i ISO 14044 [77] oraz uzupełniającymi wytycznymi ILCD (ang. International Reference Life Cycle Data System) [111].

Metoda Environmental Footprint jest również zintegrowana z oprogramowaniem SimaPro oraz bazami danych EcoInvent [112]. Zapewnia to spójne modelowanie i eliminuje konieczność stosowania zewnętrznych narzędzi obliczeniowych. Dla porównania, metoda GREET funkcjonuje jako niezależne środowisko, co wymaga m.in. dodatkowego importu i konwersji danych, co może powodować brak wiarygodnych wyników analiz.

Istotną zaletą metody Environmental Footprint jest jej wielowskaźnikowy charakter. Metoda to obejmuje 16 kategorii wpływu środowiskowego [113]. Uwzględnia ona następujące kategorie wpływu [113]:

1. **Ślad węglowy (ang. Climate change)** - określa emisje gazów cieplarnianych wyrażone w kg ekwiwalentu CO₂, z wykorzystaniem modelu bazowego IPCC 2021 dla horyzontu czasowego 100 lat. Jednostka: *kg CO₂eq*.
2. **Zubożenie warstwy ozonowej (ang. Ozone depletion)** - ocenia potencjał niszczenia stratosfery (ODP, ang. Ozone Depletion Potential) przez substancje zubożające warstwę ozonową, również w perspektywie 100 lat. Jednostka: *kg CFC11eq*.
3. **Promieniowanie jonizujące (ang. Ionising radiation)**- określa wpływ promieniowania jonizującego na populację ludzką w odniesieniu do izotopu Uranu-235 jako substancji referencyjnej. Jednostka: *kBq U-235 eq*.
4. **Fotochemiczne tworzenie ozonu (ang. Photochemical ozone formation)**- wyraża udział emisji w tworzeniu ozonu troposferycznego. Kategoria uwzględnia różnicowanie przestrzenne i dotyczy wyłącznie Europy. Jednostka: *kg NMVOC eq*.

5. **Emisja cząstek stałych (ang. Particulate matter)**- ocenia liczbę nowych zachorowań na skutek z emisji pyłów PM_{2.5}, z uwzględnieniem środowisk miejskich, wiejskich oraz pomieszczeń zamkniętych zarówno w obszarach miejskich, jak i wiejskich. Jednostka: *disease incidence*
6. **Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi (ang. Human toxicity, non-cancer)** - mierzy szacowany wzrost zachorowalności w całej populacji ludzkiej na jednostkę masy wyemitowanej substancji chemicznej (przypadki/kg), z wykorzystaniem modelu USEtox. Jednostka: *CTUh (ang. Comparative Toxic Unit for humans)*
7. **Toksyczność rakotwórcza dla ludzi (ang. Human toxicity, cancer)** - analogicznie jak powyżej, mierzy wzrost zachorowalności na choroby nowotworowe (przypadki/kg) przy zastosowaniu modelu USEtox. Jednostka: *CTUh (ang. Comparative Toxic Unit for humans)*
8. **Zakwaszenie, ekosystemy lądowe i słodkowodne (ang. Acidification, terrestrial and freshwater)**- ocenia potencjał zakwaszenia środowiska wyrażony jako równoważnik jonów wodorowych. Określa zdolność do obniżania pH w glebie i wodach słodkich. Jednostka: *mol H⁺ eq*
9. **Eutrofizacja wód słodkich (ang. Eutrophication, freshwater)**- określa potencjał wzbogacenia wód słodkich w substancje biogenne (głównie fosforu), co może prowadzić do nadmiernego rozwoju biomasy i pogorszenia jakości wody. Jednostka: *kg P eq*.
10. **Eutrofizacja wód morskich (ang. Eutrophication, marine)**- określa potencjał wzbogacenia środowiska morskiego w substancje biogenne (głównie azotu), co może prowadzić do nadmiernego rozwoju biomasy i pogorszenia stanu ekosystemów. Jednostka: *kg N eq*
11. **Eutrofizacja ekosystemów lądowych (ang. Eutrophication, terrestrial)**- określa potencjalny wpływ osadzania się związków azotu z atmosfery na wzbogacenie ekosystemów lądowych. W konsekwencji może skutkować zakłóceniem ich równowagi biologicznej. Jednostka: *mol N eq*
12. **Ekotoksyczność wód słodkich (ang. Ecotoxicity, freshwater)**- określa udział gatunków potencjalnie narażonych na działanie substancji, uwzględniając czas i objętość środowiska w odniesieniu do jednostki emisji, z wykorzystaniem modelu USEtox. Jednostka: *CTUe (ang. Comparative Toxic Unit for ecosystems)*
13. **Użytkowanie terenu (ang. Land use)**- określa wpływ użytkowania terenu na jakość gleby na podstawie wskaźnika opracowanego przez JRC, uwzględniającego

kluczowe właściwości gleby zgodnie z modelem LANCA®. Jednostka: *Pt* (ang. *Points*, 1 *Pt* odpowiada około 1/1000 rocznego wpływu środowiskowego przeciętnego mieszkańca Europy)

14. **Zużycie wody (ang. Water use)**- określa ilość wody ograniczonej dla innych użytkowników w wyniku jej zużycia, z uwzględnieniem lokalnych warunków dostępności wody według modelu AWARE. Jednostka: *m³ deprived*

15. **Zubożenie zasobów kopalnych (ang. Resource use, fossils)**- określa zużycie paliw kopalnych, odzwierciedlając ich wyczerpywanie jako zasobów nieodnawialnych.. Jednostka: *MJ*

16. **Zubożenie zasobów mineralnych i metali (ang. Resource use, minerals and metals)**- ocenia zużycie zasobów mineralnych i metali, odzwierciedlając ich wyczerpywanie jako zasobów nieodnawialnych. Jednostka: *kg Sb eq*

Wyniki analizy cyklu życia przeprowadzonej metodą Environmental Footprint przedstawiono z uwzględnieniem oceny szkód oraz normalizacji.

Etap oceny szkód polega na przekształceniu wyników inwentaryzacji w oddziaływania środowiskowe, które następnie przypisywane są do odpowiednich kategorii wpływu przy użyciu współczynników charakteryzowania [77]. Wyniki wyrażane są w jednostkach fizycznych właściwych dla danej kategorii, takich jak *kg CO₂ eq*, *mol H⁺ eq*, *CTUh* czy *CTUe* [114].

Wyniki normalizacji oblicza się, odnosząc wartości oddziaływań uzyskanych na etapie oceny szkód do wartości bazowych reprezentujących średni roczny wpływ środowiskowy przypadający na jednego mieszkańca świata [114, 115]. Wyniki normalizacji są bezwymiarowe i informują o tym, jaki udział w rocznym oddziaływaniu przeciętnego mieszkańca świata stanowi wpływ analizowanego systemu w danej kategorii, umożliwiając tym samym porównanie wszystkich kategorii wpływu w jednolitym układzie odniesienia. Normalizacja umożliwia tym samym porównanie wyników wszystkich kategorii wpływu na wspólnej skali odniesienia.

Podsumowując, wybór metody Environmental Footprint do analizy cyklu życia wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie, został uznany za najbardziej uzasadniony ze względów metodologicznych, jak i ze względu na jej oficjalną rekomendację przez Unię Europejską. Istotny również jest jej charakter aplikacyjny, dzięki możliwości wykorzystania jej w ramach raportów EPD. Ponadto zapewnia ona wysoką jakość i wiarygodność oceny cyklu życia. Umożliwia również analizę oddziaływań środowiskowych we wszystkich etapach cyklu życia paliwa i pojazdu, przy uwzględnieniu warunków europejskich, w tym polskich.

6. Identyfikacja i inwentaryzacja danych

Istotnym etapem w ramach niniejszej pracy była identyfikacja i inwentaryzacja danych dotyczących wszystkich etapów cyklu życia wodoru jak i autobusu z ogniwami paliwowymi. W ramach pracy zidentyfikowano i zinwentaryzowano ponad 1000 pojedynczych danych związanych z badaniami. Dane te były danymi rzeczywistymi, które odzwierciedlają warunki krajowe. Ze względu na poufność danych przedstawione zostaną jedynie podstawowe dane w ramach niniejszej analizy. Identyfikacja i inwentaryzacja objęła 2 etapy:

1. Cykl życia wodoru jako paliwa alternatywnego.
2. Cykl życia autobusu z ogniwami paliwowymi.

Zbieranie danych dotyczących cyklu życia paliwa objęło:

- a. produkcję energii elektrycznej w ramach procesu spalania biomasy,
- b. produkcję wodoru w procesie elektrolizy,
- c. transport wodoru i jego sprężanie,
- d. eksploatację autobusu 12 metrowego z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem.

Zbieranie danych dotyczących cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi objęło:

- a. wydobycie surowców do procesu produkcji pojazdu,
- b. proces produkcji całego pojazdu,
- c. utylizację.

6.1. Produkcja energii elektrycznej ze spalania biomasy

Pierwszym etapem analizowanym w cyklu życia wodoru była analiza produkcji energii elektrycznej ze spalania biomasy. Łańcuch dostaw wodoru rozpoczyna się od wytworzenia energii elektrycznej i produkcji wodoru w jednej z elektrowni w Polsce. Analizowana elektrownia dysponuje mocą zainstalowaną 100 MW i składa się z dwóch bloków biomasowych o mocy 50 MW każdy. Roczna produkcja energii elektrycznej wynosi 710 000 MWh. Elektrownia oprócz wytwarzania energii elektrycznej, wytwarza również energię cieplną.

Struktura paliw wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej obejmuje biomasę (99,89%) oraz olej opałowy (0,11%) (tab. 12). Olej opałowy zużywany jest wyłącznie do rozruchu kotłów w ilości około 400 Mg rocznie. Ze względu na marginalną wartość poniżej 1% oraz zgodnie z zasadą unikania alokacji w ramach normy ISO 14044, element ten pominięto w analizie.

Tab. 12. Struktura paliw wykorzystywanych do produkcji energii elektrycznej.

l.p	Opis	Wartość	Komentarz
1	Biomasa	99,89%	W skład biomasy wchodzi 90% zrębki drzewnej oraz 10% słomy
2	Olej opałowy	0,11%	Olej zużywany do rozruchu kotłów. Wartość pominięta ze względu na marginalną wartość (poniżej 1%). Wg zasad ISO 14044 należy unikać alokacji.

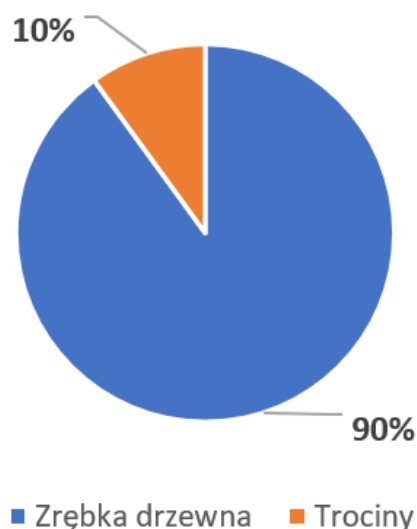
Biomasa wykorzystywana w procesie spalania składa się w 90% ze zrębki drzewnej oraz w 10% z trocin (rys.12). Na zrębkę drzewną z kolei składa się:

- zrębka z tartaków- 45%;
- zrębka z pozostałości lasów- 40%;
- zrębka z sadów owocowych- 5%.

Tab.13. Dane produkcyjne elektrowni analizowanej na potrzeby badań.

l.p	Opis	Wartość	Jednostka
1	Roczna produkcja wodoru	300	Mg/rok
		300000	kg/rok
2	Roczne zużycie biomasy	720 000	Mg/rok
3	Średnia wartość opałowa biomasy	10200	kJ/kg
4	Moc zainstalowana	100	MW
5	Roczna produkcja en. elektrycznej	710 000	MWh

W tabeli 14 przedstawiono dane produkcyjne analizowanej elektrowni. Roczne zużycie biomasy wynosi 720 000 Mg, a średnia wartość opałowa surowca to 10 200 kJ/kg. Granice systemu obejmują procesy pozyskania biomasy leśnej, w tym operacje zrywkowe, transport drewna i rozdrabnianie. Transport biomasy realizowany jest z odległości do 150 km od elektrowni, przy wykorzystaniu transportu pojazdami ciężkimi.



Rys. 12. Skład procentowy spalanej biomasy.

Proces spalania i produkowania energii elektrycznej wiąże się z emisjami różnych substancji do powietrza (tj. CO₂ biogeniczny, NO_x, SO₂, pyły, CO), zużyciem wody do celów chłodzenia oraz powstawaniem odpadów stałych (np. popioły, żużle).

W niniejszych analizach uwzględniono emisje ze spalania biomasy. Dane przedstawiono w tabeli 2. Poziom emisji został określony przez elektrownię na podstawie § 44 Rozporządzenia Ministra Gospodarki z 22 marca 2023 r. (Dz. U. z 2023 r., poz. 819, ze zm.) [116], które nakłada obowiązek informacyjny o emisjach wytworzonych podczas produkcji energii elektrycznej.

Tab.14. Emisje generowane w procesie spalania biomasy.

l.p.	Rodzaj paliwa	CO ₂	SO ₂	NO _x	Pyły
1	Biomasa	kg/MWh			
		1125,67	0,03	0,66	0,02
		kg/kgH ₂			
		55,64	0,00148	0,03263	0,00099

6.2. Produkcja wodoru

Drugim etapem analizowanym w ramach badań cyklu życia wodoru była produkcja wodoru w procesie elektrolizy. Instalacja produkcji wodoru jest zintegrowana z elektrolizerem typu PEM. System składa się z dwóch stosów ogniów o łącznej mocy nominalnej 2,5 MW i zdolny jest do produkcji wodoru z przepływem do 500 Nm³/h. Przy wydajności eksploatacyjnej 85%, roczna produkcja wodoru wynosi około 300 Mg. Żywotność stosów ogniów elektrolizera

producent określił na 80 000 godzin pracy lub analogicznie 10,7 lat. Podstawowe parametry techniczne instalacji przedstawiono w tabeli 15.

Tab.15. Dane techniczne instalacji elektrolizera.

l.p	Opis	Wartość	Jednostka
1	Moc elektryczna	2,5	MW
		2500	kW
2	Wydajność	500	Nm ³ /h
3	Zużycie prądu stałego	4,4	kWh/Nm ³
4	Zużycie wody procesowej (demineralizowanej)	9	H ₂ O/kgH ₂
5	Czystość wodoru	99,99	%
6	Straty produkcyjne roczne	1	%
7	Żywotność stosów	80000	h
		10,7	rok

Produkcja wodoru odbywa się przy użyciu stosów ogni w membranę do wymiany protonów, które rozdzielają wodę demineralizowaną na wodór i tlen w formie gazowej. System elektrolizera składa się z dwóch głównych modułów:

1. Kontener procesowy (rys. 13) zawiera główne elementy układu technologicznego: stosy ogni, system uzdatniania wody (odwrócona osmoza, demineralizacja), układ oczyszczania wodoru, systemy chłodzenia, zawory oraz automatykę procesową.



Rys. 13. Kontener procesowy. Źródło:[117]

2. Kontener zasilający- zawiera instalację rozdzielczą oraz przetwornicę AC/DC dostarczającą zasilanie do stosów ogni. W skład wchodzi: szafa rozdzielcza, wentylator, prostownik AC/DC oraz transformator.

Wodór produkowany przez system charakteryzuje się czystością 99,998%, z zawartością tlenu poniżej 2 ppm i azotu poniżej 12 ppm. Parametry te umożliwiają bezpośrednie wykorzystanie w transporcie bez dodatkowego oczyszczania.

System zawiera niezbędne media pomocnicze: układ zasilania wodą (odwrócona osmoza, demineralizacja), system sprężonego powietrza sterującego, układ chłodzenia (chiller, zamknięty obieg) oraz system oczyszczania i osuszania wodoru. Ze względu na dostępność danych w procesie uwzględniono dodatkowo zużycie wody procesowej (demineralizowanej) o wartości 9kg/kgH₂ oraz przepływ powietrza skompresowanego w systemie. Obieg zamknięty wody w systemie chłodzenia pozwala na pominięcie tego elementu w procesie ze względu na marginalny udział w procesie.

Ze względu na poufny charakter szczegółowych danych inwentaryzacyjnych dotyczących elektrolizera, proces został zamodelowany poprzez skalowanie dostępnego procesu dotyczącego ogniw paliwowych w bibliotece EcoInvent, z uwzględnieniem rzeczywistej mocy instalacji i wydajności produkcji wodoru.

Tabela 16 przedstawia zestawienie danych wejściowych oraz wartości obliczonych, które zostały wykorzystane do określenia zapotrzebowania na energię i surowce w procesie produkcji wodoru. W tabeli 16 ujęto podstawowe parametry operacyjne instalacji, obejmujące czas pracy, współczynnik wykorzystania mocy oraz sprawność systemu. Na tej podstawie wyznaczono zużycie energii elektrycznej przez elektrolizer oraz całkowitą produkcję wodoru w analizowanym okresie eksploatacji.

Tabela 17 przedstawia dane przeliczone na jednostkę 1 kg wodoru oraz 1 MWh, co umożliwia bezpośrednie porównanie wyników oraz ich wykorzystanie w analizie cyklu życia paliwa. Uwzględniono w niej zużycie energii elektrycznej, zapotrzebowanie na biomasę, w tym jej poszczególne frakcje, takie jak zrębki drzewne i trociny, a także transport biomasy wyrażony jako praca przewozowa.

Tab.16. Wartości obliczone na podstawie danych wejściowych

l.p	Opis	Wartość	Jednostka
1	Roczne godziny pracy elektrowni	7100	h/rok
2	Współczynnik wykorzystania mocy	81,05	%
3	Sprawność elektrowni	35	%
4	Zużycie energii przez elektrolizer	14682,98	MWh/rok
5	Produkcja wodoru przez całą żywotność stosów	3223207,09	kgH ₂
		3223,21	tH ₂

Tab.17. Zestawienie zużycia energii, surowców oraz pracy przewozowej

l.p	Opis	Wartość	Jednostka
1	Zużycie energii elektrycznej	49,43	kWh/kg H ₂
2	Zużycie biomasy	50,13	kg/kg H ₂
		1014	kg/MWh
	Zużycie zrębki drzewnej	912,7	kg/MWh
	Zużycie trocin	101,4	kg/MWh
3	Transport biomasy	152,1	tkm

6.3. Transport wodoru i jego sprężanie

Kolejnym etapem uwzględnionym w analizie cyklu życia wodoru był transport wodoru oraz proces sprężania. Sprężanie wodoru realizowane jest z ciśnienia 30 bar (wyjście z elektrolizera) do 380 bar wymaganego dla transportu w mobilnych magazynach gazowych. Proces ten jest energochłonny i stanowi istotny element łańcucha dostaw wodoru. Zużycie energii elektrycznej w procesie sprężania wynosi 3,5 kWh na 1 kg wodoru. Uwzględniono zużycie energii przez kompresory wielostopniowe oraz układy chłodzenia międzystopniowego.

Transport wodoru z elektrowni do stacji tankowania w miejscu eksploatacji autobusów realizowany jest za pomocą mobilnych magazynów gazowych typu MEGC (ang. Multiple-Element Gas Container), zwanych potocznie wodorowozami lub trailerami wodorowymi. Urządzenia te umożliwiają bezpieczny i wydajny transport sprężonego wodoru w formie gazowej pod wysokim ciśnieniem. Parametry techniczne mobilnego magazynu wodoru przedstawiono w tabeli 18.

Tab. 18. Dane techniczne mobilnego magazynu gazowego

l.p.	Opis	Wartość	Jednostka
1	Pojemność magazynowa	1080	kgH ₂
		1,08	MgH ₂
2	Ciśnienie robocze	380	bar
3	Wymiary naczepy	40	ft
4	Straty magazynowe	1	%
5	Masa całkowita	42	Mg
6	Masa rzeczywista	20	Mg
7	Masa naczepy bez wodoru	18,92	Mg

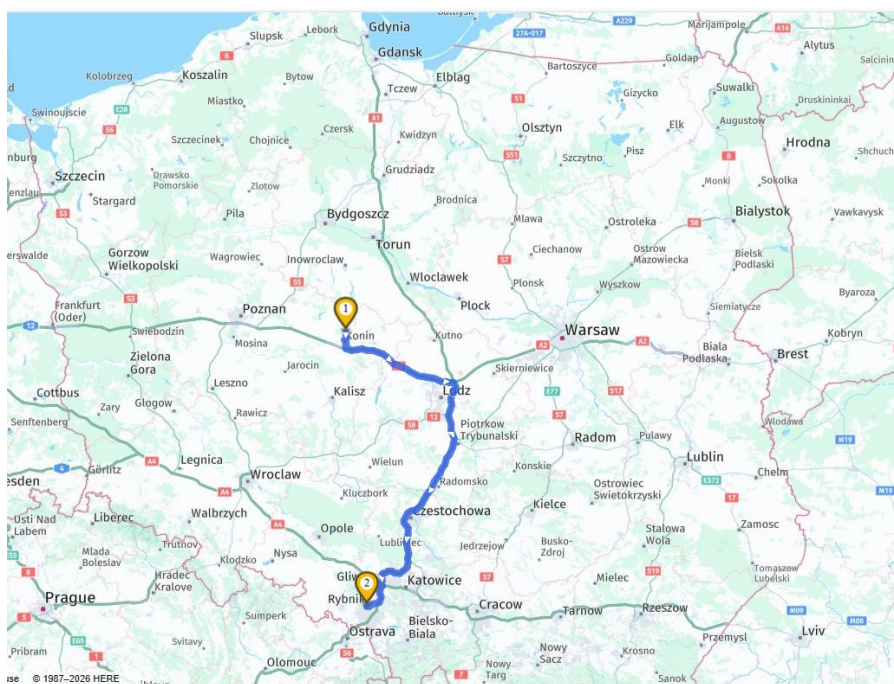
Każdy MEGC jest wyposażony w panel przyłączeniowy zawierający zawory procesowe, manometry oraz zawory bezpieczeństwa, co umożliwia kontrolowany załadunek i rozładunek wodoru w miejscu docelowym (rys. 14).



Rys. 14. Mobilny magazyn wodoru. Widok na część przyłączeniową (po lewej) oraz profil boczny (po prawej)
[Źródło: zdjęcia udostępnione przez elektrownię]

Transport realizowany jest na trasie A–B o długości 370,1 km (w jedną stronę). Trasę wyznaczono dla pojazdów ciężkich za pomocą specjalistycznego oprogramowania Impargo (rys.15). W analizie uwzględniono dwie fazy transportu:

- A–B z pełnym załadunkiem (1080 kg wodoru),
- B–A z pustym zbiornikiem.



Rys. 15. Podgląd trasy transportowej z uwzględnieniem dróg dla pojazdów ciężkich.

Maksymalna pojemność zbiorników magazynowych na stacji tankowania w punkcie B wynosi 400 kg wodoru. Po przybyciu na stację wodorowóz automatycznie zasila zbiorniki stacyjne, a po opróżnieniu cysterny wraca do punktu A po kolejny załadunek. Pracę przewozową przedstawiono w tabeli 19.

Tab. 19. Praca przewozowa wykonana podczas transportu wodoru

l.p.	Opis	Wartość	Jednostka
1	Długość trasy A-B	371,7	km
2	Przewóz Trasa 1 A-B	7434,0	tkm
3	Przewóz Trasa 2 B-A	7032,56	tkm
4	Całkowita praca przewozowa	13,39	tkm/H ₂

Proces uwzględnia etap zużycia oleju napędowego oraz emisje bezpośrednie pojazdu ciężarowego. Produkcję mobilny magazynów gazowych MEGC (naczep wodorowych) pominięto w analizie ze względu na zastosowanie podejścia alokacyjnego. Pojedyncza naczepa obsługuje w okresie swojej żywotności wiele stacji tankowania i odbiorców wodoru w różnych regionach kraju, a jej wkład przypadający na analizowany system (dostawy do jednej stacji) jest marginalny w stosunku do całkowitego przebiegu eksploatacyjnego. Ponadto brak jest

szczegółowych danych inwentaryzacyjnych od producenta dotyczących procesu wytwarzania tych specjalistycznych jednostek.

6.4. Eksploatacja autobusu 12 metrowego z ogniwami paliwowymi

Zgodnie z planem pracy ostatnim etapem eksploatacja autobusu z ogniwami paliwowymi. Komunikacja Miejska w ramach, której tabor jest obiektem badawczym jest jednym z przykładów transformacji flotowej w kierunku niskoemisyjnego i zeroemisyjnego transportu publicznego w Polsce. Autobusy operują w jednym ze średnich miast w województwie Śląskim. W tabeli 20 przedstawiono aktualny tabor wchodzący w jej skład.

W strukturze floty autobusowej obsługującej komunikację miejską znajduje się 36 pojazdów, z których zdecydowana większość reprezentuje technologie niskoemisyjne lub zeroemisyjne. Autobusy z ogniwami paliwowymi stanowią ponad 50 % ogólnej liczby pojazdów. Pojazdy NesoBus 12, wyposażone w ogniwa paliwowe zasilane wodorem oraz napęd elektryczny. Charakteryzują się zerową emisją zanieczyszczeń lokalnych (CO₂, NO_x, PM), a także cichą pracą układu napędowego, co kwalifikuje je do grupy pojazdów spełniających wymagania dla floty zeroemisyjnej zgodnie z ustawą o elektromobilności.

Tab. 20. Aktualny tabor analizowanej komunikacji miejskiej [źródło: dane przedsiębiorstwa]

Nazwa autobusu	Liczba sztuk	Rok produkcji	Rodzaj napędu	Norma Euro
Solaris Urbino 12 IV Hybrid	11	2023	Hybrydowy (olej napędowy + elektryczny)	EURO 6
Solaris Urbino 12 III (2 drzwi)	1	2014	Spalinowy (olej napędowy)	EURO 4
NesoBus 12	20	2023	Wodorowy elektryczny	Nie podlega
Solaris Urbino 12 IV Hybrid	1	2017	Hybrydowy (olej napędowy + elektryczny)	EURO 6
Solaris Urbino 18 IV Hybrid PLUG-IN	1	2019	Hybrydowy (olej napędowy + elektryczny)	EURO 6
Solaris Urbino 18 III Hybrid	1	2014	Hybrydowy (olej napędowy + elektryczny)	EURO 6
Solaris Urbino 18 IV Hybrid	1	2017	Hybrydowy (olej napędowy + elektryczny)	EURO 6
Razem	36	-	-	

Dane techniczne autobusu z ogniwami paliwowymi zestawiono w tabeli 21. Pojazd jest przedstawiony na rysunku 16.

Tab. 21. Dane techniczne autobusu Nesobus [źródło: dane producenta]

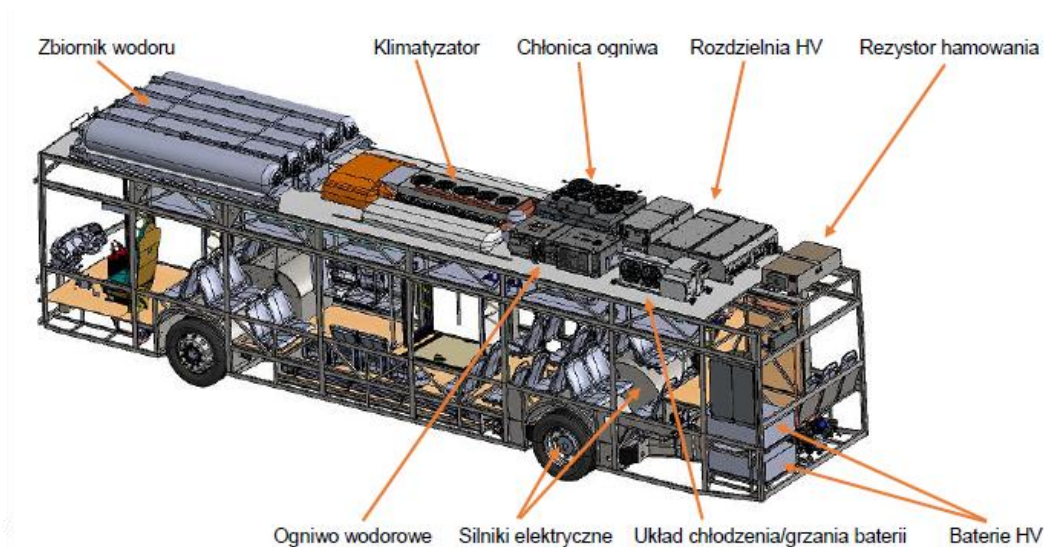
Parametr	Wartość
Marka	Nesobus
Typ autobusu	12 m
Klasa autobusu	Miejski
Rok produkcji	2023
Długość	11 950 mm
Dopuszczalna masa całkowita (techniczna)	19 500 kg
Masa własna	13 000 kg (11 500kg)
Deklarowany zasięg przy pełnym zbiorniku	450 km
Pojemność akumulatora	2 × 15,2 kWh
Rodzaj akumulatora	LTO (litowo-tytanowo-tlenkowy)
Silnik trakcyjny	2 × 125 kW (w piastach osi tylnej, ZF)
Ogniwo paliwowe	Ballard FCmove-HD
Moc max. ogniwa	70 kW
Liczba miejsc dla pasażerów	93 (w tym 37 siedzących)
Zbiorniki wodoru	
Producent	Hexagon
Typ	IV (kompozytowe)
Liczba butli	5 szt. x 312 l
Ciśnienie robocze	350 bar
Pojemność układu	37,5 kg



Rys. 16. Autobus wodorowy Nesobus 12 [źródło: materiały własne]

Rysunek 17 przedstawia rozmieszczenie kluczowych komponentów technicznych autobusu z ogniwami paliwowymi NesoBus 12, w tym:

- Zbiorniki wodoru (37,5 kg / 350 bar) zostały zainstalowane na dachu pojazdu i pełnią funkcję magazynu paliwa dla ogniwa paliwowego.
- Ogniwo wodorowe (70 kW) zlokalizowane w przedniej części pojazdu, wytwarza energię elektryczną w wyniku reakcji elektrochemicznej utleniania wodoru, zachodzącej bezpośrednio w ogniwie.
- Silniki elektryczne (2×125 kW) zintegrowane z piastami kół tylnej osi, zamieniają energię elektryczną na mechaniczną, zapewniając bezpośredni napęd pojazdu
- Akumulatory trakcyjne ($2 \times 15,2$ kWh) pełnią funkcję bufora energetycznego oraz wspomagają pracę układu napędowego w stanach przejściowych.
- Rozdzielnia wysokiego napięcia (HV) odpowiada za zarządzanie i dystrybucję energii elektrycznej pomiędzy ogniwem paliwowym, bateriami oraz silnikami trakcyjnymi.
- Rezystor hamowania odpowiada za odprowadzanie nadmiaru energii elektrycznej powstającej podczas hamowania rekuperacyjnego, przekształcając ją w energię cieplną.
- Układ chłodzenia, obejmujący chłodnicę ogniwa paliwowego oraz system chłodzenia baterii, zapewnia utrzymanie optymalnych warunków temperaturowych pracy komponentów wysokiego napięcia.
- Układ klimatyzacji z pompą ciepła zapewnia regulację temperatury w przestrzeni pasażerskiej.

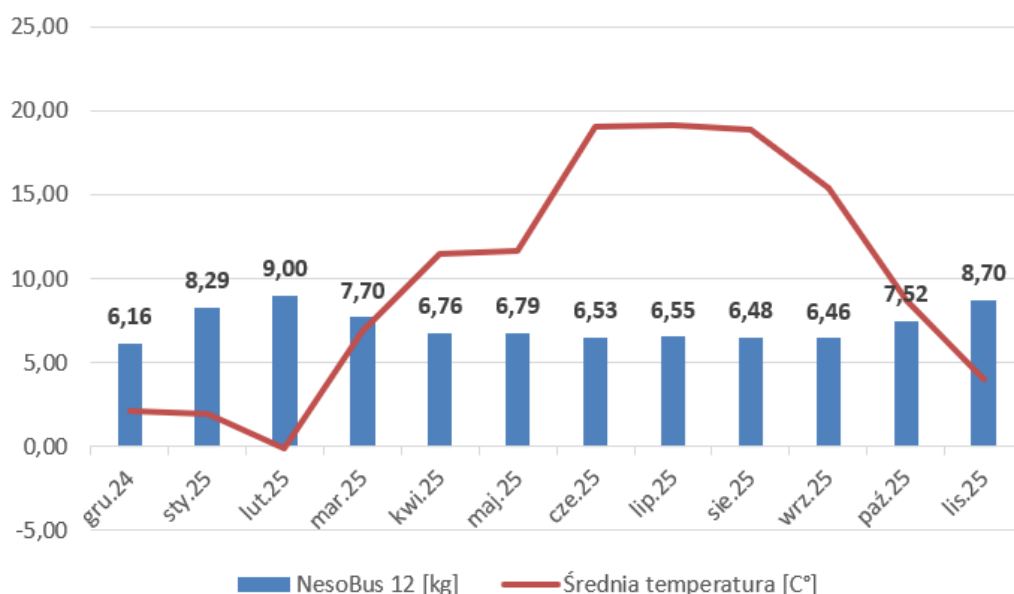


Rys. 17. Schemat budowy autobusu NesoBus. [źródło: materiały producenta]

W ramach badań zebrane zostały dane eksploatacyjne autobusu z ogniwami paliwowymi NesoBus 12. Dane objęły zużycie paliwa w okresie dwunastu miesięcy- od grudnia 2024 r. do listopada 2025 r. W tabeli 22 przedstawiono uśrednione wyniki zużycia paliwa dla poszczególnych miesięcy. Dodatkowo przeprowadzono analizę korelacji ze średnią temperaturą miesięczną. Dane zebrano ze stacji pogodowej [129]. Zaobserwowano, że zużycie wodoru wyraźnie wzrasta w okresie zimowym, co szczególnie widać na rysunku 18. Różnica pomiędzy najzimniejszym miesiącem (luty 2025) a najcieplejszymi miesiącami (czerwiec–lipiec 2025) wynosi około 2,5 l.

Tab. 22. Zużycie wodoru w zależności od miesiąca i temperatury.

Miesiąc	Zużycie paliwa NesoBus 12 [kg]	Tankowanie [kg]	Średnia temperatura [C°]
gru.24	6,16	3768,27	2,1
sty.25	8,29	6219,58	1,9
lut.25	9,00	6910,58	-0,1
mar.25	7,70	7003,42	6,8
kwi.25	6,76	6049,3	11,5
maj.25	6,79	6 009,28	11,7
cze.25	6,53	5 619,6	19,1
lip.25	6,55	5 591	19,1
sie.25	6,48	4 444,03	18,9
wrz.25	6,46	5 720,33	15,4
paź.25	7,52	6 735,66	8,7
lis.25	8,70	6 419,44	4,0
Średnie zużycie roczne	7,24	70 490,23	-



Rys. 18. Zużycie wodoru w zależności od miesiąca i temperatury.

Istotną kwestią są również parametry techniczne samego paliwa jakim jest wodór. Wodór charakteryzuje się wartością opałową wynoszącą 120 MJ/kg, przy zerowej emisji bezpośredniej CO₂ (tab.23).

W tabeli 24 przedstawiono również obliczenia zużycia energii w cyklu Tank-to-Wheel (TTW). Cykl TTW obejmuje zużycie energii oraz emisje bezpośrednie generowane w fazie eksploatacji pojazdu, od momentu konwersji paliwa do energii mechanicznej napędzającej pojazd. Zużycie energii w fazie TTW zostało wyznaczone jako iloczyn wartości opałowej wodoru (120 MJ/kg) [54] oraz średniego zużycia paliwa przez autobus NesoBus 12 wynoszącego 0,00207 kg/pkm, co daje wartość 0,248 MJ/pkm. Zerowe emisje CO₂ w fazie użytkowania pojazdu wynikają z reakcji elektrochemicznej zachodzącej w ogniwie paliwowym, której jedynym produktem jest para wodna. Parametry przeliczono na 1 pasażerokilometr.

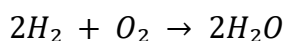
Tab. 23. Podstawowe parametry techniczne wodoru [54]

Paliwo	Wartość opałowa (MJ/kg)	Wartość opałowa (GJ/kg)	Wartość Emisji CO ₂ (kg/GJ)	Wartość Emisji CO ₂ (CO ₂ /kg)
Wodór	120,00	-	0,00	0,00

Tab. 24. Parametry eksploatacyjne i emisyjne autobusu wodorowego NesoBus 12 w przeliczeniu na 1 pkm

Rodzaj Pojazdu	Średnie zużycie paliwa [kg/100km]	Średnie zużycie paliwa [kg/1km]	Średnie zużycie paliwa [kg/pkm]	Zużycie energii w cyklu TTW (MJ/pkm)	Emisje CO ₂ w cyklu TTW (kg CO ₂ /pkm)	Emisje CO ₂ w cyklu TTW (g CO ₂ /pkm)
NesoBus 12	7,24	0,07	0,00207	0,248	0,00	0,0

W fazie użytkowania autobusu z ogniwem paliwowym, brak jest emisji bezpośrednich, a jedynym produktem ubocznym reakcji elektrochemicznej zachodzącej w ogniwie paliwowym PEM jest para wodna. Reakcja ta przebiega zgodnie z równaniem:



Na podstawie przeliczenia masowego stwierdzono, że 1 kg wodoru prowadzi do powstania 9 kg pary wodnej, co wynika ze stosunku mas molowych:

$$2 \text{ mole } H_2 = 4 \text{ g wodoru}$$

$$2 \text{ mole } H_2O = 36 \text{ g wody}$$

a zatem:

$$\frac{36 \text{ g } H_2O}{4 \text{ g } H_2} = 9,$$

czyli

$$1 \text{ kg } H_2 \rightarrow 9 \text{ kg } H_2O$$

W przeliczeniu na jednostkę funkcjonalną przyjętą w analizie, emisja pary wodnej wynosi 0,0186 kg/pkm, co obliczono jako iloczyn zużycia wodoru (0,00207 kg H_2 /pkm) oraz współczynnika stechiometrycznego (9 kg H_2O /kg H_2). Para wodna nie jest klasyfikowana jako zanieczyszczenie atmosferyczne i nie wpływa na wyniki oceny środowiskowej w fazie eksploatacji analizowanego autobusu.

6.5. Wyniki analizy cyklu życia wodoru jako paliwa alternatywnego

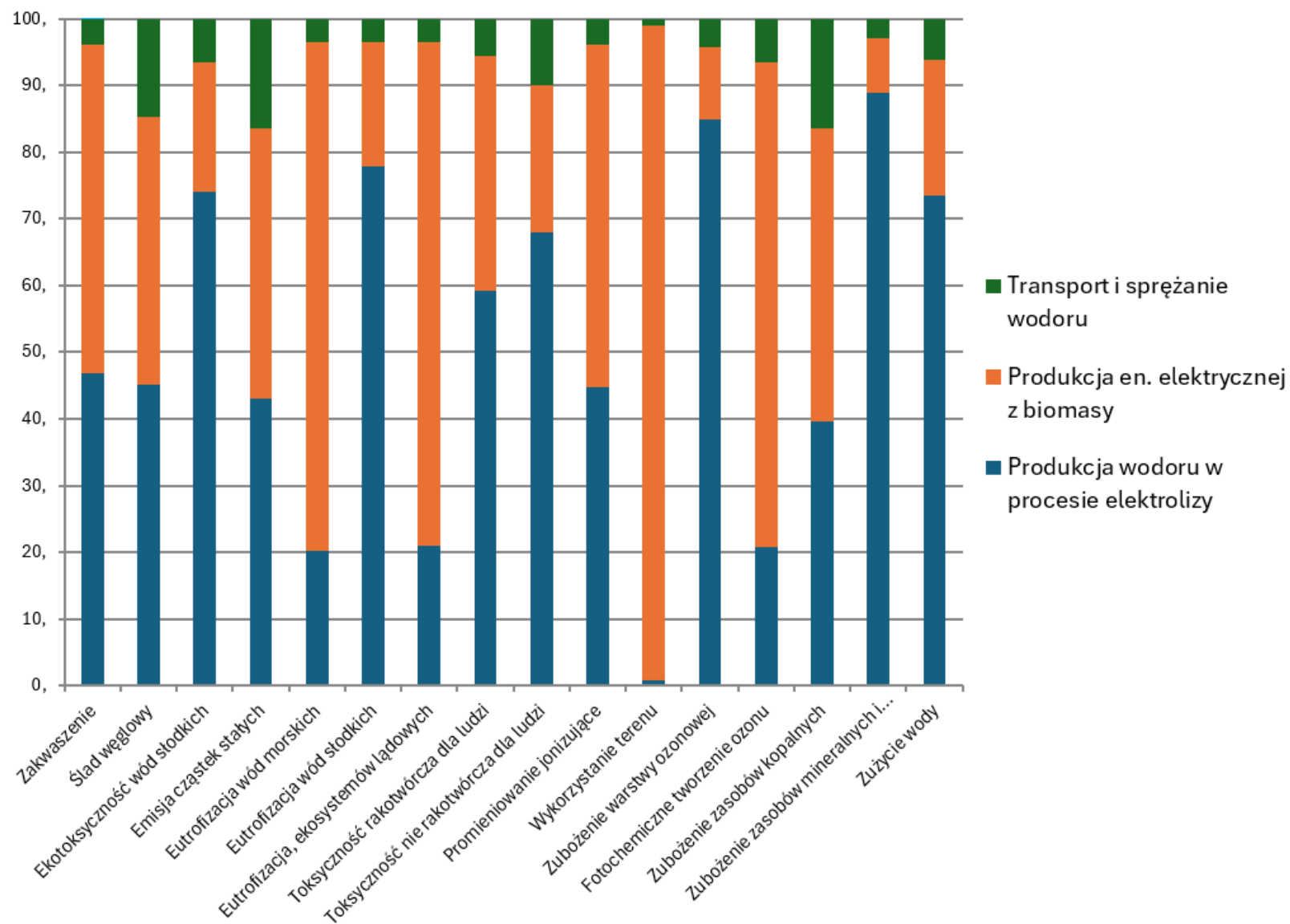
W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki analizy cyklu życia wodoru uwzględniając etapy:

- a. produkcji energii elektrycznej ze spalania biomasy,
- b. produkcji wodoru w procesie elektrolizy,
- c. transport wodoru i jego sprężanie
- d. eksploatację autobusu 12 metrowego z ogniwami paliwowymi.

Do analizy wykorzystano przedstawione w rozdziałach 6.1- 6.4 dane i przeliczono je na jednostkę funkcjonalną 1pkm (pasażerokilometr). Wyniki przedstawiono w podziale na dwa etapy (ocenę szkód oraz normalizację), co pozwala wskazać procesy o największym wpływie na środowisko. Wyniki poszczególnych etapów zaprezentowano w tabelach 25–26 oraz na 19-20 rysunkach

Tab.25. Wyniki oddziaływania środowiskowego w cyklu życia paliwa

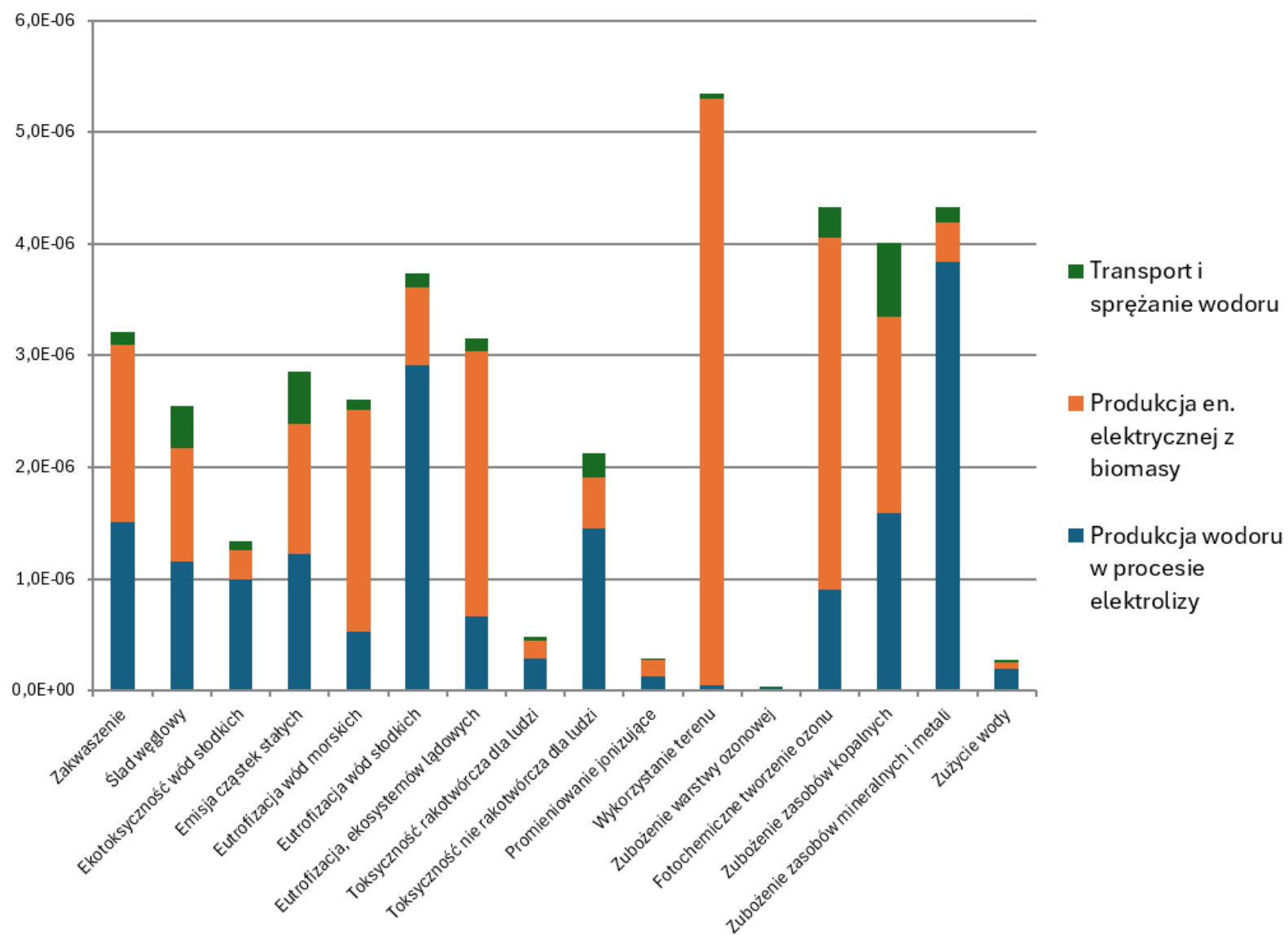
Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	Produkcja wodoru w procesie elektrolizy	Produkcja en. elektrycznej z biomasy	Transport i sprężanie wodoru
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	0,000179	8,38E-5	8,79E-5	6,86E-6
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	0,0192	0,00869	0,0077	0,00282
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	0,0762	0,0564	0,0148	0,00501
Emisja cząstek stałych	disease inc.	1,7E-9	7,31E-10	6,9E-10	2,8E-10
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	5,09E-5	1,02E-5	3,89E-5	1,8E-6
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	6,01E-6	4,68E-6	1,12E-6	2,06E-7
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,000557	0,000117	0,00042	1,95E-5
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	CTUh	8,25E-12	4,89E-12	2,89E-12	4,66E-13
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	CTUh	2,74E-10	1,86E-10	6,02E-11	2,74E-11
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	0,00121	0,000543	0,000623	4,79E-5
Wykorzystanie terenu	Pt	4,38	0,0361	4,3	0,043
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	1,48E-9	1,26E-9	1,6E-10	6,4E-11
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,000177	3,68E-5	0,000129	1,15E-5
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	0,261	0,103	0,115	0,0428
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	2,75E-7	2,45E-7	2,24E-8	8,21E-9
Zużycie wody	m ³ depriv.	0,00314	0,0023	0,000639	0,000194



Rys. 19. Wyniki oddziaływania środowiskowego w cyklu życia paliwa.

Tab. 26. Wyniki normalizacji w cyklu życia paliwa

Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	Produkcja wodoru w procesie elektrolizy	Produkcja en. elektrycznej z biomasy	Transport i sprężanie wodoru
Zakwaszenie	-	3,21E-6	1,51E-6	1,58E-6	1,23E-7
Ślad węglowy	-	2,54E-6	1,15E-6	1,02E-6	3,74E-7
Ekotoksyczność wód słodkich	-	1,34E-6	9,94E-7	2,6E-7	8,84E-8
Emisja cząstek stałych	-	2,86E-6	1,23E-6	1,16E-6	4,7E-7
Eutrofizacja wód morskich	-	2,6E-6	5,24E-7	1,99E-6	9,23E-8
Eutrofizacja wód słodkich	-	3,74E-6	2,91E-6	6,97E-7	1,28E-7
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	3,15E-6	6,61E-7	2,38E-6	1,1E-7
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	4,78E-7	2,83E-7	1,67E-7	2,7E-8
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	2,13E-6	1,45E-6	4,67E-7	2,13E-7
Promieniowanie jonizujące	-	2,88E-7	1,29E-7	1,48E-7	1,14E-8
Wykorzystanie terenu	-	5,35E-6	4,41E-8	5,25E-6	5,25E-8
Zubożenie warstwy ozonowej	-	2,83E-8	2,4E-8	3,06E-9	1,22E-9
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	4,33E-6	9,01E-7	3,15E-6	2,81E-7
Zubożenie zasobów kopalnych	-	4,01E-6	1,59E-6	1,76E-6	6,58E-7
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	4,33E-6	3,84E-6	3,53E-7	1,29E-7
Zużycie wody	-	2,73E-7	2,01E-7	5,57E-8	1,7E-8



Rys.20 Wyniki normalizacji w cyklu życia paliwa

Uzyskane wyniki analizy cyklu życia wodoru wskazują, że największy wpływ na środowisko w całym łańcuchu cyklu życia paliwa mają produkcja energii elektrycznej z biomasy oraz produkcja wodoru w procesie elektrolizy. Etapy te odpowiadają za większość oddziaływań środowiskowych w prawie wszystkich analizowanych kategoriach. Na etapie eksploatacji brak jest emisji bezpośrednich. Wynika to z faktu, że w ogniwie paliwowym produktem reakcji jest jedynie para wodna.

Produkcja wodoru w procesie elektrolizy ma największy udział między innymi w kategoriach „zubożenia warstwy ozonowej” (ang. Ozone depletion) około 85%, „toksyczności rakotwórczej dla ludzi” (ang. Human toxicity, cancer) około 59% oraz „zużycia zasobów mineralnych i metali” (ang. Resource use, minerals and metals) około 89%. Wynika to głównie z wysokiego zużycia energii elektrycznej i wody w tym procesie. Istotny wpływ mają również materiały stosowane do budowy elektrolizera, w tym metale szlachetne, takie jak platyna.

Wpływ produkcji energii elektrycznej z biomasy jest najwyższy w kategoriach związanych z „użytkowaniem terenu” (ang. Land use), gdzie jej udział przekracza 98%, oraz „eutrofizacją mórz” (ang. Eutrophication, marine) około 76%. Wysoki udział w kategorii użytkowania ziemi wynika z powierzchni potrzebnej pod uprawę drzew przeznaczonych na biomasę w postaci zrębki drzewnej i trocin. Emisje CO₂ ze spalania biomasy mają charakter biogeniczny, co oznacza, że nie są uwzględniane w końcowym bilansie emisji dwutlenku węgla. Mimo to wykorzystanie biomasy powoduje istotne oddziaływania w kategoriach eutrofizacji oraz użytkowania gruntów, co stanowi jej główne ograniczenie środowiskowe.

Transport i sprężanie wodoru mają najmniejszy udział w całkowitym wpływie środowiskowym. Ich znaczenie jest widoczne głównie w kategorii „śladu węglowego” (ang. Climate change) około 15% oraz zużycia paliw kopalnych. Wynika to z wykorzystania energii do sprężania wodoru do ciśnienia 350 bar oraz emisji związanych z jego transportem do stacji tankowania.

7. Analiza LCA autobusu z ogniwami paliwowymi

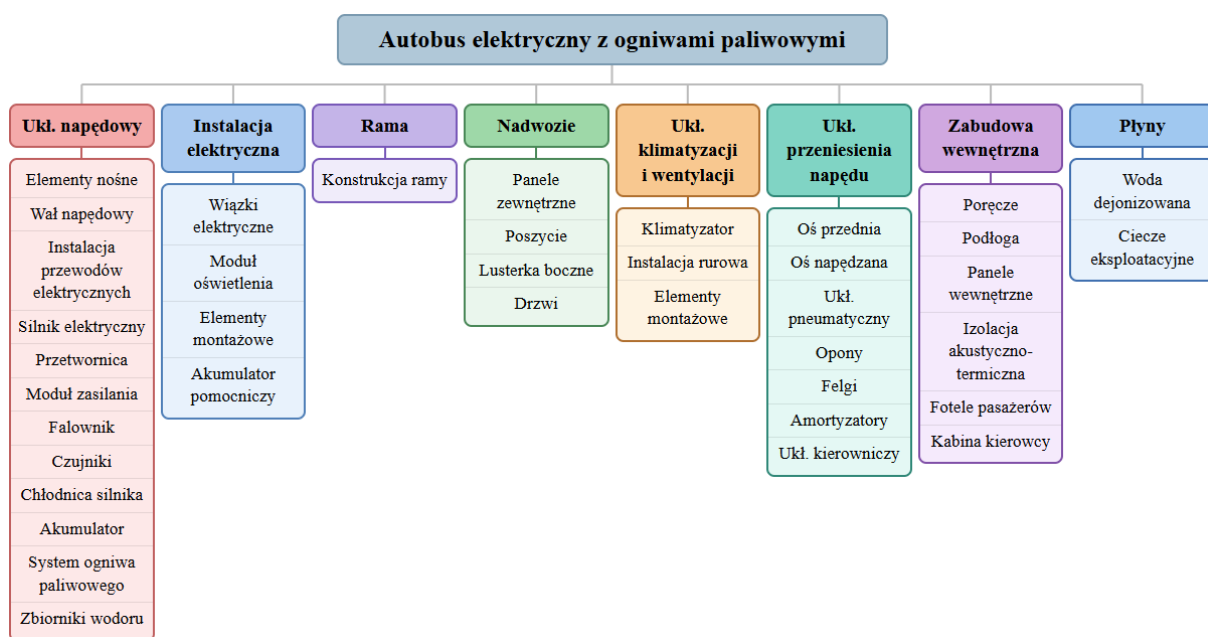
7.1. Inwentaryzacja danych i struktura podzespołów

Na potrzeby niniejszej analizy LCA pojazdu opracowano model inwentaryzacyjny autobusu z ogniwami paliwowymi klasy 12 m. Szczegółową charakterystykę techniczną modelowanego pojazdu przedstawiono w tabeli 27.

Tab. 27 Specyfikacja techniczna modelowanego autobusu.

Specyfikacja	Dane
Klasa pojazdu	Autobus miejski 12 m
Długość całkowita	11 950 mm
Masa własna	12 600 kg
Liczba miejsc pasażerskich	99
Deklarowany zasięg	450 km
Ogniwo paliwowe	Typ PEM, moc maks. 70 kW
Silnik trakcyjny	2 × 125 kW (napęd na oś tylną)
Pojemność baterii trakcyjnej	29,2 kWh (LTO)
Typ zbiorników wodoru	Kompozytowe typ IV
Liczba zbiorników	5 szt. × 312 l
Ciśnienie robocze zbiorników	350 bar
Całkowita pojemność układu H ₂	37,5 kg

Model pojazdu podzielono na osiem głównych podzespołów, których strukturę hierarchiczną przedstawiono na rysunku 21. Podział ten odzwierciedla rzeczywistą architekturę pojazdu i umożliwił systematyczne przypisanie danych materiałowych do poszczególnych układów funkcjonalnych. W ramach układu napędowego wyróżniono m.in. system ogniwa paliwowego, zbiorniki wodoru, silnik elektryczny, falownik oraz akumulator trakcyjny. Układ przeniesienia napędu obejmował osie, opony, felgi, amortyzatory oraz układ kierowniczy, natomiast nadwozie uwzględniało panele zewnętrzne, poszycie, lusterka boczne oraz drzwi.



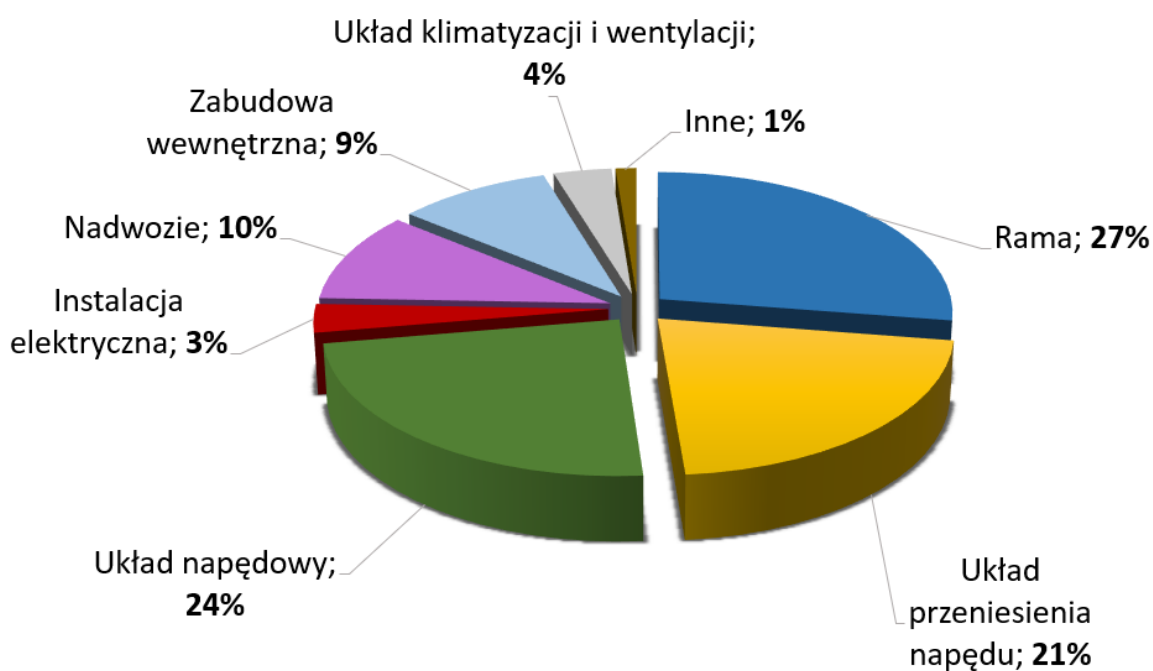
Rys. 21 Struktura podzespołów autobusu wraz z podziałem na układy funkcjonalne.

Zebrane dane obejmowały ponad 300 różnych materiałów, przy czym ze względu na poufny charakter danych źródłowych, szczegółowe zestawienie nie może zostać w pełni ujawnione w niniejszej rozprawie.

Łączna masa własna modelowanego autobusu wyniosła 12 588,58 kg, co jest wartością zbliżoną w 99,9% do masą własną pojazdu klasy 12 m deklarowanej przez jednego z producentów. Najwyższy udział masowy stanowiła rama konstrukcyjna, wynik wyniósł 3 496,15 kg, co odpowiadało 28% masy własnej pojazdu. Kolejnym istotnym podzespołem pod względem masy był układ napędowy, a jego wartość wyniosła 2 852,02 kg (23%). Masa ta związana jest przede wszystkim z wykorzystaniem systemu ogniwa paliwowego, zbiorników wodoru oraz akumulatorów trakcyjnych. Udział układu przeniesienia napędu w strukturze autobusu wyniósł 22%, a masa wyniosła 2 714,35 kg. Pozostałe podzespoły tj. nadwozie, zabudowa wewnętrzna, układ klimatyzacji i wentylacji oraz instalacja elektryczna łącznie stanowiły około 27% masy własnej pojazdu. Zestawienie mas poszczególnych podzespołów przedstawiono w tabeli 28, a procentowy udział zobrazowano na rysunku 22.

Tab. 28. Podział masowy podzespołów autobusu z ogniwami paliwowymi

Podzespół	Masa [kg]	Udział masowy [%]
Rama	3496,15	28%
Układ przeniesienia napędu	2714,35	22%
Układ napędowy	2852,02	23%
Nadwozie	1313,97	10%
Zabudowa wewnętrzna	1188,84	9%
Układ klimatyzacji i wentylacji	447,12	4%
Instalacja elektryczna	415,22	3%
Inne	160,90	1%
Łącznie	12588,58	100%

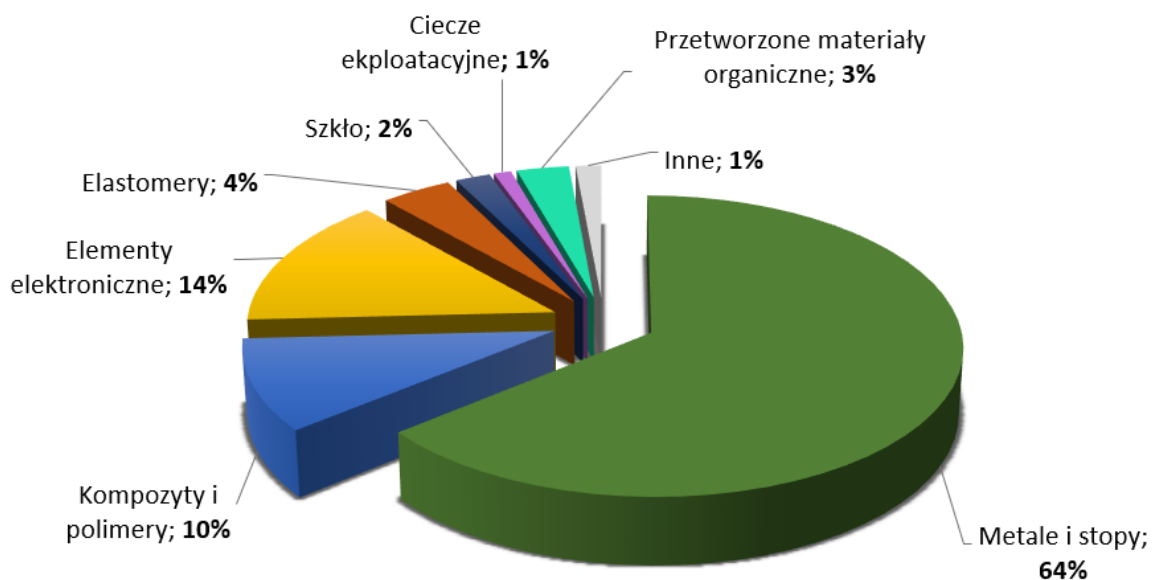


Rys. 22. Procentowy udział podzespołów autobusu z ogniwami paliwowymi.

Uproszczoną strukturę materiałową modelowanego autobusu przedstawiono w tabeli 29 oraz na rysunku 23. Dodatkowo zestawienie wybranych materiałów konstrukcyjnych o najwyższym udziale masowym umieszczono w tabeli 30 oraz rysunku 24.

Tabela 27. Zestawienie grup materiałowych modelowanego autobusu

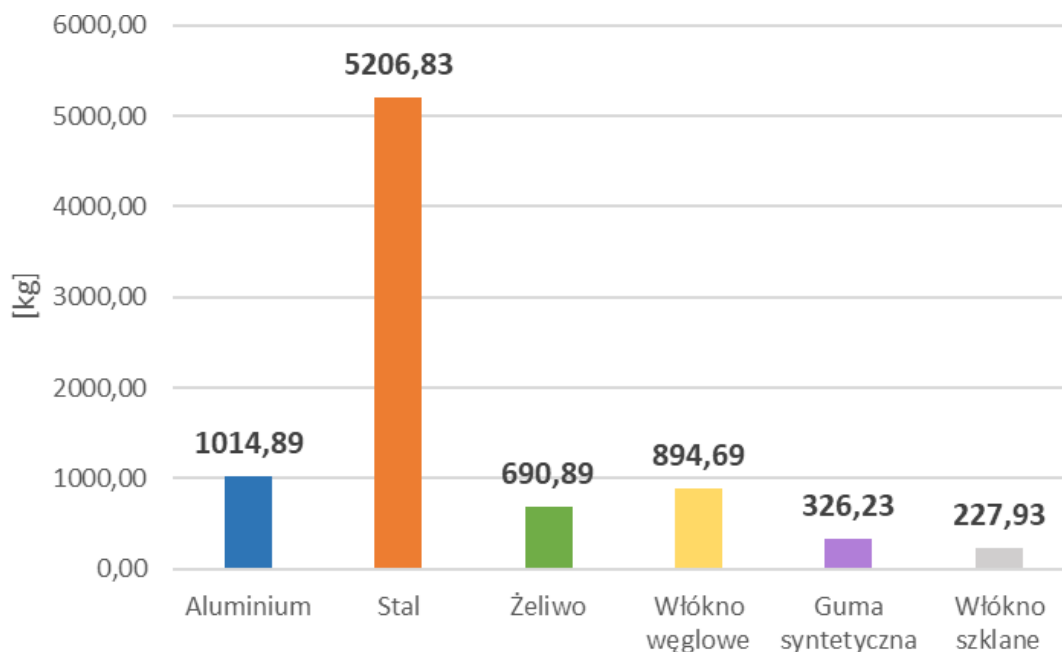
Grupa materiałów	Masa [kg]	Udział masowy [%]
Metale i stopy	7655,72	64%
Elementy elektroniczne	1696,47	14%
Kompozyty i polimery	1096,26	9%
Elastomery	487,42	4%
Szkło	241,22	2%
Ciecze eksploatacyjne	174,88	1%
Przetworzone materiały organiczne	170,72	1%
Inne	59,59	1%



Rys 23. Procentowy udział grup materiałowych w modelowanym autobusie

Tabela 30. Zestawienie masowe wybranych materiałów konstrukcyjnych autobusu

Material	Masa [kg]
Stal	5206,83
Aluminium	1014,89
Włókno węglowe	739,69
Żeliwo	690,89
Guma syntetyczna	326,23
Włókno szklane	227,93



Rys 24. Zestawienie masowe wybranych materiałów konstrukcyjnych autobusu

Najwyższy udział w strukturze autobusu miały metale i ich stopy (64%). W skład metali wchodziły materiały o najwyższym udziale tj:

- Stal i stopy stali (5206,83 kg)- ponad 60% stali zostało przeznaczonych na ramę konstrukcyjną pojazdu;
- Aluminium i stopy aluminium (1014,89 kg)- zostały wykorzystane głównie do budowy m.in.: elementów układu napędowego, poszycia pojazdu oraz elementów wnętrza pojazdu;
- Żeliwo (690,89kg)- stanowiło materiał, głównie wchodzący w skład elementów osi napędowych.

Drugą pod względem udziału masowego grupą materiałową były elementy elektroniczne 14% (1 696,47 kg). Wynika to z rozbudowanego systemu ogniwa paliwowego oraz układu elektrycznego. Kolejną grupą materiałowe są kompozyty i polimery (9%), na które składały się:

- Włókno węglowe (739,69 kg)- jest głównym materiałem, z którego zbudowane są zbiorniki na wodór typu IV;
- Włókno szklane (227,93 kg)- stanowiło materiał, który wchodził głównie w skład poszycia pojazdu oraz foteli pasażerów.

Elastomery stanowiły udział 4% w budowie pojazdu. W jego skład wchodziła w większości guma syntetyczna wykorzystywana, w szczególności jako element instalacji rurowej oraz składnik opon.

Grupami o najniższym udziale były:

- Szkło (2%; 241,22kg)
- Ciecze eksploatacyjne (1%; 174,88kg) - np. płyny chłodzące;
- Przetworzone materiały organiczne (1%; 170,72kg) - np. płyty wiórowe.

Materiały niesklasyfikowane do żadnej z grup zaliczono jako „Inne”, a ich udział wyniósł 59,59kg.

Do modelowania cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi wykorzystano oprogramowanie SimaPro, przy użyciu bazy danych Ecoinvent 3 w wersji „cut-off”. W modelu cut-off materiały z recyklingu traktowane są jako wolne od obciążeń środowiskowych związanych z ich poprzednim użyciem, a odpowiedzialność środowiskową za wytworzenie odpadów ponosi ich producent [118]. W konsekwencji, w niniejszym modelu nie przypisano żadnych kredytów środowiskowych za odzysk materiałów na etapie utylizacji pojazdu. W ramach modelowania, dla każdego materiału, uwzględniono procesy produkcyjne i przetwórcze odpowiadające danemu materiałowi lub komponentowi, a także procesy transportowe związane z dostawą materiałów. Granice systemu dla etapu produkcji pojazdu obejmują procesy od pozyskania surowców do wytworzenia gotowego elementu.

W niniejszej rozprawie przyjęto jednostkę funkcjonalną, którą jest 1 pasażerokilometr (pkm) oraz średnie obłożenie pojazdu, które wyniosło 35 pasażerów. W celu przeliczenia składu materiałowego pojazdu oraz etapu utylizacji na przyjętą jednostkę funkcjonalną, uwzględniono również całkowity przebiegu pojazdu w całym cyklu życia. Wartości przyjęte do obliczenia jednostki funkcjonalnej przedstawiono w tabeli 31.

Tabela 31. Żywotność pojazdu oraz całkowita praca przewozowa

Liczba pasażerów	Przebieg roczny [km/rok]	Żywotność pojazdu	Całkowity przebieg [km]	Całkowita praca przewozowa [pkm]
35	80 000	10 lat	800 000	28 000 000

Całkowity przebieg pojazdu, który wynosi 800 000 km został przyjęty na podstawie wytycznych PCR 2016:04 (Product Category Rules) [119] i jest zgodny z Dyrektywą 2009/33/WE [105]. Dyrektywa ta określa wartości przebiegu dla autobusów miejskich,

stosowane przy ocenie oddziaływania pojazdu na środowisko w cyklu życia. Całkowitą pracę przewozową obliczono jako iloczyn całkowitego przebiegu pojazdu i przyjętej liczby pasażerów:

$$800\,000\text{ km} \times 35\text{ pasażerów} = 28\,000\,000\text{ pkm}$$

Następnie, aby odnieść proces produkcji jednej sztuki pojazdu do jednostki funkcjonalnej 1 pkm, wyznaczono współczynnik skalowania. Współczynnik ten obliczono jako odwrotność iloczynu całkowitej pracy przewozowej, co przedstawia poniższy wzór:

$$\frac{1}{(800\,000\text{ km} \times 35\text{ pasażerów})} = 3,57 \times 10^{-8}\text{ p/pkm}$$

gdzie

$$p - 1\text{ sztuka pojazdu}$$

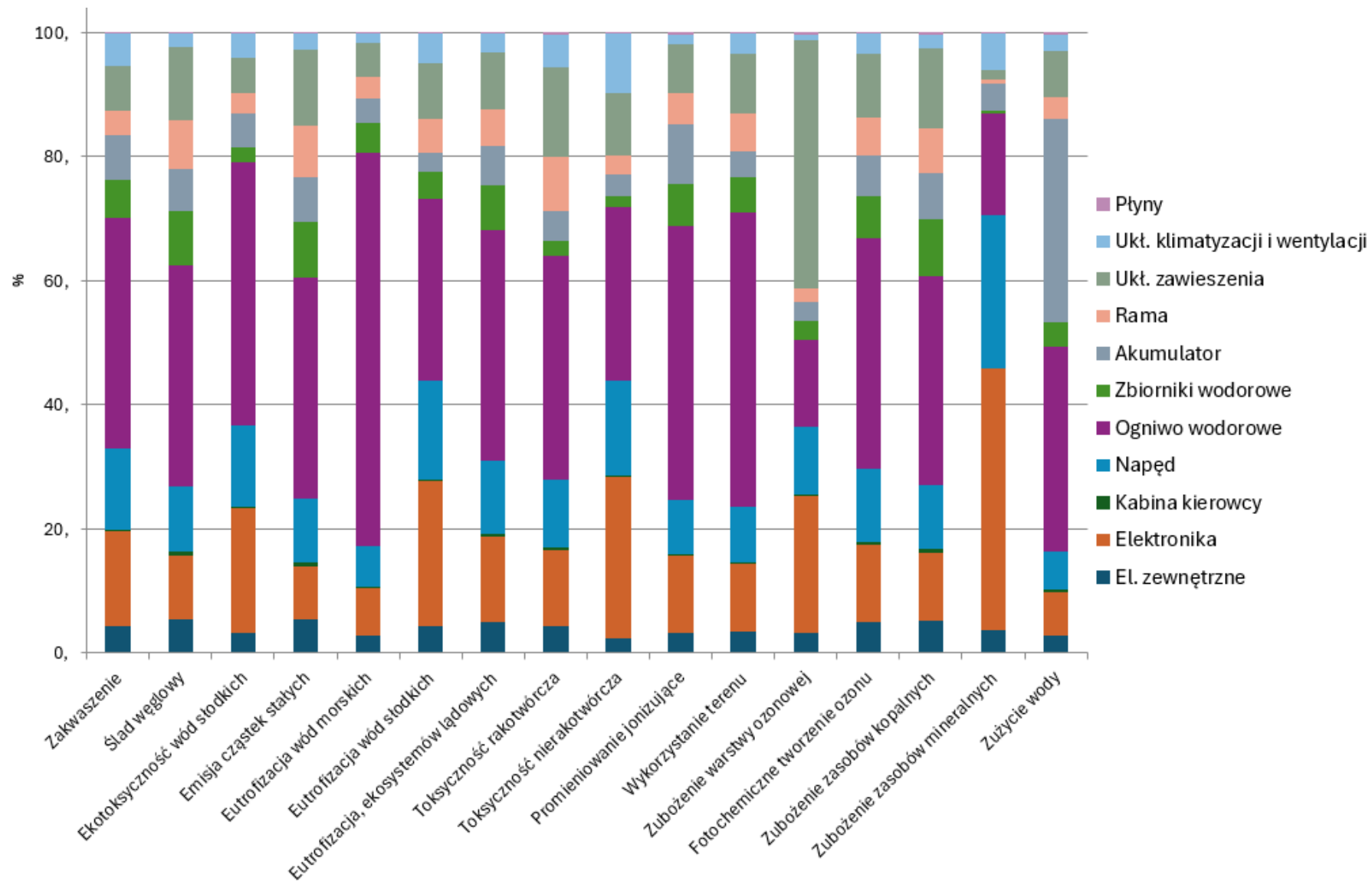
Wartość tę wprowadzono jako ilość procesu produkcji pojazdu w modelu LCA, skalując tym samym cały skład materiałowy do poziomu jednostki funkcjonalnej.

7.2. Wyniki oceny wpływu produkcji autobusu z ogniwami paliwowymi

W kolejnej części pracy przedstawiono wyniki oceny wpływu środowiskowego etapu produkcji autobusu z ogniwami paliwowymi. Wyniki zaprezentowano w podziale na podzespoły pojazdu, co umożliwia identyfikację komponentów o największym obciążeniu środowiskowym oraz wskazanie kluczowych obszarów, w których możliwa jest redukcja wpływu środowiskowego produkcji pojazdu. Wyniki poszczególnych etapów analizy przedstawiono w tabelach 32–33 oraz na rysunkach 25–26.

Tab. 32. Wyniki oddziaływania środowiskowego produkcji autobusu z ogniwami w podziale na podzespoły

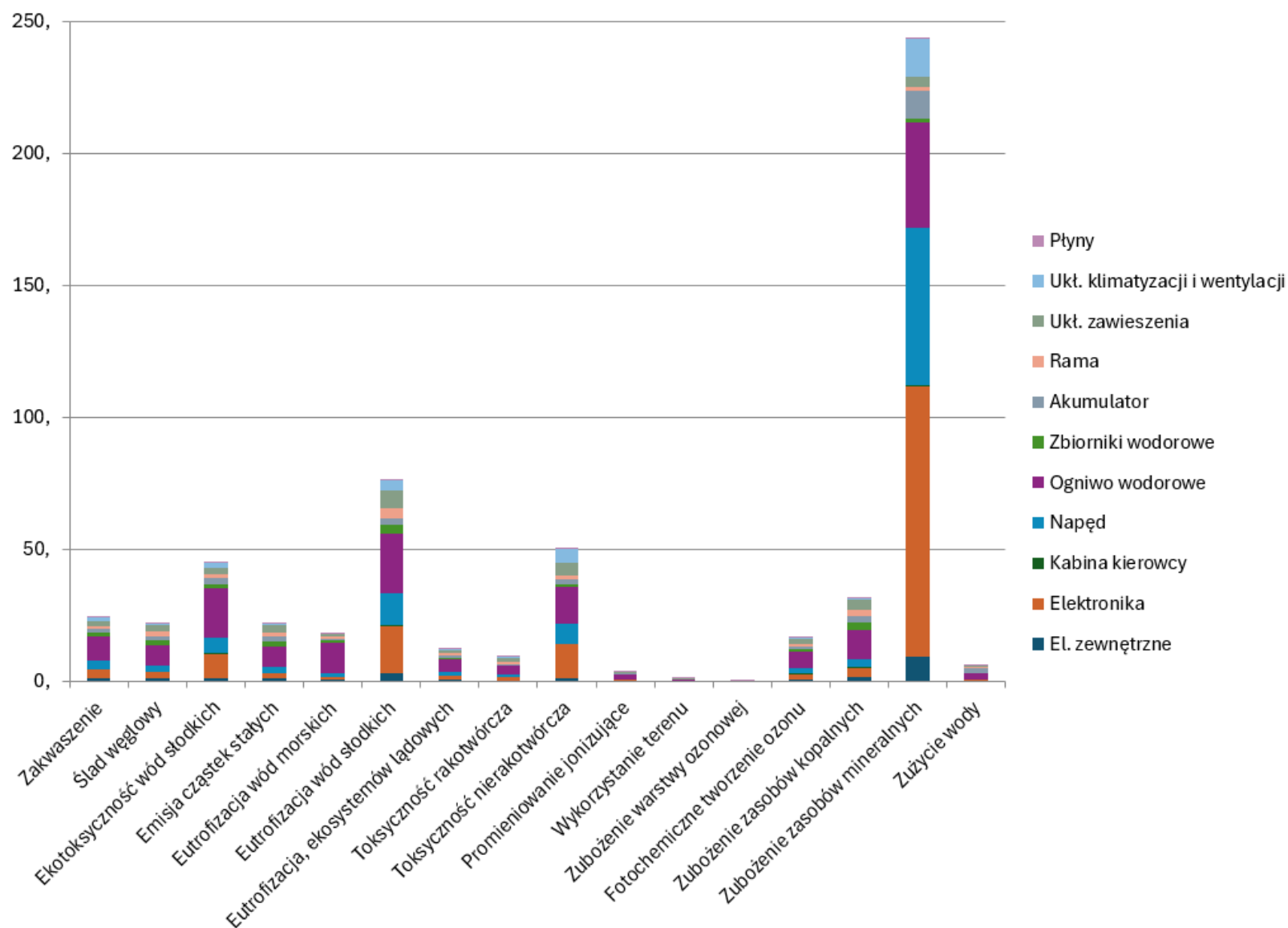
Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	El. zewnętrzne	Elektronika	Kabina kierowcy	Napęd	Ogniwo wodorowe	Zbiorniki wodorowe	Akumulator	Rama	Ukl. zawieszenia	Ukl. klimatyzacji i wentylacji	Płyny
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	1,34E3	59,8	202	3,98	176	497	82,8	95,6	54,8	95,5	70,4	0,991
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	1,66E5	9,22E3	1,7E4	891	1,75E4	5,92E4	1,45E4	1,12E4	1,31E4	1,96E4	3,5E3	293
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	2,55E6	8,32E4	5,15E5	5,32E3	3,3E5	1,08E6	6,27E4	1,4E5	8,29E4	1,46E5	9,83E4	2,51E3
Emisja cząstek stałych	disease inc.	0,0131	0,00072	0,00112	6,06E-5	0,00135	0,00467	0,00118	0,000941	0,00109	0,00162	0,000349	6,61E-6
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	357	10,5	26,6	0,838	23,3	227	16,7	14,3	12,6	19,3	5,69	0,255
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	123	5,42	28,5	0,321	19,5	36,1	5,31	3,75	6,54	11	6,04	0,0942
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	2,14E3	108	295	7,97	253	798	152	138	124	196	67,8	2,37
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	CTUh	0,000159	6,92E-6	1,95E-5	6,22E-7	1,74E-5	5,75E-5	3,93E-6	7,54E-6	1,38E-5	2,3E-5	8,42E-6	5,89E-7
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	CTUh	0,00644	0,00016	0,00167	9,44E-6	0,000987	0,00181	0,000114	0,000221	0,000199	0,000648	0,000624	2,8E-6
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	1,57E4	509	1,95E3	45	1,37E3	6,95E3	1,07E3	1,55E3	773	1,22E3	274	35,9
Wykorzystanie terenu	Pt	9,11E5	3,21E4	9,92E4	2,8E3	8,18E4	4,31E5	5,26E4	3,81E4	5,58E4	8,72E4	2,92E4	1,71E3
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	0,00476	0,000156	0,00105	8,99E-6	0,000527	0,000664	0,000144	0,000147	0,000105	0,0019	4,66E-5	1,1E-5
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	681	34,7	83,9	2,87	80,6	253	46,7	44,6	41,5	70,4	21,1	1,36
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	2,07E6	1,1E5	2,25E5	1,28E4	2,13E5	6,98E5	1,9E5	1,54E5	1,5E5	2,66E5	4,35E4	7,33E3
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	15,5	0,59	6,53	0,00821	3,8	2,55	0,0728	0,692	0,0838	0,246	0,922	0,00229
Zużycie wody	m ³ depriv.	6,93E4	2,03E3	4,76E3	304	4,2E3	2,29E4	2,75E3	2,28E4	2,52E3	5,07E3	1,89E3	158



Rys. 25. Wyniki oddziaływania środowiskowego podzespołów autobusu na poszczególne kategorie szkód

Tab. 33. Wyniki normalizacji wpływu środowiskowego etapu produkcji autobusu z ogniwami w podziale na podzespoły

Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	El. zewnętrzne	Elektronika	Kabina kierowcy	Napęd	Ogniwo wodorowe	Zbiorniki wodorowe	Akumulator	Rama	Ukl. zawieszenia	Ukl. klimatyzacji i wentylacji	Płyny
Zakwaszenie	-	24,1	1,08	3,64	0,0716	3,17	8,94	1,49	1,72	0,985	1,72	1,27	0,0178
Ślad węglowy	-	22	1,22	2,25	0,118	2,32	7,83	1,92	1,49	1,74	2,6	0,463	0,0388
Ekotoksyczność wód słodkich	-	45	1,47	9,08	0,0938	5,82	19,1	1,11	2,46	1,46	2,57	1,73	0,0442
Emisja cząstek stałych	-	22	1,21	1,89	0,102	2,27	7,84	1,99	1,58	1,83	2,71	0,586	0,0111
Eutrofizacja wód morskich	-	18,3	0,536	1,36	0,0428	1,19	11,6	0,852	0,731	0,646	0,988	0,291	0,013
Eutrofizacja wód słodkich	-	76,3	3,38	17,8	0,2	12,2	22,5	3,3	2,33	4,07	6,87	3,76	0,0586
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	12,1	0,609	1,67	0,0451	1,43	4,52	0,858	0,78	0,7	1,11	0,384	0,0134
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	9,23	0,401	1,13	0,0361	1,01	3,33	0,228	0,437	0,799	1,33	0,488	0,0342
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	50	1,24	13	0,0734	7,66	14,1	0,883	1,71	1,55	5,04	4,84	0,0218
Promieniowanie jonizujące	-	3,73	0,121	0,462	0,0107	0,324	1,65	0,252	0,367	0,183	0,29	0,0649	0,0085 1
Wykorzystanie terenu	-	1,11	0,0391	0,121	0,00342	0,0998	0,526	0,0642	0,0465	0,0681	0,106	0,0356	0,0020 9
Zubożenie warstwy ozonowej	-	0,0909	0,00299	0,02	0,000172	0,0101	0,0127	0,00274	0,00281	0,0020 1	0,0364	0,000889	0,0002 1
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	16,7	0,848	2,05	0,0703	1,97	6,2	1,14	1,09	1,02	1,72	0,516	0,0333
Zubożenie zasobów kopalnych	-	31,9	1,69	3,46	0,197	3,28	10,7	2,92	2,37	2,3	4,1	0,669	0,113
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	244	9,28	103	0,129	59,8	40	1,14	10,9	1,32	3,86	14,5	0,036
Zużycie wody	-	6,04	0,177	0,415	0,0265	0,366	1,99	0,239	1,98	0,219	0,442	0,165	0,0138



Rys.26. Wyniki normalizacji wpływu środowiskowego etapu produkcji autobusu z ogniwami w podziale na podzespoły

Analiza wyników uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań własnych produkcji autobusu wskazuje, że ogniwo paliwowe ma największy negatywny wpływ na środowisko w większości kategorii. Jest to główne źródło obciążeń w takich kategoriach jak „śląd węglowy” (36%), „ekotoksyczność wód słodkich” (42%), „eutrofizacja mórz” (64%), „zakwaszenie” (37%) oraz „zużycie paliw kopalnych” (34%). Wyniki te wynikają przede wszystkim z zawartości metali szlachetnych, w szczególności platyny stosowanej jako katalizator, oraz energochłonności procesów produkcji membran do wymiany protonów.

Drugim istotnym źródłem obciążeń środowiskowych jest grupa materiałów wchodząca w skład elektroniki pojazdu, której udział jest szczególnie widoczny w kategorii zużycia „zasobów mineralnych i metali” (42% całkowitej wartości). Wysoki udział tej grupy wynika z obecności metali ziem rzadkich, miedzi oraz innych surowców krytycznych wykorzystywanych w układach sterowania, przetwornicach oraz czujnikach.

Rama konstrukcyjna, która mimo że stanowi największy udział masowy pojazdu (28%), nie ma znaczącego udziału w żadnej kategorii wpływu. Jej udział pozostaje na poziomie od 2% do 8%. Wynika to z faktu, że stal jest materiałem o ustandaryzowanych i zoptymalizowanych procesach produkcji o wysokim udziale recyklingu [120]. Procesy metalurgiczne nie generują obciążeń porównywalnych z produkcją zaawansowanych komponentów elektrochemicznych czy elektronicznych, których wytwarzanie wiąże się z wydobyciem i przetwarzaniem metali rzadkich oraz złożonymi procesami chemicznymi [120, 121, 122].

W kategorii „niszczenia warstwy ozonowej” za negatywny wpływ odpowiada układ zawieszenia (ok. 40%). Źródłem tego obciążenia jest produkcja kwasu tereftalowego (PTA, ang. Purified Terephthalic Acid), co wynika z analizy procesów jednostkowych. Stosowany jest on do wytwarzania polimerowych elementów, a procesowi temu towarzyszy uwalnianie bromku metylu, który jest substancją niszczącą warstwę ozonową [123].

Układ napędowy znaczny udział wykazuje w kategoriach związanych z „wydobyciem zasobów mineralnych i metali” (25%) oraz „wydobyciem paliw kopalnych” (10%). Wynika to ze składu materiałowego silnika elektrycznego, w którym stosowane są magnesy trwałe zawierające metale ziem rzadkich, takie jak neodym i dysproz, oraz z obecności towarzyszących elementów sterowania i konwersji energii.

W przypadku kategorii zużycia wody ogniwo wodorowe odpowiada za około 33% całkowitego obciążenia. Czynnikiem jest zużycie wody dejonizowanej, wykorzystywanej w procesach przygotowania mas ceramicznych podczas wytwarzania elektrolitu stałego [124]. Istotny udział w tej kategorii ma również produkcja akumulatora.

Na podstawie badań stwierdzono, że o wpływie środowiskowym produkcji autobusu z ogniwami paliwowymi nie decyduje masa poszczególnych części, lecz rodzaj użytych materiałów. Podzespoły o niewielkiej masie w skali całego pojazdu, takie jak układy elektroniczne czy ogniwo wodorowe, mogą w większym stopniu wpływać na poziom oddziaływania środowiskowego niż elementy konstrukcyjne pojazdu. Ważną rolę odrywają również procesy przetwórcze towarzyszące produkcji tych komponentów.

8. Analiza całego cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi

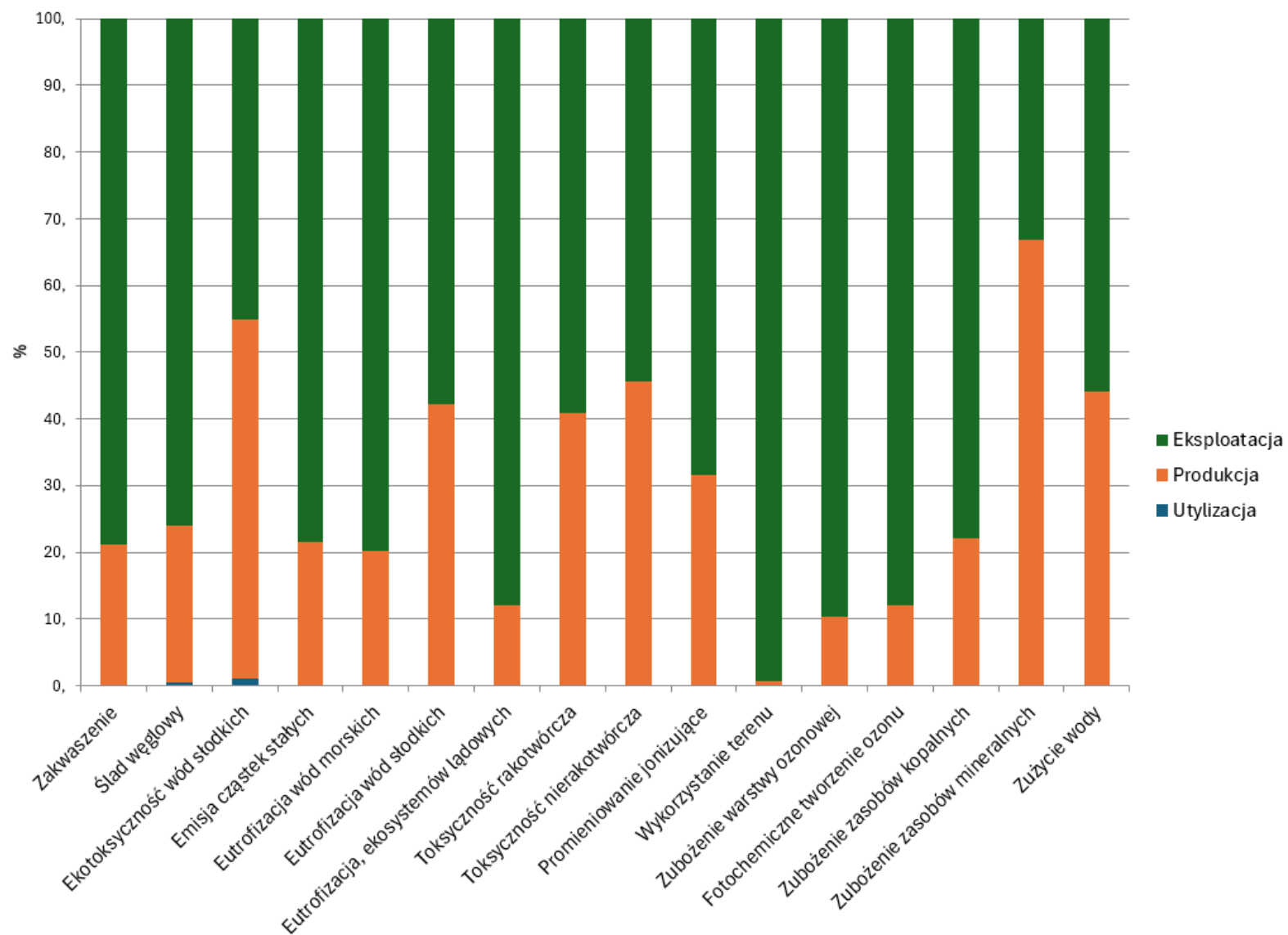
W ramach analizy pełnej analizy LCA uwzględniono:

- Wyniki etapu eksploatacji autobusu 12 m z ogniwami paliwowymi (Rozdział 6.5), które obejmują:
 - a. produkcję energii elektrycznej ze spalania biomasy;
 - b. produkcję wodoru w procesie elektrolizy przy wykorzystaniu energii elektrycznej ze spalania biomasy;
 - c. transport wodoru i jego sprężanie
 - d. eksploatację autobusu 12 m;
- Wyniki etapu produkcji (Rozdział 7.2);
- Wyniki etapu utylizacji.

Wyniki zaprezentowano w podziale na poszczególne etapy cyklu życia, co umożliwia identyfikację obszarów o największym obciążeniu środowiskowym oraz wskazanie kluczowych miejsc, w których możliwa jest redukcja wpływu środowiskowego. Wyniki poszczególnych etapów analizy przedstawiono w tabelach 34–35 oraz na rysunkach 27–28

Tab. 34. Wyniki oddziaływania środowiskowego LCA autobusu z ogniwami w podziale na fazy życia

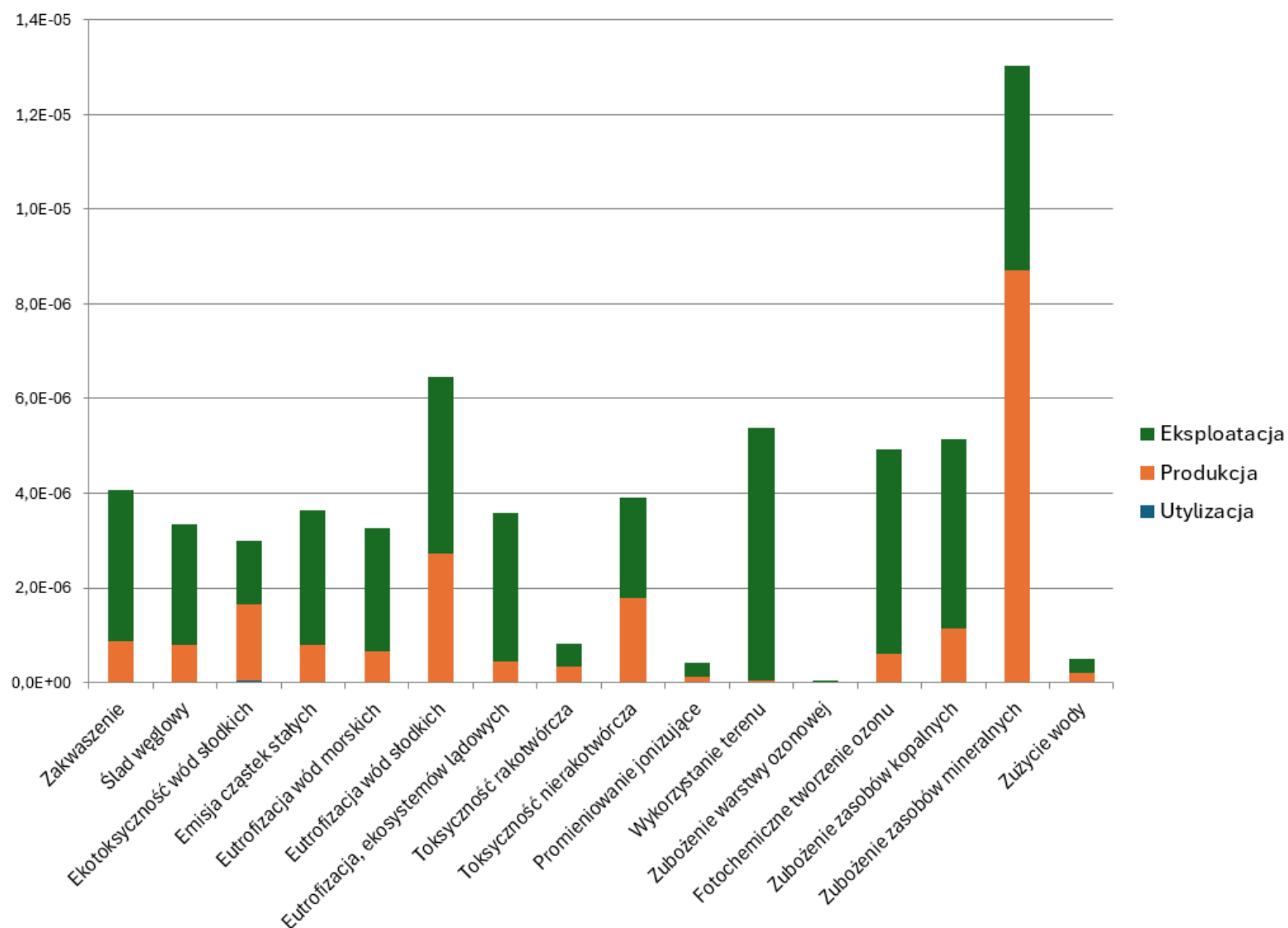
Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	Produkcja	Eksploatacja	Utylizacja
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	0,000226	4,78E-5	0,000179	5,1E-8
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	0,0252	0,00593	0,0192	0,000107
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	0,169	0,091	0,0762	0,00191
Emisja cząstek stałych	disease inc.	2,17E-9	4,68E-10	1,7E-9	6,1E-13
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	6,37E-5	1,27E-5	5,09E-5	8,72E-8
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	1,04E-5	4,38E-6	6,01E-6	5,87E-9
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,000633	7,64E-5	0,000557	2,29E-7
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	CTUh	1,39E-11	5,68E-12	8,25E-12	1,18E-14
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	CTUh	5,04E-10	2,3E-10	2,74E-10	4,27E-13
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	0,00178	0,000562	0,00121	1,23E-7
Wykorzystanie terenu	Pt	4,42	0,0325	4,38	8,97E-5
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	1,65E-9	1,7E-10	1,48E-9	1,13E-13
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,000201	2,43E-5	0,000177	7,07E-8
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	0,335	0,0739	0,261	7,56E-5
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	8,28E-7	5,53E-7	2,75E-7	1,11E-11
Zużycie wody	m ³ depriv.	0,00561	0,00247	0,00314	-5,65E-6



Rys. 27. Wyniki oddziaływania środowiskowego LCA autobusu wodorowego w podziale na fazy życia

Tab. 35. Wyniki normalizacji wpływu środowiskowego LCA autobusu z ogniwami w podziale na fazy życia

Kategoria wpływu	Jednostka	Suma	Produkcja	Eksploatacja	Utylizacja
Zakwaszenie	-	4,08E-6	8,6E-7	3,21E-6	9,18E-10
Ślad węglowy	-	3,34E-6	7,85E-7	2,54E-6	1,41E-8
Ekotoksyczność wód słodkich	-	2,98E-6	1,61E-6	1,34E-6	3,36E-8
Emisja cząstek stałych	-	3,64E-6	7,86E-7	2,86E-6	1,02E-9
Eutrofizacja wód morskich	-	3,26E-6	6,52E-7	2,6E-6	4,46E-9
Eutrofizacja wód słodkich	-	6,47E-6	2,73E-6	3,74E-6	3,66E-9
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	3,58E-6	4,32E-7	3,15E-6	1,29E-9
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	8,08E-7	3,29E-7	4,78E-7	6,83E-10
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	3,92E-6	1,79E-6	2,13E-6	3,32E-9
Promieniowanie jonizujące	-	4,21E-7	1,33E-7	2,88E-7	2,92E-11
Wykorzystanie terenu	-	5,39E-6	3,97E-8	5,35E-6	1,09E-10
Zubożenie warstwy ozonowej	-	3,16E-8	3,25E-9	2,83E-8	2,16E-12
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	4,93E-6	5,95E-7	4,33E-6	1,73E-9
Zubożenie zasobów kopalnych	-	5,15E-6	1,14E-6	4,01E-6	1,16E-9
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	1,3E-5	8,7E-6	4,33E-6	1,74E-10
Zużycie wody	-	4,89E-7	2,16E-7	2,73E-7	-4,93E-10



Rys. 28. Procentowe wyniki normalizacji wpływu środowiskowego LCA autobusu z ogniwami w podziale na fazy życia.

Uzyskane analizy pełnego cyklu życia autobusu z ogniwami wskazują na największy wpływ etapu eksploatacji w większości kategorii wpływu środowiskowego. W kategorii „zakwaszenia” etap eksploatacji odpowiada za około 79% całkowitego wpływu, w kategorii „ślad węglowy” za około 76%, w „zubożeniu warstwy ozonowej” za około 90%, a w kategorii „użytkowania ziemi” za ponad 99%. Wynika to z faktu, że główne obciążenia środowiskowe związane są z produkcją wodoru wykorzystywanego w całym okresie eksploatacji pojazdu, wynoszącym 800 000 km [88, 106]. Kluczowe znaczenie ma produkcja energii elektrycznej z biomasy oraz proces elektrolizy.

Etap produkcji pojazdu ma największy udział w kategorii zużycia zasobów mineralnych i metali, gdzie odpowiada za około 67% całkowitego wpływu. Wynika to z wykorzystania metali szlachetnych w ogniwie paliwowym oraz surowców stosowanych w układach elektronicznych i akumulatora. Istotny udział produkcji widoczny jest także w kategoriach „ekotoksyczności wód słodkich” około 54% oraz „eutrofizacji wód słodkich” około 42%. Etap utylizacji ma niewielki udział w większości kategorii i nie przekracza kilku procent.

Kolejnym istotnym obszarem wpływającym na środowisko jest „użytkowanie terenu”, co wynika z potrzeby pozyskiwania zrębki drzewnej z terenów leśnych do produkcji energii z biomasy. Znaczący wpływ odnotowano również w kategorii „eutrofizacji wód słodkich”, co wynika głównie ze stosowania nawozów azotowych i fosforowych przy uprawie drzew do biomasy.

Na podstawie otrzymanych wyników określono czynniki determinujące wpływ na środowisko pełnego cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi, w tym wodoru jako paliwa:

1. Najwyższy wpływ na środowisko w całym łańcuchu cyklu życia paliwa mają:
 - a. produkcja energii elektrycznej z biomasy,
 - b. produkcja wodoru w procesie elektrolizy.
2. Wysoki wpływ produkcji wodoru na kategorię zużycia zasobów mineralnych i metali wynika z wykorzystywanych metali do budowy elementów elektrolizera m.in. platyny oraz irydu.
3. Wysoki udział produkcji elektrycznej w kategorii użytkowania ziemi wynika z powierzchni potrzebnej pod uprawę drzew przeznaczonych na biomasę w postaci zrębki drzewnej i trocin.
4. O wpływie środowiskowym produkcji autobusu z ogniwami paliwowymi nie decyduje masa poszczególnych części, lecz rodzaj użytych materiałów. Podzespoły o niewielkiej masie w skali całego pojazdu, takie jak układy elektroniczne czy ogniwo paliwowe,

wpływają w większym stopniu na poziom oddziaływania środowiskowego niż elementy konstrukcyjne pojazdu.

5. Etap eksploatacji ma największy wpływ na wszystkie 16 kategorii szkód środowiskowych. Wynika to z wpływu produkcji wodoru zużywanego w całym okresie eksploatacji pojazdu (800 000 km).

9. Analiza niepewności danych metodą Monte Carlo

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę niepewności przeprowadzoną metodą Monte Carlo, która umożliwia ocenę wiarygodności wyników. Metoda Monte Carlo, znana również jako metoda symulacji statystycznej, jest zaawansowaną metodą obliczeń numerycznych opartą na teorii prawdopodobieństwa i statystyki. Wykorzystuje liczby losowe do rozwiązywania złożonych problemów obliczeniowych [125]. Znajduje szerokie zastosowanie m.in. w finansach, makroekonomii, fizyce obliczeniowej oraz w analizie ryzyka w projektach inżynierskich.

Zastosowanie metody Monte Carlo w rozwiązywaniu problemów praktycznych obejmuje dwa podstawowe elementy. Pierwszym jest generowanie zmiennych losowych zgodnie z określonymi rozkładami prawdopodobieństwa. Drugim jest statystyczne wyznaczenie wyników modelu, co umożliwia uzyskanie przybliżonych rozwiązań problemów rzeczywistych [125].

Metoda Monte Carlo umożliwia losowe próbkowanie wartości zmiennych obciążonych niepewnością na podstawie przyjętych rozkładów prawdopodobieństwa oraz ich integrację z wcześniej zdefiniowanym modelem oceny wpływu. Pozwala to na przeprowadzenie symulacji i uzyskanie statystycznie wyników oceny oddziaływania środowiskowego, które w sposób bardziej wiarygodny odzwierciedlają wpływ zmienności danych wejściowych. Uwzględniając charakter obu podejść, metodę Monte Carlo zintegrowano z analizą cyklu życia (LCA).

W niniejszej pracy analizę Monte Carlo przeprowadzono dla pełnego cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi, obejmującego etapy produkcji, eksploatacji oraz utylizacji pojazdu. Symulację wykonano dla 1000 powtórzeń, co stanowi wartość powszechnie stosowaną w analizach LCA. Poziom ufności przyjęto na poziomie 95% [126]. W każdym powtórzeniu wartości danych wejściowych losowano z rozkładów prawdopodobieństwa przypisanych poszczególnym procesom w bazie Ecoinvent, a następnie wykorzystywano do obliczenia wyników w każdej kategorii wpływu zgodnie z metodą Environmental Footprint.

Do szczegółowej analizy wyników wybrano 6 kategorii wpływu. Pięć z nich obejmuje kategorie, w których pełny cykl życia autobusu miał najwyższy wpływ na wynik: zużycie zasobów mineralnych i metali, użytkowanie terenu, zużycie paliw kopalnych, eutrofizację wód słodkich oraz tworzenie ozonu fotochemicznego. Dodatkowo uwzględniono kategorię śladu węglowego, będącą najczęściej analizowanym wskaźnikiem oddziaływania środowiskowego w badaniach dotyczących pojazdów elektrycznych.

Wyniki analizy Monte Carlo dla wybranych kategorii wpływu przedstawiono w tabeli 36 oraz na rysunkach 29-34. Zestawiono w niej podstawowe miary statystyczne umożliwiające ocenę zarówno wartości centralnych, jak i zakresu zmienności wyników.

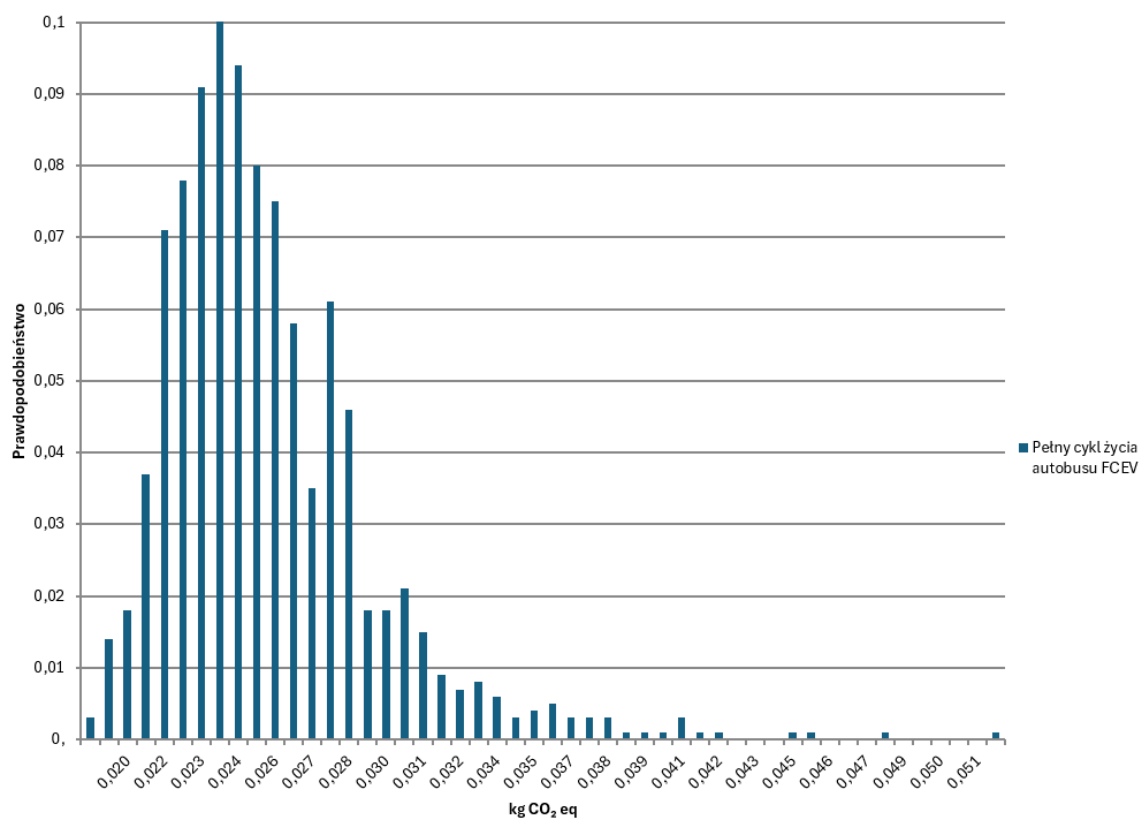
Tab.36. Wyniki analizy Monte Carlo dla wybranych kategorii wpływu środowiskowego pełnego cyklu życia autobusu z ogniwami paliwowymi

Kategoria wpływu	Jednostka	Wynik analizy	Średnia	Mediana	Odchylenie standardowe (SD)	Współczynnik zmienności (CV)	2,5%	97,5%
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	0,0252	0,0253	0,0247	0,00374	14,8%	0,0201	0,0347
Zużycia zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	8,28E-7	8,4E-7	8,01E-7	2,17E-7	25,8%	5,27E-7	1,36E-6
Wykorzystanie terenu	Pt	4,42	4,38	4,33	0,804	18,3%	3,02	6,14
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	0,335	0,334	0,328	0,0551	16,5%	0,249	0,473
Eutrofizacja wody słodkiej	kg P eq	1,04E-5	1,04E-5	9,69E-6	4,01E-6	38,6%	4,76E-6	2E-5
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,000201	0,000201	0,0002	1,73E-5	8,6%	0,000173	0,00024

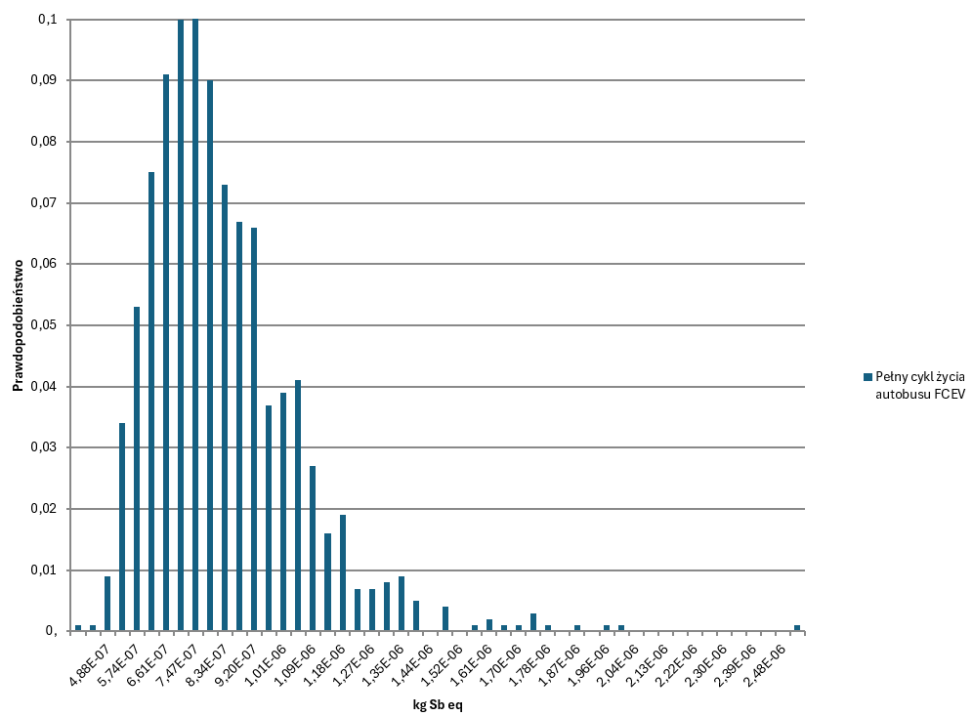
Poszczególne kolumny tabeli przedstawiają:

- Kolumna 3 „Wynik analizy”- wartość uzyskana w analizie LCA, bez uwzględniania niepewności.
- Kolumna 4 „Średnia”- uśredniona wartość wyniku ze wszystkich powtórzeń symulacji.
- Kolumna 5 „Mediana”- wartość środkowa, połowa wyników jest od niej niższa, a połowa wyższa.
- Kolumna 6 „Odchylenie standardowe (SD)”- miara rozproszenia wyników wokół średniej. Im wyższe odchylenie, tym większa zmienność wyników w próbie

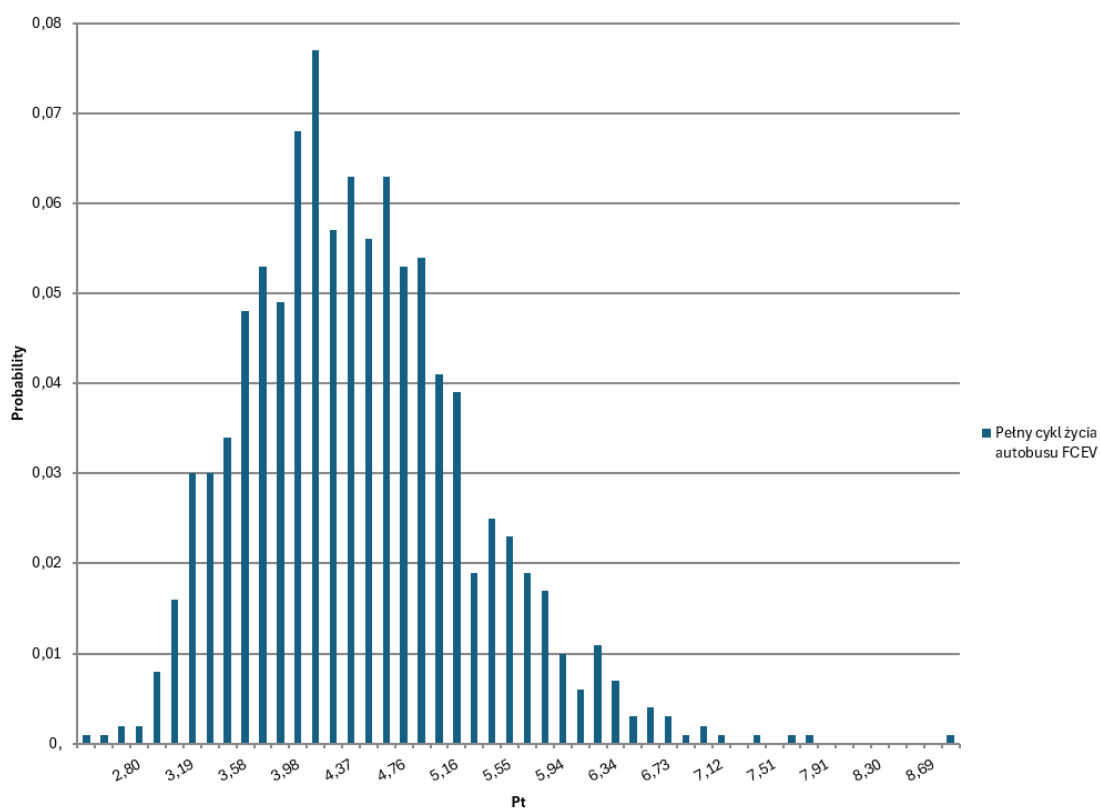
- Kolumna 7 „Współczynnik zmienności (CV)”- odchylenie standardowe wyrażone w procentach. Wartości niższe oznaczają wyniki pewne i mniej wrażliwe na zmienność.
- Kolumna 8-9 „2,5%” i „97,5%”- dolna i górna granica zakresu, w którym z 95% prawdopodobieństwem mieści się rzeczywisty wynik.



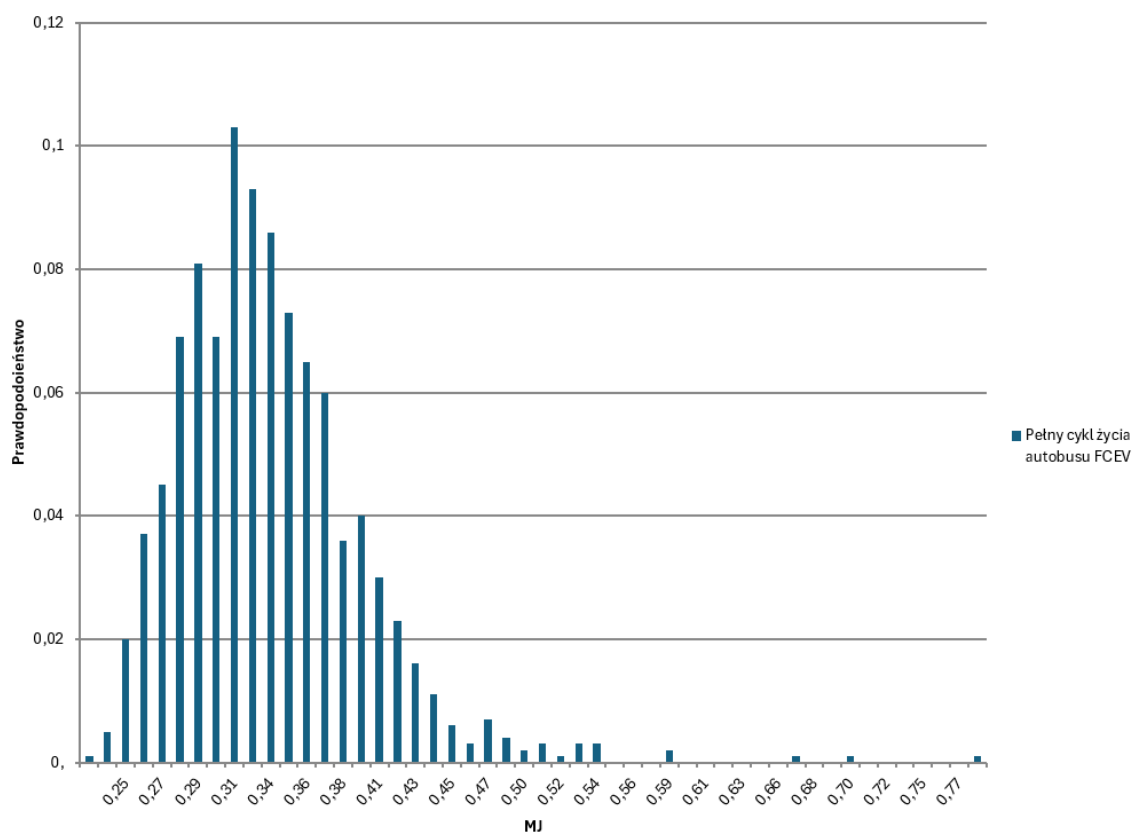
Rys. 29. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii śladu węglowego pełnego cyklu życia autobusu.



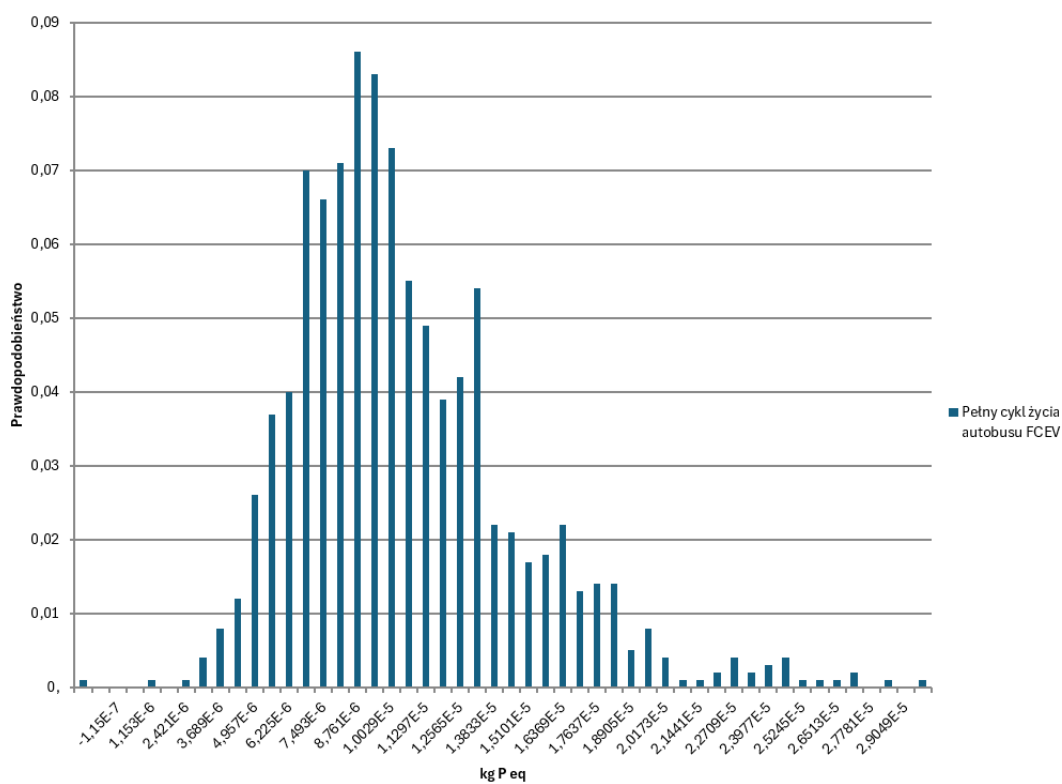
Rys. 30. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii zużycia zasobów mineralnych i metali pełnego cyklu życia autobusu.



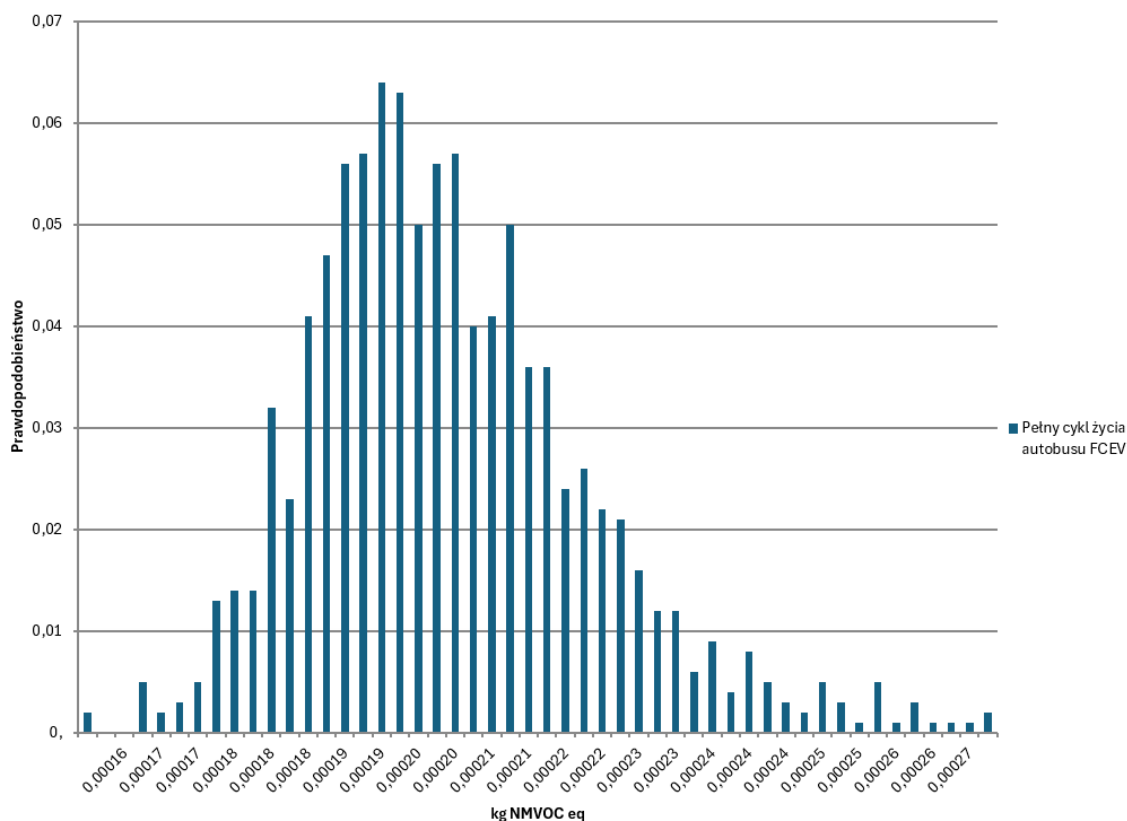
Rys. 31. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii wykorzystania terenów pełnego cyklu życia autobusu.



Rys. 32. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii zużycie paliw kopalnych pełnego cyklu życia autobusu.



Rys. 33. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii eutrofizację wód słodkich pełnego cyklu życia autobusu.



Rys. 34. Histogram rozkładu prawdopodobieństwa wyniku dla kategorii tworzenie ozonu fotochemicznego pełnego cyklu życia autobusu.

Na podstawie wykonanych analiz niepewności danych metodą Monte Carlo stwierdzono, że dla większości kategorii wpływu współczynnik zmienności jest stosunkowo niski i mieści się w zakresie od kilku do kilkunastu procent. Najniższą niepewnością charakteryzują się kategorie „tworzenia ozonu fotochemicznego” ($CV = 8,6\%$) oraz „śladu węglowego” ($CV = 14,8\%$), dla których histogramy (Rys. 29 i 34) wykazują rozkład skupiony wokół wartości średniej. Wiarygodne wyniki uzyskano również w kategorii „zużycia paliw kopalnych” ($CV = 16,5\%$) oraz kategorii „użytkowania ziemi” ($CV = 18,3\%$). Większą zmienność odnotowano w kategorii „zużycia zasobów mineralnych i metali” ($CV = 25,8\%$), której histogram (Rys. X) pokazuje, że wyniki częściej przyjmują wartości wyższe od średniej. Najwyższą niepewnością charakteryzuje się kategoria „eutrofizacji wód słodkich” ($CV = 38,6\%$), co wynika z wysokiej zmienności danych związanych z emisją fosforanów w procesach uwzględnionych w modelu.

Należy podkreślić, że niepewność w analizach LCA ma różne źródło pochodzenia. Według literatury, niepewność w badaniach LCA może pochodzić z różnych kryteriów alokacji, metody oceny wpływu oraz zebranych danych cyklu życia [127]. Najistotniejszymi źródłami niepewności są zazwyczaj parametry modelu i procesów, zmienność danych oraz wykorzystanie różnych metod i baz danych [128]. Istotnym źródłem niepewności jest również

lokalizacja geograficzna procesów. Procesy w bazie Ecoinvent przypisane są do określonych regionów (np. Europa, USA, Chiny, Świat), jednak rzeczywiste zakłady produkcyjne mogą znajdować się w różnych krajach, co wpływa na strukturę miksu energetycznego, technologie produkcji oraz emisje towarzyszące poszczególnym etapom. Przykładowo, emisje związane z produkcją stali, aluminium czy elektroniki różnią się znacząco między krajami w zależności od dominującego źródła energii oraz stosowanych technologii. Dotyczy to zwłaszcza metali szlachetnych z ogniw paliwowych oraz surowców krytycznych w elektronice i akumulatorach, których produkcja odbywa się w nielicznych krajach o różnych i specyficznych warunkach środowiskowych.

Dodatkowo należy zaznaczyć, że modelowanie pojazdu w oparciu o dane udostępnione przez producenta zawsze wiąże się z pewnym poziomem niepewności. Część procesów produkcyjnych, technologicznych oraz materiałowych nie jest możliwa do pełnego odwzorowania w modelu LCA, między innymi ze względu na ograniczoną dostępność danych szczegółowych, poufność niektórych informacji branżowych oraz konieczność stosowania uproszczeń przy doborze odpowiadających procesów lub materiałów w bazie Ecoinvent.

Mimo tych ograniczeń wyniki analizy Monte Carlo wskazują, że obliczone wartości obciążeń środowiskowych mieszczą się w najbardziej prawdopodobnych zakresach z prawdopodobieństwem 95%. Różnice między wynikami LCA a średnimi i medianami z symulacji są niewielkie. Oznacza to, że uzyskane wyniki są wiarygodne i dobrze odzwierciedlają rzeczywisty wpływ środowiskowy analizowanego pojazdu.

10. Analiza scenariuszowa- ocena wpływu zmiany parametrów wejściowych na cały cykl życia autobusu z ogniwami paliwowymi

10.1. Analiza porównawcza paliw wykorzystywanych w transporcie autobusowym

W niniejszej pracy przeprowadzono trzy rodzaje analiz scenariuszowych. Pierwsza z nich dotyczy porównania wpływu środowiskowego dwóch rodzajów paliw wykorzystywanych w trzech różnych napędach wykorzystywanych w transporcie autobusowym. Analiza dotyczy oleju napędowego w autobusie z silnikiem o zapłonie samoczynnym (ZS), oleju napędowego w autobusie z silnikiem hybrydowym oraz wodoru w autobusie z ogniwami paliwowymi.

Obiektem badań były autobusy wchodzące w skład taboru jednej z komunikacji miejskich w średnim mieście w województwie śląskim.

Analizę porównawczą paliw wykonano w ujęciu cyklu życia paliwa. Obejmuje ono cały łańcuch dostaw paliwa, od jego pozyskania i produkcji, przez transport, aż po wykorzystanie w pojeździe podczas eksploatacji

Analizę oparto na rzeczywistych danych dotyczących rocznego zużycia paliwa. Dane te pochodzą z eksploatacji następujących pojazdów:

- Solaris Urbino 12 IV Hybrid (rok produkcji 2023) - 11 autobusów,
- Solaris Urbino 12 IV Hybrid (rok produkcji 2017) - 1 autobus,
- Solaris Urbino 12 (rok produkcji 2014) - 1 autobus,
- NesoBus 12 - 20 autobusów.

W tabeli 37 zaprezentowano sumaryczne roczne zestawienie zużycia paliwa dla poszczególnych pojazdów. Dane obejmują zużycie paliwa w okresie od grudnia 2024 r. do listopada 2025 r. (12 miesięcy). Na etapie analizy środowiskowej WTW oba modele Solaris Urbino 12 IV Hybrid (z 2017 i 2023 roku) potraktowano łącznie jako jedną grupę pojazdów hybrydowych, ze względu na ich zbliżone parametry techniczno-eksploatacyjne.

Tab.37. Roczne zestawienie danych eksploatacyjnych wybranych pojazdów taboru analizowanej komunikacji miejskiej.

Rodzaj Silnika	Przebieg miesięczny [km]	Zatankowane paliwo w ujęciu rocznym [l] / [kg]	Średnia na 100km [l] / [kg]
Solaris Urbino 12 IV Hybrid (2023)	967 873,00	267 703,47	27,66
Solaris Urbino 12 IV Hybrid (2017)	73 640,00	19 722,47	26,78
Solaris Hybrid łącznie	1 041 513,00	287 425,94	27,60
Solaris Urbino 12 (2014)	65 139,00	23 987,20	36,82
NesoBus 12	974 076,00	70 490,23	7,24

Najwyższe zużycie paliwa odnotowano w przypadku autobusu z silnikiem o zapłonie samoczynnym (Solaris Urbino 12 z 2014 roku), które wyniosło 36,82 l/100 km. Autobusy hybrydowe charakteryzowały się zużyciem niższym o około 25%, co wynika z odzyskiwania energii podczas hamowania oraz wspomagania napędu spalinowego silnikiem elektrycznym. Największe przebiegi roczne zarejestrowano dla autobusów z ogniwami paliwowymi NesoBus 12 oraz hybrydowych Solaris Urbino 12 IV Hybrid. Autobus z silnikiem ZS pełnił

jedynie rolę pojazdu zapasowego oraz wspomagającego tabor w przypadku zwiększonego zapotrzebowania na obsługę linii, dlatego jego roczny przebieg był znacząco niższy.

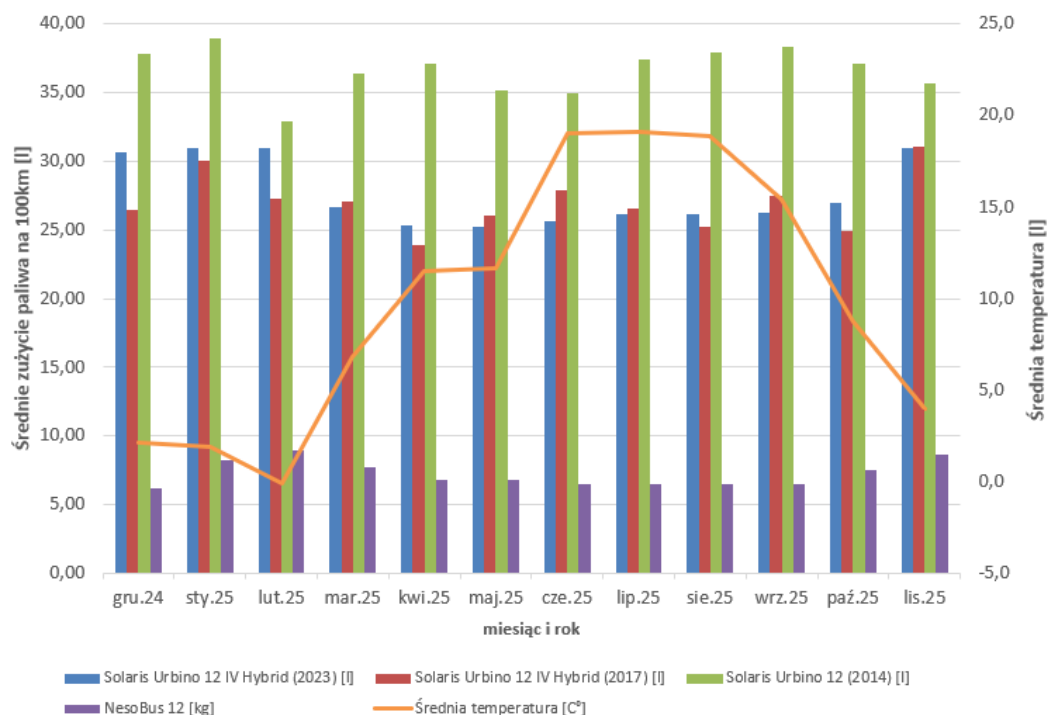
W celu uwzględnienia wpływu warunków atmosferycznych na zużycie paliwa pojazdów, w ramach analizy zbadano sezonową zmienność zużycia paliwa w odniesieniu do średniej temperatury otoczenia, co przedstawiono na rys. 35. Tabela 38 przedstawia zestawienie wartości szczegółowych. Dane meteorologiczne dotyczące średnich miesięcznych temperatur na obszarze działania komunikacji miejskiej pozyskano ze stacji pogodowej [130].

Na podstawie zebranych danych eksploatacyjnych zauważono wyraźną zmienność zużycia paliwa w zależności od temperatury otoczenia. Najwyższe zużycie paliwa odnotowano w miesiącach zimowych (grudzień, styczeń, luty, listopad), gdy temperatura spadała poniżej 5°C. Najniższe zużycie występowało w okresie wiosenno-letnim (kwiecień-wrzesień), przy temperaturach powyżej 10°C.

Dla autobusu z silnikiem ZS (Solaris Urbino 12) różnica między najniższym a najwyższym miesięcznym zużyciem paliwa wyniosła 6,02 l/100 km, różnica ok. 18%. W przypadku autobusów hybrydowych Solaris Urbino 12 IV Hybrid zmienność była większa. Dla pojazdu z 2023 roku różnica wyniosła 5,74 l/100 km (około 23%), a dla pojazdu z 2017 roku 7,17 l/100 km (około 30%). Największą zmienność procentową odnotowano dla autobusu z ogniwami NesoBus 12. Różnica wyniosła 2,54 kg/100 km, co odpowiada wartości około 39%.

Tab.38. Miesięczne zużycie paliwa wybranych autobusów miejskich oraz średnia temperatura zewnętrzna w okresie grudzień 2024 – listopad 2025.

Miesiąc	Solaris Urbino 12 IV Hybrid (2023) [l]	Solaris Urbino 12 IV Hybrid (2017) [l]	Solaris Urbino 12 (2014) [l]	NesoBus 12 [kg]	Średnia temperatura [C°]
gru.24	30,65	26,44	37,86	6,16	2,1
sty.25	30,91	30,01	38,97	8,29	1,9
lut.25	30,97	27,24	32,95	9,00	-0,1
mar.25	26,69	27,08	36,36	7,70	6,8
kwi.25	25,29	23,92	37,08	6,76	11,5
maj.25	25,23	26,02	35,15	6,79	11,7
cze.25	25,67	27,87	34,92	6,53	19,1
lip.25	26,16	26,56	37,41	6,55	19,1
sie.25	26,12	25,21	37,93	6,48	18,9
wrz.25	26,26	27,47	38,36	6,46	15,4
paź.25	26,99	24,94	37,11	7,52	8,7
lis.25	30,92	31,09	35,64	8,70	4,0



Rys.35. Zmienność zużycia paliwa w zależności od temperatury otoczenia.

Wzrost zużycia paliwa w okresie zimowym wynika z kilku czynników. Należą do nich ogrzewanie przestrzeni pasażerskiej, niższa sprawność układów napędowych w niskich temperaturach oraz większe zapotrzebowanie na energię przez układy pomocnicze [130].

W oparciu o przegląd literatury stwierdzono, że dla 12-metrowego autobusu elektrycznego średnia moc potrzebna do utrzymania temperatury kabiny na poziomie 17°C w warunkach zimowych, przy temperaturze otoczenia -10°C, wynosi około 24 kW [131, 132]. W niskich temperaturach rośnie również opór ruchu elementów mechanicznych. Wynika to z większej lepkości oleju silnikowego i innych płynów eksploatacyjnych. Dodatkowo wydłuża się czas osiągnięcia optymalnej temperatury pracy silnika [133].

W przypadku autobusów z ogniwami paliwowymi dodatkowym czynnikiem jest spadek sprawności ogniwa paliwowego w niskich temperaturach oraz konieczność wstępnego ogrzewania układu napędowego [134, 135]. Badania wskazują, że przy spadku temperatury z 15°C do -6°C sprawność takich układów może obniżyć się o około 28,6% [134].

W temperaturach poniżej 0°C woda powstająca w reakcji w ogniwie paliwowym może zamarzać. Może to prowadzić do blokowania kanałów transportu gazów oraz uszkodzeń elementów wewnętrznych ogniwa [134].

W ramach analiz własnych przeprowadzono również analizę wrażliwości zużycia paliwa względem średniej temperatury otoczenia, której wyniki przedstawiono na rysunku 36. Rysunek przedstawia zależność zużycia paliwa od temperatury otoczenia dla czterech

analizowanych pojazdów. Dla każdej serii danych wyznaczono linię regresji liniowej w postaci równania:

$$y = ax + b$$

gdzie:

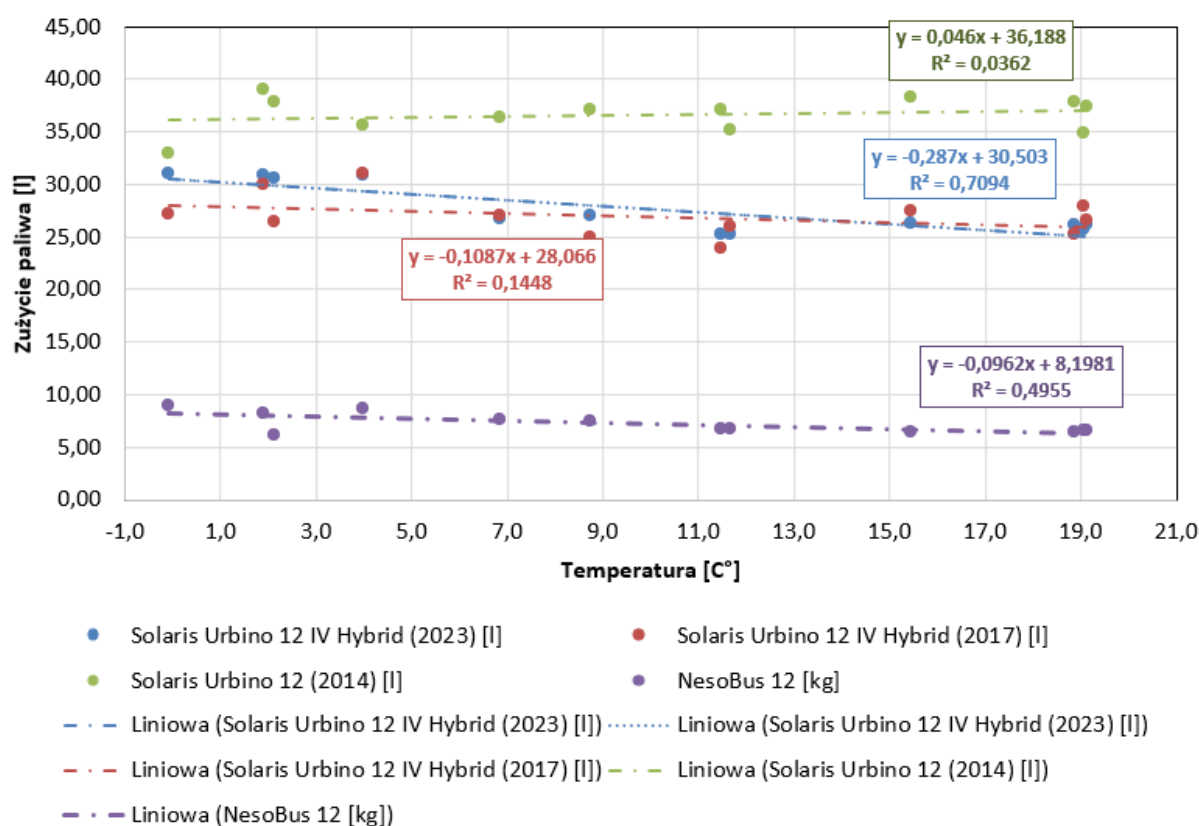
y – zużycie paliwa,

x – temperatura otoczenia,

a – współczynnik kierunkowy (nachylenie prostej),

b – wyraz wolny, czyli wartość zużycia paliwa przy temperaturze równej 0°C.

Współczynnik kierunkowy a określa, o ile zmienia się zużycie paliwa przy zmianie temperatury o 1°C. Wartość ujemna oznacza spadek zużycia wraz ze wzrostem temperatury. Na rysunku 36 podano również wartość R^2 , czyli współczynnik determinacji. Parametr ten określa, jaka część zmienności zużycia paliwa jest wyjaśniana przez temperaturę. Wartość R^2 mieści się w zakresie od 0 do 1. Im bliżej 1, tym silniejsza i bardziej przewidywalna jest zależność liniowa.



Rys.36. Analiza wrażliwości zużycia paliwa na temperaturę otoczenia.

Największą zależność od temperatury otoczenia wykazał Solaris Urbino 12 IV Hybrid. Współczynnik determinacji wyniósł $R^2 = 0,7094$, co oznacza, że około 71% zmienności zużycia paliwa można wyjaśnić zmianami temperatury. Z zależności liniowej wynika, że wzrost temperatury o 1°C powoduje spadek zużycia paliwa o około $0,29 \text{ l}/100 \text{ km}$.

Słabszą zależność odnotowano dla Solaris Urbino 12 IV Hybrid, gdzie R^2 wyniósł $0,1448$. Najmniejszy wpływ temperatury stwierdzono dla autobusu z silnikiem ZS - Solaris Urbino 12 - dla którego $R^2 = 0,0362$. Niskie wartości oznaczają, że temperatura w niewielkim stopniu wyjaśnia zmienność zużycia paliwa. W tych pojazdach większe znaczenie mają czynniki, takie jak warunki ruchu, styl jazdy oraz sposób eksploatacji.

Wyniki analizy wrażliwości wskazują, że nowocześniejsze pojazdy, w tym hybrydowe oraz z ogniwami paliwowymi, wykazują większą zależność zużycia energii od warunków atmosferycznych niż pojazdy z silnikiem ZS. Wynika to z większego udziału układów pomocniczych, takich jak ogrzewanie, klimatyzacja oraz kontrola temperatury baterii i ogniwa paliwowego, w zużyciu energii tych pojazdów [136].

W ramach analizy scenariuszowej cyklu życia różnych paliw stosowanych w autobusach uwzględniono również emisje bezpośrednie podczas eksploatacji autobusów. Ze względu na brak danych dotyczących rzeczywistych emisji szkodliwych substancji w warunkach drogowych dla analizowanych pojazdów, do obliczeń przyjęto wartości graniczne emisji wynikające z norm EURO [137, 138, 139] obowiązujących dla poszczególnych modeli. Autobus Solaris Urbino 12 (2014) z silnikiem o zapłonie samoczynnym spełnia normę EURO IV, natomiast autobusy hybrydowe Solaris Urbino 12 IV Hybrid spełniają normę EURO VI. Autobus z ogniwami paliwowymi NesoBus 12, jako pojazd zeroemisyjny z napędem elektrycznym opartym na ogniwie paliwowym, nie podlega obowiązującym normom emisji EURO, ponieważ regulacje te dotyczą wyłącznie pojazdów z silnikiem spalinowym.

Ze względu na przyjętą jednostkę funkcjonalną (1 pkm) oraz średnie obciążenie pojazdu wynoszące 35 pasażerów, wartości emisji wyrażone w gramach na kilometr (g/km) zostały przeliczone na gramy na pasażerokilometr (g/pkm) poprzez podzielenie przez liczbę pasażerów. Pozwoliło to na porównanie wpływu środowiskowego analizowanych napędów w odniesieniu do tej samej jednostki funkcjonalnej. Przeliczenie jednostek przedstawiono poniżej w 4 etapach:

1. Zużycie energii na km:

$$\frac{l}{\text{km}} \times \frac{\text{MJ}}{l} = \frac{\text{MJ}}{\text{km}}$$

2. Zużycie energii na pkm:

$$\frac{MJ/km}{35 \text{ pasażerów}} = \frac{MJ}{pkm}$$

3. Przeliczenie MJ/pkm na kWh/pkm:

Konwersja pomiędzy jednostkami energii przeprowadzona została zgodnie z definicją układu SI:

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ} \rightarrow 1 = \frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \text{ MJ}}$$

$$\frac{MJ}{pkm} \times \frac{1 \text{ kWh}}{3,6 \text{ MJ}} = \frac{kWh}{pkm} \rightarrow \frac{MJ}{pkm} \div 3,6 = \frac{kWh}{pkm}$$

4. Przeliczenie emisji z g/kWh na g/pkm:

$$\frac{g}{kWh} \times \frac{kWh}{pkm} = \frac{g}{pkm}$$

gdzie, $\frac{g}{kWh}$ – emisja wg. norm Euro

Podsumowanie:

$$\frac{l}{km} \xrightarrow{\text{etap 1}} \frac{MJ}{km} \xrightarrow{\text{etap 2}} \frac{MJ}{pkm} \xrightarrow{\text{etap 3}} \frac{kWh}{pkm} \xrightarrow{\text{etap 4}} \frac{g}{pkm}$$

Przeliczone wartości emisji przedstawiono w tabeli 39.

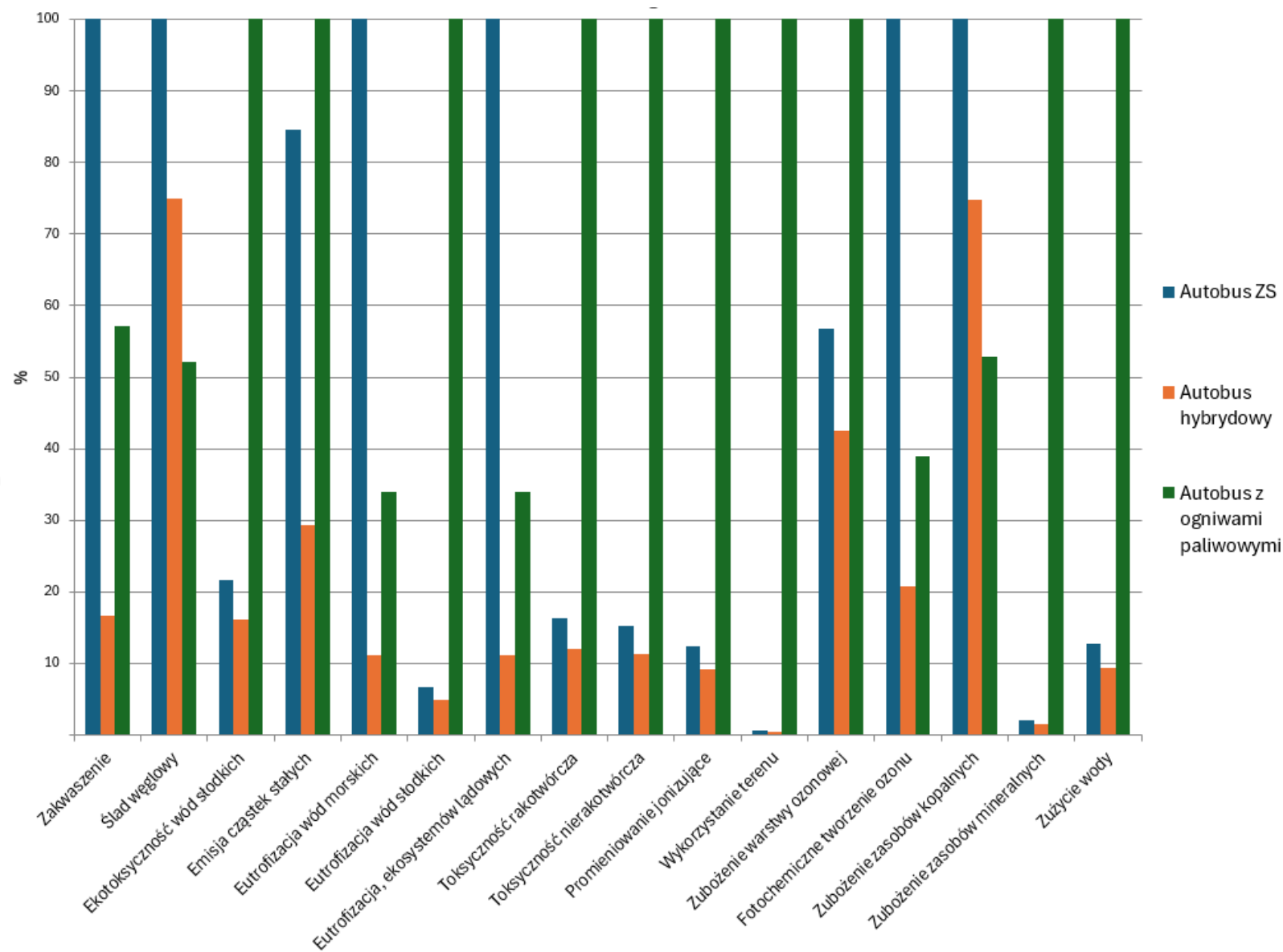
Tabela 39. Wartości graniczne emisji zanieczyszczeń wg norm EURO IV i EURO VI w przeliczeniu na 1 pkm.

Rodzaj substancji	Solaris Urbino 12 (2014)		Solaris Urbino 12 Hybrid	
	Euro IV Limit (g/kWh)	Euro IV Limit (g/pkm)	Euro VI Limit (g/kWh)	Euro VI Limit (g/pkm)
CO	1,50	0,158	1,50	0,119
HC	0,46	0,049	0,13	0,010
NO _x	3,50	0,369	0,40	0,032
PM	0,02	0,002	0,01	0,001

Wyniki analizy scenariuszowej przedstawiono fazę normalizacji oraz ocenie szkód. Wyniki przedstawiono w tabelach 40-41 oraz na rysunkach 37-38.

Tab. 40. Wyniki *oddziaływania środowiskowego* dla analizowanych o 3 różnych typach napędów.

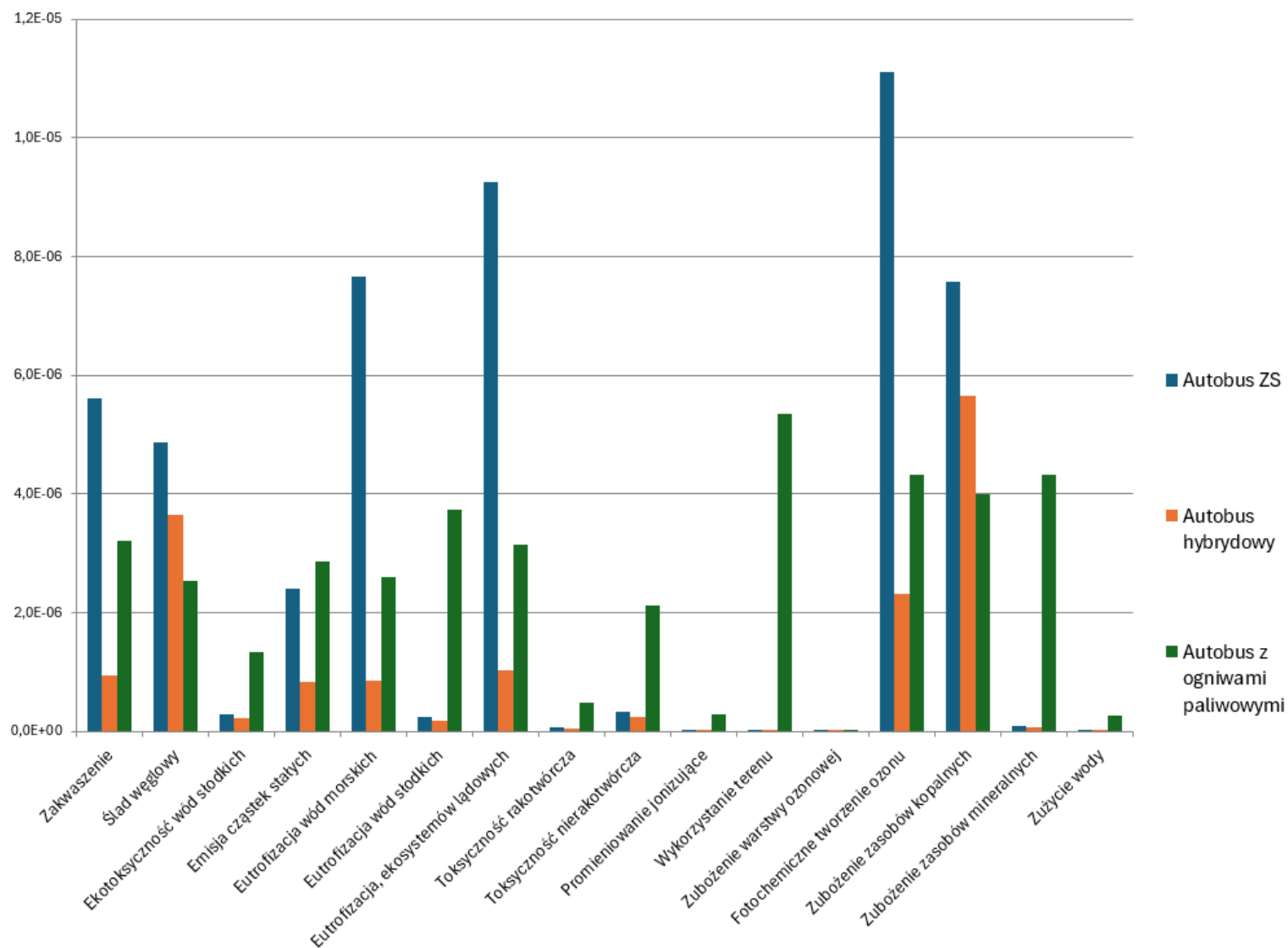
Kategoria wpływu	Jednostka	Autobus z silnikiem ZS	Autobus hybrydowy	Autobus z ogniwami paliwowymi
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	0,000312	5,23E-5	0,000179
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	0,0369	0,0276	0,0192
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	0,0165	0,0123	0,0762
Emisja cząstek stałych	disease inc.	1,44E-9	4,99E-10	1,7E-9
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	0,00015	1,68E-5	5,09E-5
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	4,02E-7	2,97E-7	6,01E-6
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,00164	0,000182	0,000557
Toksyczność rakotwórcza	CTUh	1,34E-12	9,98E-13	8,25E-12
Toksyczność nierakotwórcza	CTUh	4,18E-11	3,11E-11	2,74E-10
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	0,000151	0,000112	0,00121
Wykorzystanie terenu	Pt	0,0253	0,0189	4,38
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	8,42E-10	6,29E-10	1,48E-9
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,000454	9,46E-5	0,000177
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	0,493	0,368	0,261
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	5,86E-9	4,24E-9	2,75E-7
Zużycie wody	m ³ depriv.	0,0004	0,000296	0,00314



Rys. 37. Wyniki oddziaływania środowiskowego dla analizowanych o 3 różnych typach napędów.

Tab. 41. Wyniki normalizacji wpływu środowiskowego dla analizowanych o 3 różnych typach napędów.

Kategoria wpływu	Jednostka	Autobus z silnikiem ZS	Autobus hybrydowy	Autobus z ogniwami paliwowymi
Zakwaszenie	-	5,62E-6	9,42E-7	3,21E-6
Ślad węglowy	-	4,88E-6	3,66E-6	2,54E-6
Ekotoksyczność wód słodkich	-	2,91E-7	2,17E-7	1,34E-6
Emisja cząstek stałych	-	2,41E-6	8,38E-7	2,86E-6
Eutrofizacja wód morskich	-	7,66E-6	8,59E-7	2,6E-6
Eutrofizacja wód słodkich	-	2,5E-7	1,85E-7	3,74E-6
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	9,26E-6	1,03E-6	3,15E-6
Toksyczność rakotwórcza	-	7,76E-8	5,79E-8	4,78E-7
Toksyczność nierakotwórcza	-	3,25E-7	2,41E-7	2,13E-6
Promieniowanie jonizujące	-	3,58E-8	2,64E-8	2,88E-7
Wykorzystanie terenu	-	3,09E-8	2,31E-8	5,35E-6
Zubożenie warstwy ozonowej	-	1,61E-8	1,2E-8	2,83E-8
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	1,11E-5	2,31E-6	4,33E-6
Zubożenie zasobów kopalnych	-	7,58E-6	5,66E-6	4,01E-6
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	9,22E-8	6,66E-8	4,33E-6
Zużycie wody	-	3,49E-8	2,58E-8	2,73E-7



Rys. 38. Wyniki normalizacji wpływu środowiskowego dla analizowanych o 3 różnych typach napędów.

Uzyskane wyniki wskazują na wyraźne różnice w wpływie na środowisko między trzema analizowanymi scenariuszami zastosowania paliw. Autobus z silnikiem ZS (Solaris Urbino 12) odpowiada za najwyższe obciążenia w kategoriach związanych z emisją szkodliwych substancji, takich jak „ślad węglowy”, „zakwaszenie”, „emisja cząstek stałych”, a także w kategoriach „tworzenie ozonu fotochemicznego” oraz „zużycie paliw kopalnych”.

Z kolei autobus z ogniwami paliwowymi NesoBus 12 osiąga najwyższe wartości w większości pozostałych kategorii. Dotyczy to m.in. „ekotoksyczności”, „eutrofizacji wód słodkich”, „toksyczności dla ludzi”, „użytkowania ziemi”, „zubożenia warstwy ozonowej”, „zużycia zasobów mineralnych i metali” oraz „zużycia wody”. Wynika to głównie z energochłonnego procesu elektrolizy, pozyskiwania zrębki drzewnej i trocin wykorzystywanych jako biomasa do produkcji energii elektrycznej oraz zapotrzebowania na metale szlachetne i metale ziem rzadkich, które są stosowane w ogniwach paliwowych.

W kategorii „ślad węglowy” pojazd hybrydowy generuje o około 25% niższe emisje CO₂ niż autobus z silnikiem ZS, a autobus z ogniwami paliwowymi o około 48% niższe. Jednak, wpływ na „zużycie zasobów mineralnych i metali” jest w tym przypadku ponad 45 razy większy niż dla pojazdu z silnikiem ZS i ponad 60 razy wyższe niż dla pojazdu hybrydowego. Autobus hybrydowy nie osiąga najwyższych wartości w żadnej z analizowanych kategorii, co wskazuje na jego bardziej zrównoważony profil środowiskowy.

Podsumowując, żaden z analizowanych wariantów nie jest jednoznacznie najlepszy pod względem środowiskowym. Autobus z ogniwami paliwowymi pozwala znacząco ograniczyć emisję CO₂ i zanieczyszczeń powietrza, ale jednocześnie powoduje większe obciążenia w zakresie wykorzystania zasobów i wpływu na środowisko. Autobus hybrydowy można uznać za wariant o bardziej zrównoważonym profilu środowiskowym, ponieważ łączy niższe emisje z umiarkowanym zużyciem zasobów. Wyniki wskazują, że ocena technologii wodorowych powinna obejmować pełny zakres oddziaływań, a nie ograniczać się wyłącznie do emisji gazów cieplarnianych.

10.2. Analiza porównawcza metod produkcji energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania procesu elektrolizy

W ramach analizy scenariuszowej przeprowadzono analizę porównawczą wpływu środowiskowego czterech źródeł energii elektrycznej wykorzystywanej do zasilania procesu elektrolizy wody, służącej do produkcji wodoru. Celem było określenie, w jakim stopniu wybór źródła energii oraz struktura krajowego miksu energetycznego wpływają na całkowite

obciążenie środowiskowe produkcji wodoru, a w konsekwencji na wyniki analizy LCA autobusu z ogniwami paliwowymi.

Porównano cztery scenariusze produkcji energii elektrycznej:

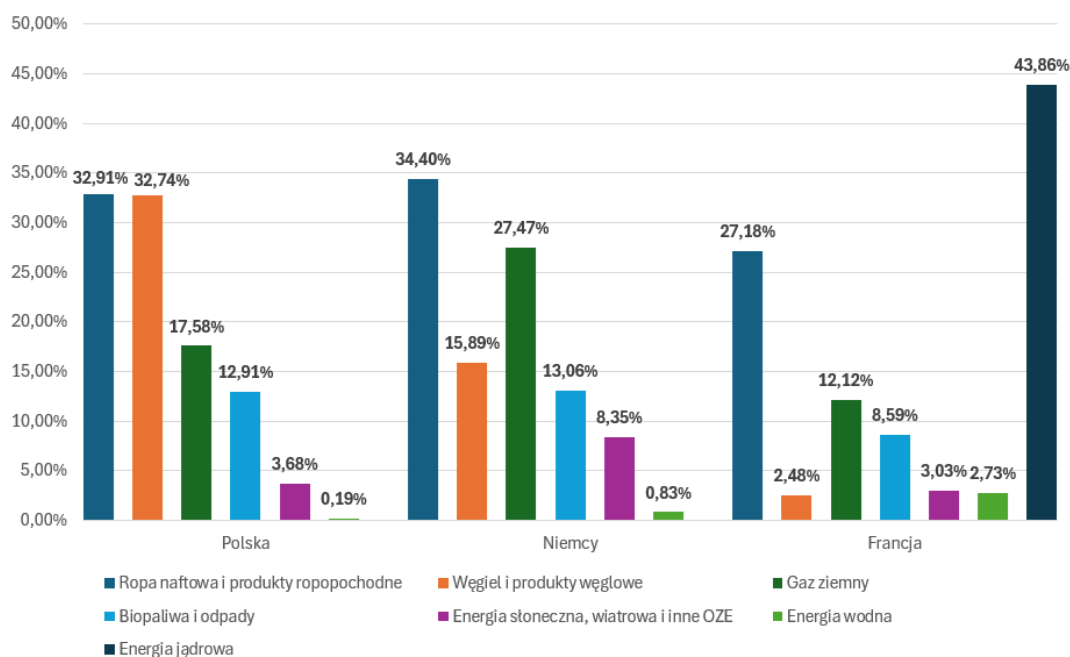
- spalania biomasy w postaci zrębki drzewnej i trocin,
- zgodnie z miksem energetycznym Polski,
- zgodnie z miksem energetycznym Niemiec,
- zgodnie z miksem energetycznym Francji.

Wybór Francji i Niemiec wynika z ich bliskiego położenia geograficznego względem Polski, a także z odmiennej struktury energetycznej opartej na innych dominujących źródłach. W scenariuszu bazowym energia elektryczna wykorzystywana w elektrolizie pochodzi w całości ze spalania biomasy w postaci zrębki drzewnej i trocin. Szczegółowy opis procesu oraz przyjęte założenia przedstawiono w rozdziale 6.1.

Pozostałe scenariusze odzwierciedlają rzeczywiste struktury produkcji energii elektrycznej w trzech krajach europejskich o różnej polityce energetycznej, co przedstawiono na tabeli 42 oraz rysunku 39. Dane zostały zaczerpnięte z bazy Międzynarodowej Agencji Energetycznej [140]. Dotyczą one struktur energetycznych z 2024 roku.

Tab.42. Struktura miksu energetycznego Polski, Niemiec i Francji

Nośnik energii	Polska	Niemcy	Francja
Ropa naftowa i produkty ropopochodne	32,91%	34,40%	27,18%
Węgiel i produkty węglowe	32,74%	15,89%	2,48%
Gaz ziemny	17,58%	27,47%	12,12%
Biopaliwa i odpady	12,91%	13,06%	8,59%
Energia słoneczna, wiatrowa i inne OZE	3,68%	8,35%	3,03%
Energia wodna	0,19%	0,83%	2,73%
Energia jądrowa	0,00%	0,00%	43,86%



Rys.39. Procentowa struktura miks energetycznego Polski, Niemiec i Francji

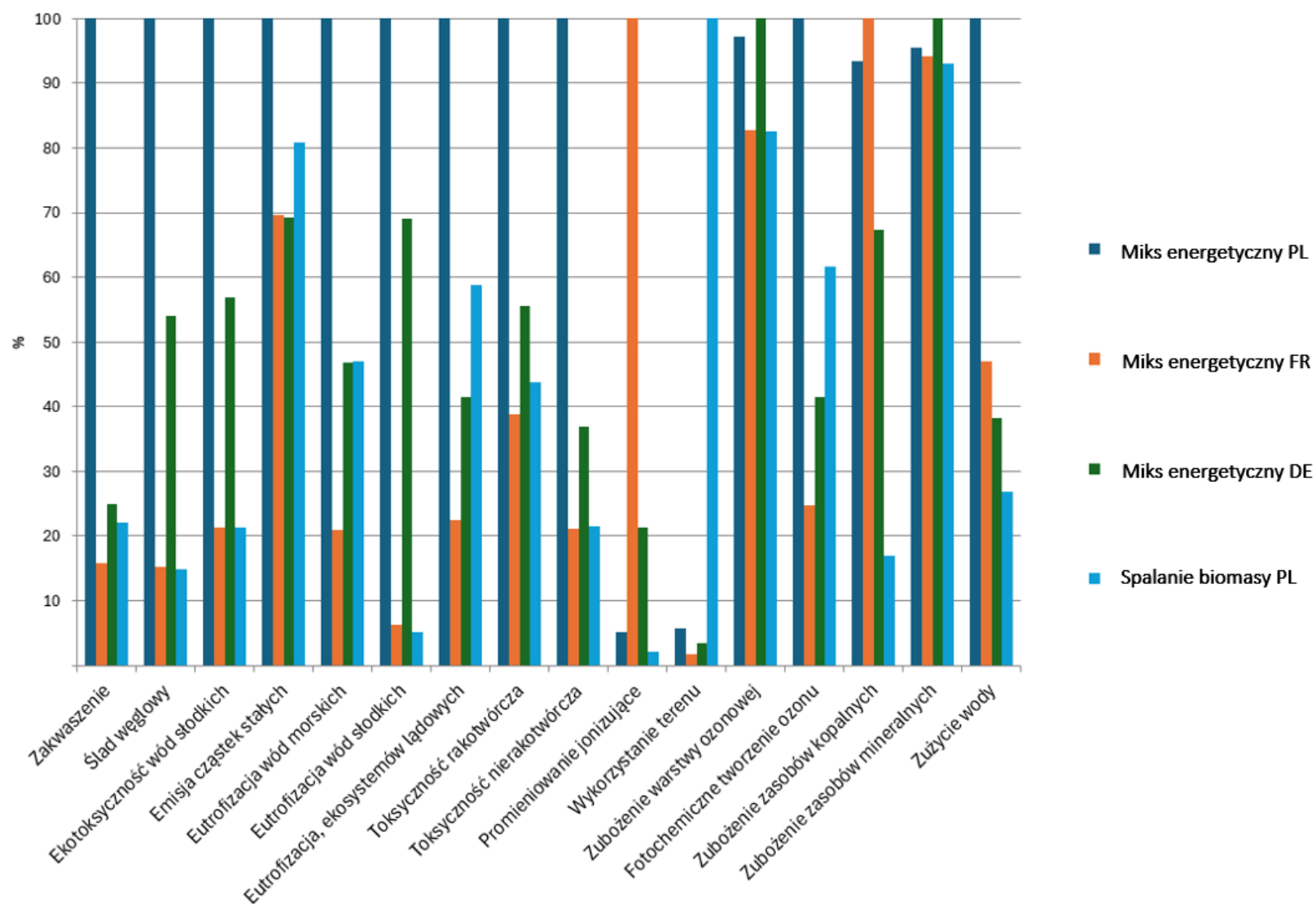
Polska charakteryzuje się wysokim udziałem paliw kopalnych, głównie węgla i produktów węglowych (32,74%) oraz ropy naftowej (32,91%), przy niewielkim udziale odnawialnych źródeł energii (3,68%). W Niemczech zauważalny jest większy udział gazu ziemnego (27,47%) oraz odnawialnych źródeł energii (8,35%), a udział węgla jest niższy (15,89%). Francja wyróżnia się dominującym udziałem energii jądrowej (43,86%) oraz znacznie mniejszym wykorzystaniem paliw kopalnych [140].

Porównanie tych scenariuszy pozwoli ocenić wpływ lokalnych uwarunkowań energetycznych na produkcję wodoru. Umożliwia to także ocenę, czy wykorzystanie energii elektrycznej w 100% z biomasy w procesie elektrolizy ma mniejszy negatywny wpływ na środowisko niż zastosowanie energii pochodzącej z miksów energetycznych wybranych krajów europejskich.

Na podstawie danych o strukturach miks energetycznego Polski (PL), Niemiec (DE) i Francji (FR) oraz w oparciu o opracowany model produkcji energii elektrycznej z biomasy (spalanie biomasy, PL) stworzono scenariusz porównawczy w oprogramowaniu SimaPro. Ze względu na liczbę porównywanych scenariuszy analizę przeprowadzono w dwóch etapach: oceny wpływu oraz normalizacji. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 43–44 oraz na rysunkach 40–41

Tab. 43. Wyniki oddziaływania środowiskowego produkcji wodoru z różnych źródeł energii elektrycznej

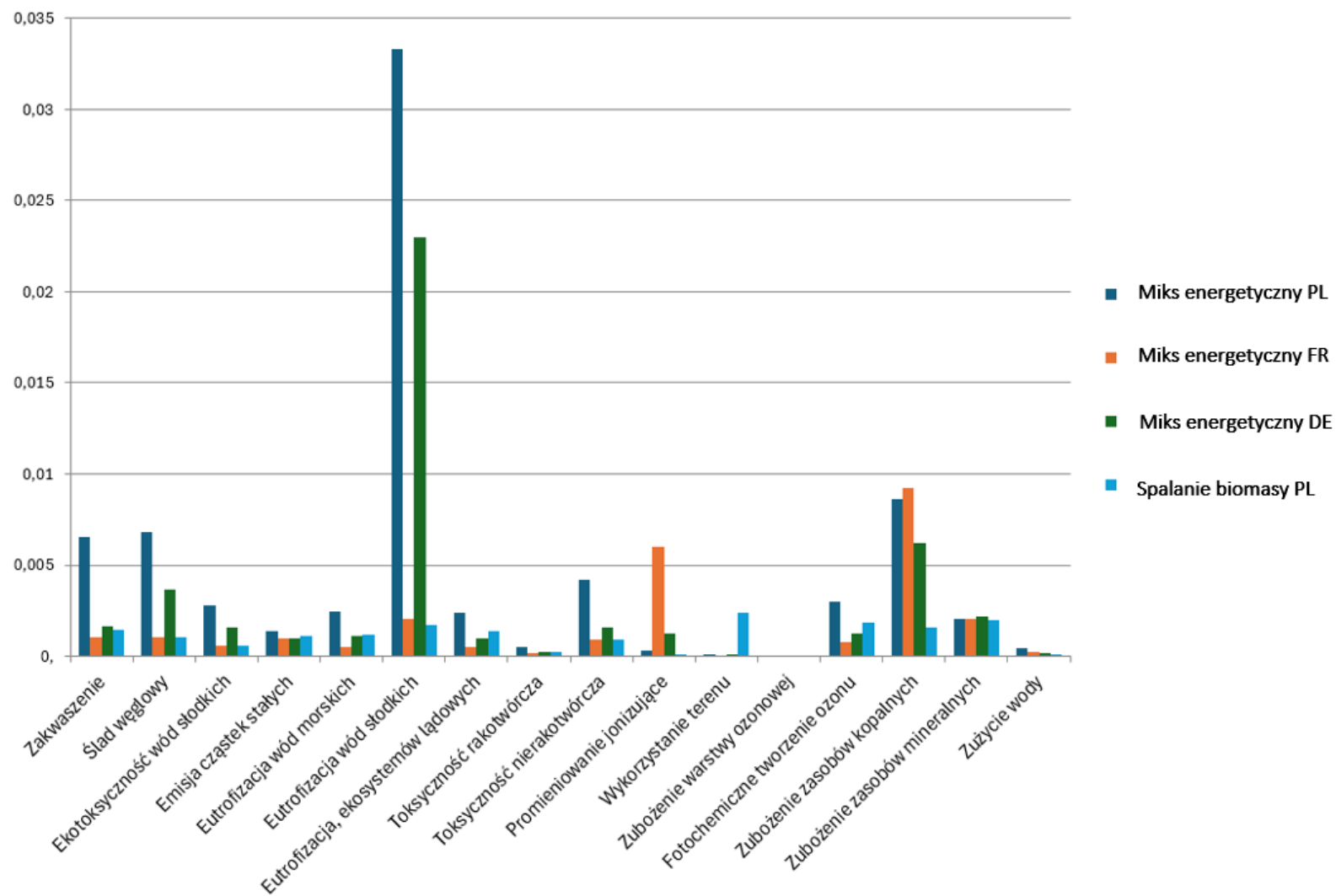
Kategoria wpływu	Jednostka	Miks energetyczny PL	Miks energetyczny FR	Miks energetyczny DE	Spalanie biomasy, PL
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	0,362	0,0572	0,0905	0,0802
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	51,4	7,86	27,8	7,67
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	159	33,9	90,7	33,9
Emisja cząstek stałych	disease inc.	8,21E-7	5,71E-7	5,69E-7	6,64E-7
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	0,0478	0,00999	0,0224	0,0225
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	0,0535	0,00332	0,0369	0,00277
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,419	0,094	0,174	0,246
Toksyczność rakotwórcza	CTUh	8,39E-9	3,26E-9	4,66E-9	3,67E-9
Toksyczność nierakotwórcza	CTUh	5,43E-7	1,15E-7	2,01E-7	1,17E-7
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	1,31	25,3	5,38	0,544
Wykorzystanie terenu	Pt	112	34,4	65,8	1,96E3
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	8E-7	6,82E-7	8,23E-7	6,8E-7
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,123	0,0304	0,051	0,0759
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	561	600	404	102
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	0,000132	0,00013	0,000138	0,000128
Zużycie wody	m ³ depriv.	5,2	2,44	1,99	1,4



Rys. 40. Wyniki oceny oddziaływania środowiskowego produkcji wodoru z różnych źródeł energii elektrycznej

Tab. 44. Wyniki normalizacji produkcji wodoru z różnych źródeł energii elektrycznej

Kategoria wpływu	Jednostka	Miks energetyczny PL	Miks energetyczny FR	Miks energetyczny DE	Spalanie biomasy, PL
Zakwaszenie	-	0,00652	0,00103	0,00163	0,00144
Ślad węglowy	-	0,00681	0,00104	0,00368	0,00102
Ekotoksyczność wód słodkich	-	0,00281	0,000597	0,0016	0,000598
Emisja cząstek stałych	-	0,00138	0,00096	0,000956	0,00112
Eutrofizacja wód morskich	-	0,00244	0,000511	0,00114	0,00115
Eutrofizacja wód słodkich	-	0,0333	0,00207	0,023	0,00172
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	0,00237	0,000532	0,000985	0,00139
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	0,000486	0,000189	0,00027	0,000212
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	0,00422	0,000893	0,00156	0,00091
Promieniowanie jonizujące	-	0,000311	0,00599	0,00128	0,000129
Wykorzystanie terenu	-	0,000136	4,2E-5	8,03E-5	0,00239
Zubożenie warstwy ozonowej	-	1,53E-5	1,3E-5	1,57E-5	1,3E-5
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	0,00301	0,000744	0,00125	0,00186
Zubożenie zasobów kopalnych	-	0,00863	0,00924	0,00622	0,00156
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	0,00207	0,00204	0,00217	0,00202
Zużycie wody	-	0,000454	0,000213	0,000173	0,000122



Rys. 41. Wyniki normalizacji produkcji wodoru z różnych źródeł energii elektrycznej

Uzyskane wyniki oceny szkód przedstawiają wyraźne różnice dla czterech analizowanych scenariuszy produkcji wodoru w procesie elektrolizy, które różnią się źródłem energii elektrycznej. Produkcja wodoru w procesie elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną z miks energetycznego Polski wpływa najbardziej negatywnie na większość kategorii, takich jak „zakwaszenie”, „śląd węglowy”, „emisja cząstek”, „eutrofizacja”, „toksyczność dla ludzi”, „tworzenie ozonu fotochemicznego” oraz „zużycie wody”. Wynika to z dużego udziału węgla i ropy naftowej w krajowym miksie energetycznym (łącznie ponad 65%).

Scenariusz oparty na miksie francuskim wykazuje najwyższe wartości w kategorii „promieniowania jonizującego”, co wynika z wysokiego udziału energii jądrowej. Z kolei, wysokie wartości w kategorii „zużycia paliw kopalnych” dla tego scenariusza wynikają, w szczególności ze wzbogacania uranu, wydobywania oraz konwersji gazu ziemnego. Są to procesy wysoce energochłonne [141].

Wyniki scenariusza, który uwzględnia spalanie biomasy w warunkach polskich, obrazują, że najwyższe obciążenia generowane są w kategorii „użytkowania terenu”, co wynika z konieczności produkcji biomasy, składającej się ze zrębki drzewnej i trocin. Wpływ na pozostałe kategorie jest znacznie niższy niż, w przypadku miks polskiego, zwłaszcza w obszarach związanych z emisjami do powietrza.

Analiza pokazuje, że najwyższe obciążenia na etapie normalizacji występują dla produkcji wodoru w procesie elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną pochodzącą z miks polskiego, gdzie dominującą kategorią jest „eutrofizacja wód słodkich”. Wysokie wartości wynikają z emisji fosforanów i innych związków biogenych związanych z wydobywaniem i spalaniem węgla, który ma duży udział w polskim miksie energetycznym, oraz z odprowadzania ścieków przemysłowych do wód powierzchniowych [142].

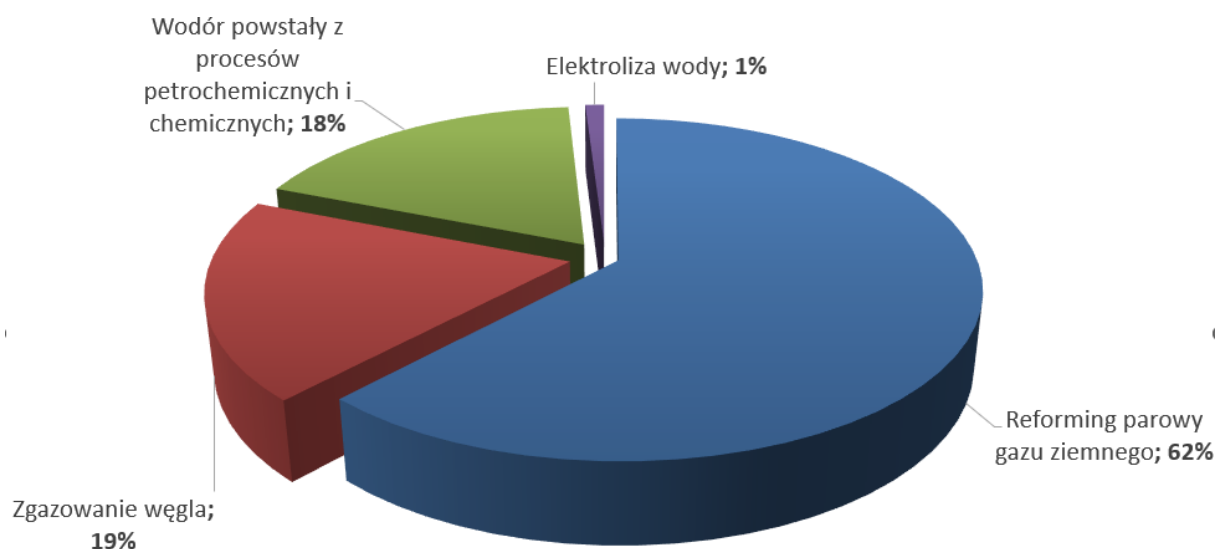
Najniższe wartości odnotowano dla scenariusza opartego na biomase. Wynika to z odnawialnego charakteru tego źródła energii oraz braku emisji związanych bezpośrednio ze spalaniem paliw kopalnych. W analizie cyklu życia biomasa jest uznawana za neutralną pod względem emisji CO₂, ponieważ ilość dwutlenku węgla uwalnianego podczas spalania odpowiada ilości pochłoniętej przez rośliny w trakcie ich wzrostu [143].

Podsumowując, wybór źródła energii elektrycznej ma kluczowe znaczenie dla całociowego środowiskowego bilansu produkcji wodoru w procesie elektrolizy. W warunkach miks opartego głównie na paliwach kopalnych produkcja wodoru wiąże się z wysokimi obciążeniami środowiskowymi. Najniższe wartości uzyskano dla scenariusza opartego na biomase oraz dla struktury miks energetycznego francuskiego. W pierwszym przypadku

głównym ograniczeniem jest wpływ na użytkowanie ziemi, a w drugim obciążenia związane z energetyką jądrową w tym promieniowaniem jonizującym. Wyniki pokazują, że rozwój technologii wodorowych wymaga równoczesnych zmian w sektorze energetycznym oraz uwzględnienia lokalnych uwarunkowań energetycznych

10.3. Porównanie różnych metod produkcji wodoru

Sposób produkcji wodoru ma kluczowy wpływ na ślad środowiskowy pojazdu z ogniwami paliwowymi. Dlatego w niniejszym rozdziale przeprowadzono analizę scenariuszową, w której porównano wpływ środowiskowy różnych metod produkcji wodoru. Punktem wyjścia dla tej analizy jest charakterystyka globalnej struktury produkcji wodoru (rys. 42). Pozwala to na wybór najpopularniejszych metod produkcji wodoru.



Rys. 42. Procentowy udział metod produkcji wodoru w skali globalnej w 2023 roku

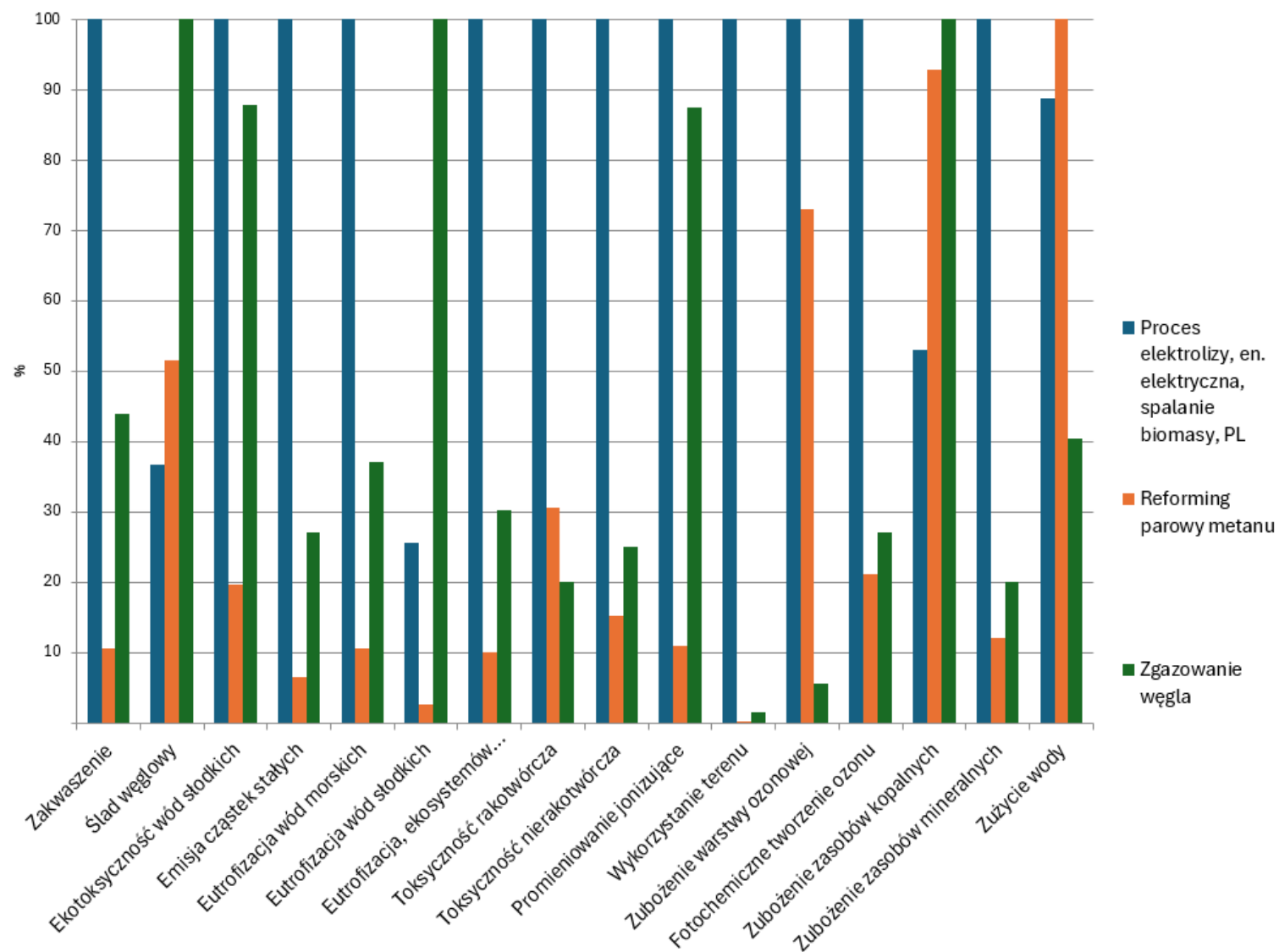
Scenariuszem bazowym przyjętym w niniejszej pracy jest produkcja wodoru w procesie elektrolizy zasilanej energią elektryczną wytwarzaną ze spalania biomasy (zrębki drzewnej i trocin). Scenariusz ten został porównany z dwoma najpowszechniej stosowanymi obecnie metodami produkcji wodoru: reformingiem parowym gazu ziemnego (SMR, ang. Steam Methane Reforming) oraz zgazowaniem węgla. Obie te metody odpowiadają za ponad 80% globalnej produkcji wodoru, co przedstawiono w na rysunku 42. Według danych Międzynarodowej Agencji Energetycznej, w 2023 roku około 62% światowej produkcji wodoru pochodziło z reformingu parowego gazu ziemnego, około 19% ze zgazowania węgla,

około 18% stanowił wodór z procesów petrochemicznych i chemicznych, natomiast elektroliza wody odpowiadała za mniej niż 1% globalnej produkcji [70].

Przeprowadzono analizę porównawczą LCA trzech metod produkcji wodoru: reformingu parowego gazu ziemnego, gazyfikacji węgla oraz elektrolizy wody zasilanej energią elektryczną wytwarzaną ze spalania biomasy (scenariusz bazowy przyjęty w niniejszej pracy). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 45–46 oraz na rysunkach 43–44.

Tab. 45. Wyniki oceny oddziaływania środowiskowego produkcji wodoru różnymi metodami

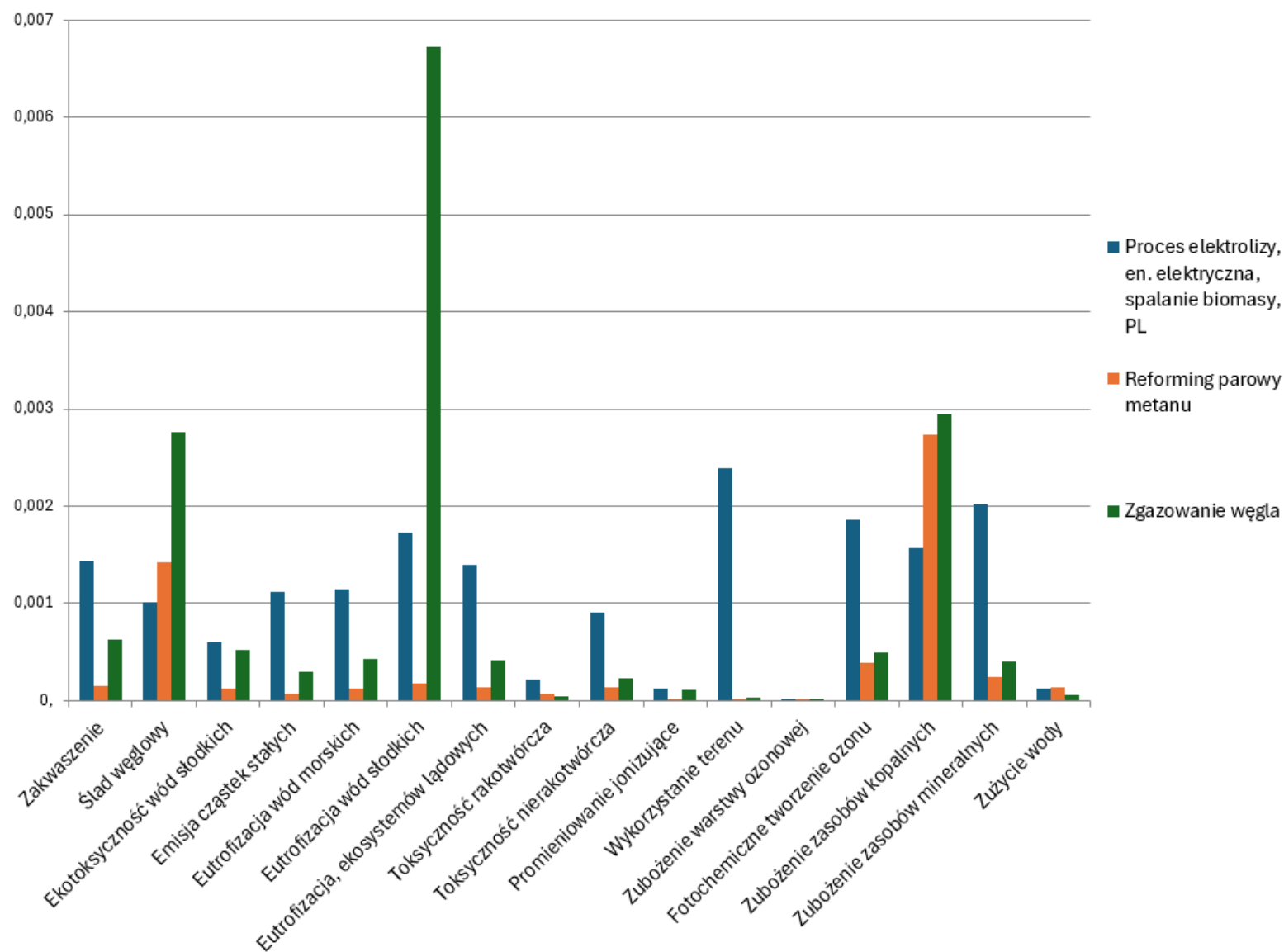
Kategoria wpływu	Jednostka	Proces elektrolizy, en. elektryczna, spalanie	Reforming parowy metanu	Zgazowanie węgla
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	0,0802	0,00856	0,0352
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	7,67	10,7	20,9
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	33,9	6,7	29,8
Emisja cząstek stałych	disease inc.	6,64E-7	4,33E-8	1,8E-7
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	0,0225	0,00239	0,00832
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	0,00277	0,000277	0,0108
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,246	0,0249	0,0742
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	CTUh	3,67E-9	1,12E-9	7,34E-10
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	CTUh	1,17E-7	1,79E-8	2,94E-8
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	0,544	0,0599	0,476
Wykorzystanie terenu	Pt	1,96E3	3,49	28,4
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	6,8E-7	4,96E-7	3,75E-8
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	0,0759	0,016	0,0205
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	102	178	192
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	0,000128	1,54E-5	2,57E-5
Zużycie wody	m ³ depriv.	1,4	1,58	0,638



Rys. 43. Wyniki oceny oddziaływania środowiskowego produkcji wodoru różnymi metodami

Tab. 46. Wyniki wpływu różnych metod produkcji wodoru na środowisko (normalizacja)

Kategoria wpływu	Jednostka	Proces elektrolizy, en. elektryczna, spalanie	Reforming parowy metanu	Zgazowanie węgla
Zakwaszenie	-	0,00144	0,000154	0,000634
Ślad węglowy	-	0,00102	0,00142	0,00276
Ekotoksyczność wód słodkich	-	0,000598	0,000118	0,000525
Emisja cząstek stałych	-	0,00112	7,27E-5	0,000303
Eutrofizacja wód morskich	-	0,00115	0,000122	0,000425
Eutrofizacja wód słodkich	-	0,00172	0,000173	0,00672
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	0,00139	0,000141	0,00042
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	0,000212	6,5E-5	4,25E-5
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	0,00091	0,000139	0,000229
Promieniowanie jonizujące	-	0,000129	1,42E-5	0,000113
Wykorzystanie terenu	-	0,00239	4,25E-6	3,46E-5
Zubożenie warstwy ozonowej	-	1,3E-5	9,48E-6	7,16E-7
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	0,00186	0,000393	0,000501
Zubożenie zasobów kopalnych	-	0,00156	0,00274	0,00295
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	0,00202	0,000243	0,000404
Zużycie wody	-	0,000122	0,000138	5,56E-5



Rys. 44. Wyniki wpływu różnych metod produkcji wodoru na środowisko (normalizacja)

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że elektroliza zasilana energią elektryczną ze spalania biomasy prowadzi do zmniejszenia emisji CO₂. Generuje około 28% mniej dwutlenku węgla niż reforming parowy gazu ziemnego oraz około 63% mniej niż zgazowanie węgla. Jednocześnie metoda ta osiąga najwyższe wartości w wielu innych kategoriach oddziaływań środowiskowych, takich jak „zakwaszenie”, „ekotoksyczność wód słodkich”, „eutrofizacja”, „emisja cząstek stałych”, „toksyczność dla ludzi”, „użytkowanie terenu”, „tworzenie ozonu fotochemicznego” oraz „zużycie zasobów mineralnych i metali”. Wynika to głównie z konieczności pozyskiwania dużych ilości biomasy w postaci zrębki drzewnej i trocin, emisji powstających podczas jej spalania oraz zapotrzebowania na metale szlachetne i surowce krytyczne wykorzystywane w elektrolizerach.

Reforming parowy gazu ziemnego, mimo że jest powszechnie uznawany za metodę o dużym wpływie środowiskowym [144], w tej analizie wykazuje stosunkowo niskie wartości w większości kategorii. Wyższe obciążenia pojawiają się jednak w zakresie „zubożenia warstwy ozonowej” oraz „zużycia wody”. Jest to związane ze specyfiką procesu, w którym para wodna stanowi jeden z głównych surowców, a dodatkowe ilości wody są wykorzystywane do chłodzenia oraz wytwarzania pary technologicznej [145].

Zgazowanie węgla wpływa najbardziej na obciążenia w kategoriach bezpośrednio związanych z wydobyciem i spalaniem surowca, takich jak „ślad węglowy”, „eutrofizacja wód słodkich” oraz „zużycie paliw kopalnych”. Metoda ta charakteryzuje się także najwyższą emisją CO₂ na jednostkę wyprodukowanego wodoru spośród analizowanych technologii.

Wybór optymalnej środowiskowo metody zależy od przyjętego kryterium oceny. Jeśli priorytetem jest redukcja emisji CO₂, najkorzystniej wyniki osiąga elektroliza zasilana energią z biomasy. Jednak przy uwzględnieniu szerszej kategorii oddziaływań tj. „zużycie zasobów mineralnych i metali” czy „wykorzystanie terenu”, to przewaga tej technologii przestaje być oczywista. Ostateczna decyzja przy wyborze odpowiedniej środowisko metody do produkcji zależy od czynników tj. uwarunkowania lokalne czy struktura miksu energetycznego.

10.4. Analiza porównawcza wyników analizy scenariuszowej

W ostatnim etapie na podstawie wyników uzyskanych w analizach własnych w rozdziałach 10.1-10.3 zestawiono porównanie pięciu scenariuszy, które uwzględniają różne typy napędów, różne typy paliw, a także metody produkcji wodoru oraz miks energetyczny polski. Na pięć scenariuszy składają się:

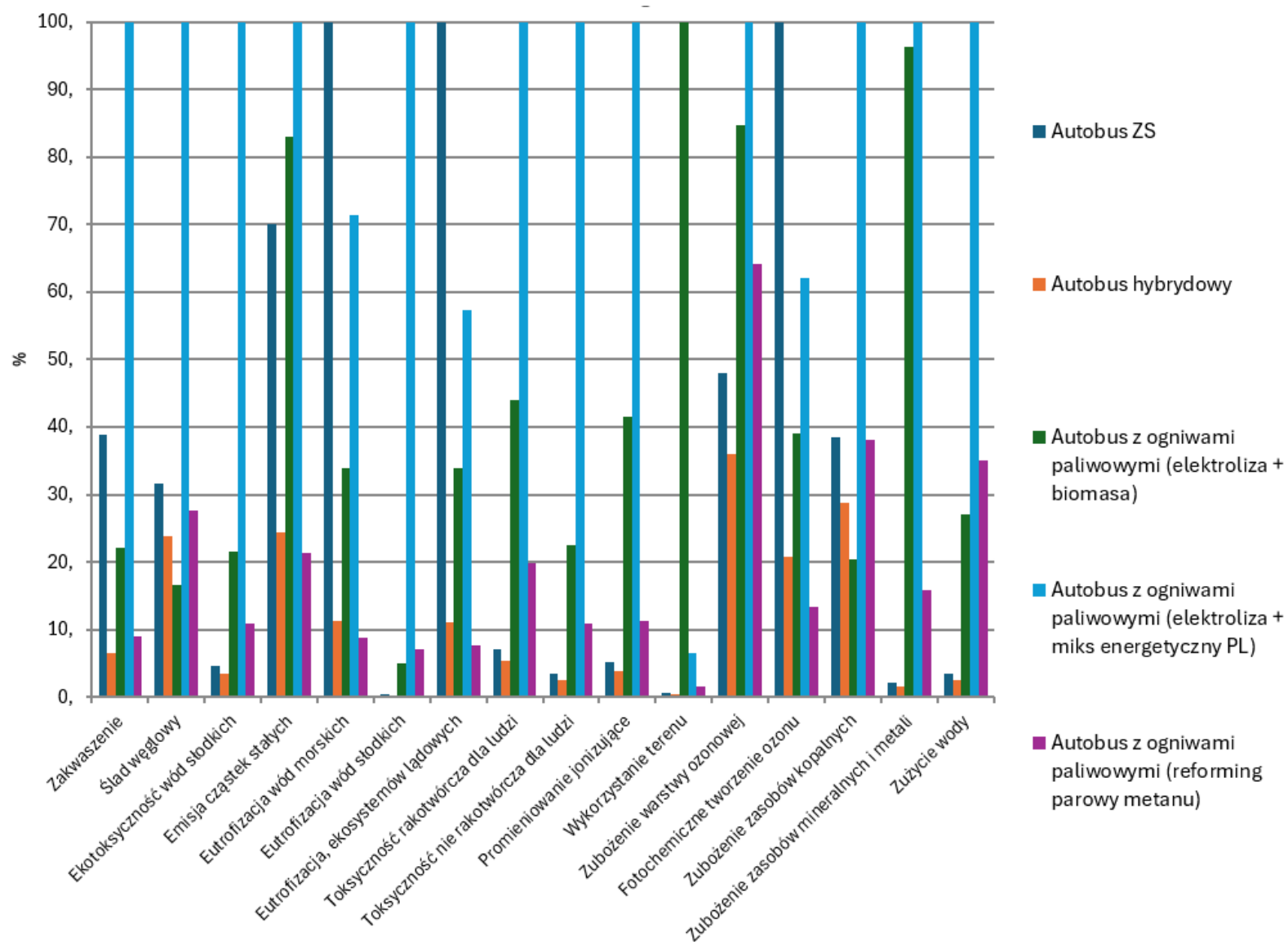
- autobus z silnikiem ZS wykorzystujący olej napędowy;
- autobus hybrydowy wykorzystujący olej napędowy;
- autobus z ogniwami paliwowymi zasilany wodorem z procesu elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną pochodzącą ze spalania biomasy;
- autobus z ogniwami paliwowymi zasilany wodorem z procesu elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną pochodzącą z polskiego miksu energetycznego;
- autobus z ogniwami paliwowymi zasilany wodorem z reformingu parowego metanu;

Wyniki zostaną przedstawione w dwóch fazach: oceny szkód oraz normalizacji.

Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 47–48 oraz na rysunkach 45–46.

Tab. 47. Wyniki oceny oddziaływania środowiskowego pięciu scenariuszy analizy cyklu życia

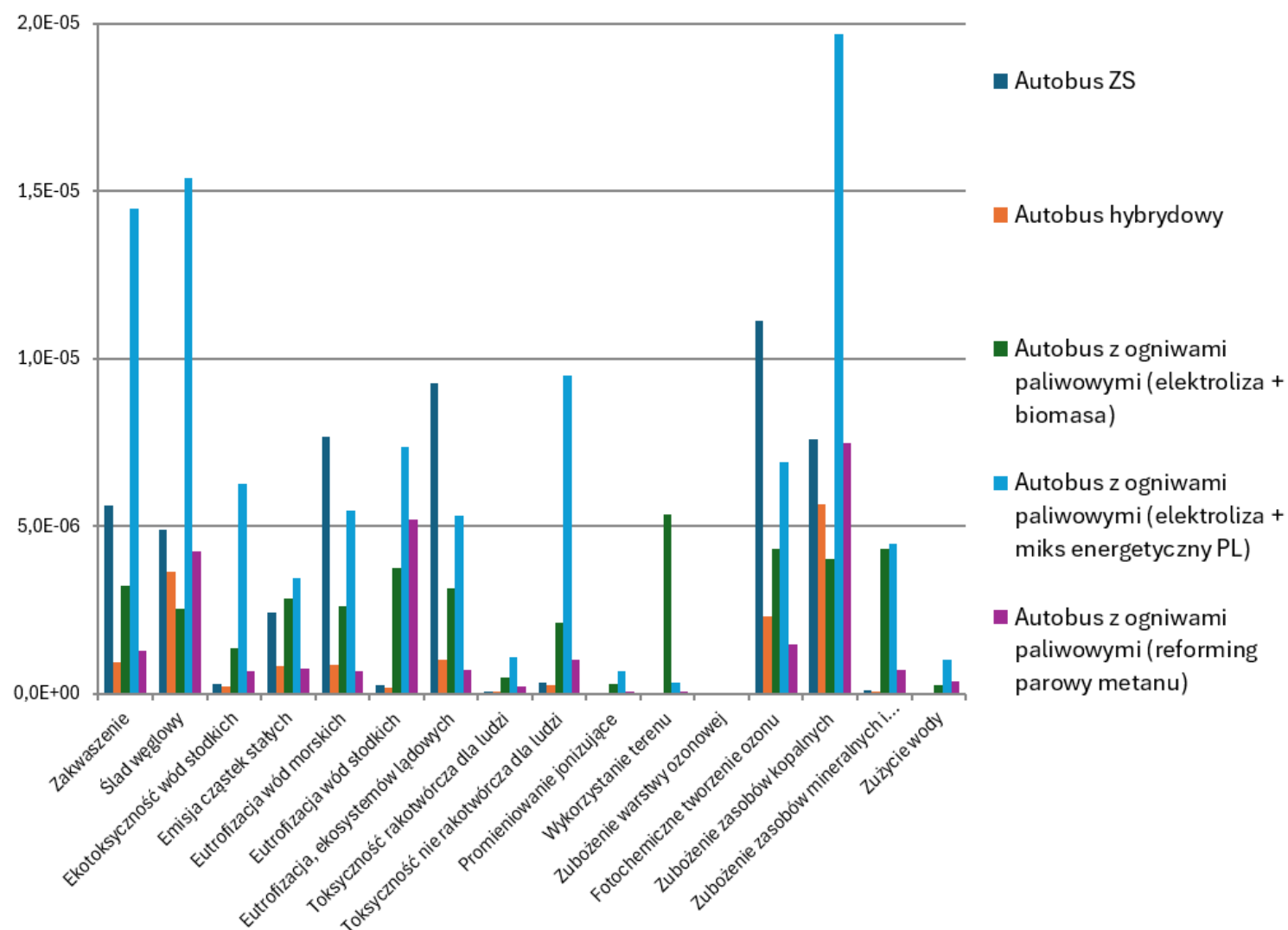
Kategoria wpływu	Jednostka	Autobus ZS	Autobus hybrydowy	Autobus z ogniwami paliwowymi (elektroliza + biomasa)	Autobus z ogniwami paliwowymi (elektroliza + miks energetyczny PL)	Autobus z ogniwami paliwowymi (reforming parowy metanu)
Zakwaszenie	mol H ⁺ eq	3,12E-04	5,23E-05	1,79E-04	8,05E-04	7,23E-05
Ślad węglowy	kg CO ₂ eq	0,0369	0,0276	0,0192	0,116	0,0321
Ekotoksyczność wód słodkich	CTUe	0,0165	0,0123	0,0762	0,355	0,0386
Emisja cząstek stałych	disease inc.	1,44E-09	4,99E-10	1,70E-09	2,05E-09	4,40E-10
Eutrofizacja wód morskich	kg N eq	1,50E-04	1,68E-05	5,09E-05	1,07E-04	1,31E-05
Eutrofizacja wód słodkich	kg P eq	4,02E-07	2,97E-07	6,01E-06	1,18E-04	8,35E-06
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	mol N eq	0,00164	1,82E-04	5,57E-04	9,40E-04	1,25E-04
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	CTUh	1,34E-12	9,98E-13	8,25E-12	1,87E-11	3,70E-12
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	CTUh	4,18E-11	3,11E-11	2,74E-10	1,22E-09	1,34E-10
Promieniowanie jonizujące	kBq U-235 eq	1,51E-04	1,12E-04	0,00121	0,00292	3,27E-04
Wykorzystanie terenu	Pt	0,0253	0,0189	4,38	0,288	0,0642
Zubożenie warstwy ozonowej	kg CFC11 eq	8,42E-10	6,29E-10	1,48E-09	1,75E-09	1,12E-09
Fotochemiczne tworzenie ozonu	kg NMVOC eq	4,54E-04	9,46E-05	1,77E-04	2,82E-04	6,03E-05
Zubożenie zasobów kopalnych	MJ	0,493	0,368	0,261	1,28	0,487
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	kg Sb eq	5,86E-09	4,24E-09	2,75E-07	2,86E-07	4,51E-08
Zużycie wody	m ³ depriv.	4,00E-04	2,96E-04	0,00314	0,0116	0,00407



Rys. 45. Wyniki oceny oddziaływania środowiskowego pięciu scenariuszy analizy cyklu życia

Tab. 48. Wyniki oddziaływania środowiskowego pięciu scenariuszy analizy cyklu życia (normalizacja).

Kategoria wpływu	Jednostka	Autobus ZS	Autobus hybrydowy	Autobus z ogniwami paliwowymi (elektroliza + biomasa)	Autobus z ogniwami paliwowymi (elektroliza + miks energetyczny PL)	Autobus z ogniwami paliwowymi (reforming parowy metanu)
Zakwaszenie	-	5,62E-06	9,42E-07	3,21E-06	1,45E-05	1,30E-06
Ślad węglowy	-	4,88E-06	3,66E-06	2,54E-06	1,54E-05	4,24E-06
Ekotoksyczność wód słodkich	-	2,91E-07	2,17E-07	1,34E-06	6,26E-06	6,81E-07
Emisja cząstek stałych	-	2,41E-06	8,38E-07	2,86E-06	3,44E-06	7,38E-07
Eutrofizacja wód morskich	-	7,66E-06	8,59E-07	2,60E-06	5,47E-06	6,69E-07
Eutrofizacja wód słodkich	-	2,50E-07	1,85E-07	3,74E-06	7,37E-05	5,20E-06
Eutrofizacja, ekosystemów lądowych	-	9,26E-06	1,03E-06	3,15E-06	5,32E-06	7,06E-07
Toksyczność rakotwórcza dla ludzi	-	7,76E-08	5,79E-08	4,78E-07	1,09E-06	2,15E-07
Toksyczność nie rakotwórcza dla ludzi	-	3,25E-07	2,41E-07	2,13E-06	9,48E-06	1,04E-06
Promieniowanie jonizujące	-	3,58E-08	2,64E-08	2,88E-07	6,92E-07	7,75E-08
Wykorzystanie terenu	-	3,09E-08	2,31E-08	5,35E-06	3,52E-07	7,84E-08
Zubożenie warstwy ozonowej	-	1,61E-08	1,20E-08	2,83E-08	3,35E-08	2,15E-08
Fotochemiczne tworzenie ozonu	-	1,11E-05	2,31E-06	4,33E-06	6,90E-06	1,48E-06
Zubożenie zasobów kopalnych	-	7,58E-06	5,66E-06	4,01E-06	1,97E-05	7,49E-06
Zubożenie zasobów mineralnych i metali	-	9,22E-08	6,66E-08	4,33E-06	4,49E-06	7,09E-07
Zużycie wody	-	3,49E-08	2,58E-08	2,73E-07	1,01E-06	3,54E-07



Rys. 45. Wyniki oddziaływania środowiskowego pięciu scenariuszy analizy cyklu życia (normalizacja)

Wyniki przeprowadzonej analizy porównawczej pięciu scenariuszy wskazują, że eksploatacja autobusu z ogniwami paliwowymi na wodór z elektrolizy zasilaną energią elektryczną z polskiego miks energetycznego ma najwyższe wskaźniki środowiskowe spośród wszystkich analizowanych scenariuszy. Ten scenariusz najbardziej obciąża środowisko w 13 z 16 kategorii oddziaływań, m.in. w kategorii „zubożenia zasobów kopalnych”, „ślądu węglowego”, oraz „zakwaszenia”. Wynika to z wysokiego udziału paliw kopalnych w polskim miksie energetycznym. „Ślad węglowy” w tym scenariuszu jest o około 214% wyższy niż w przypadku autobusu z napędem o zapłonie samoczynnym (ZS) oraz o około 504% wyższy niż w przypadku autobusu z ogniwem paliwowym zasilanym wodorem z procesu elektrolizy, zasilanej energią elektryczną ze spalania biomasy.

Autobus z ogniwem paliwowym zasilanym wodorem z elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną z biomasy, charakteryzuje się najniższym śladem węglowym. Jednocześnie ten scenariusz negatywnie wpływa na kategorie „wykorzystania terenu” oraz „zubożenia zasobów mineralnych i metali”. Wynika to z potrzeby uprawy terenów leśnych pod produkcję biomasy oraz z zapotrzebowania na metale szlachetne, które są wykorzystywane w ogniwach paliwowych i elektrolizerach.

„Ślad węglowy” autobusu z ogniwem paliwowym zasilanym wodorem z reformingu parowego metanu jest niższy o około 13%, w porównaniu z autobusem z silnikiem ZS. Autobus hybrydowy wykazuje natomiast najbardziej zrównoważony profil środowiskowy. Nie dominuje w żadnej z analizowanych kategorii i umiarkowanie wpływa na środowisko.

Podsumowując, sposób produkcji wodoru oraz pochodzenie energii elektrycznej ma decydujące znaczenie dla końcowego wyniku środowiskowej oceny cyklu życia wodoru w transporcie drogowym. Eksploatacja autobusów z ogniwami paliwowymi może wpływać znacznie bardziej negatywnie na środowisko, niż eksploatacja autobusów z silnikiem ZS. Dotyczy to przypadku, gdy wodór jest produkowany za pomocą procesu elektrolizy, która zasilana jest energią elektryczną pochodzącą z paliw kopalnych. Dlatego uzyskanie korzyści środowiskowych wymaga wykorzystania energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych.

11. Podsumowanie i wnioski

Niniejsza rozprawa stanowi pierwsze w Polsce kompleksowe opracowanie analizy cyklu życia (LCA) wodoru jako paliwa alternatywnego oraz autobusu z ogniwami paliwowymi, oparte na rzeczywistych danych eksploatacyjnych w warunkach krajowych. Przeprowadzone badania objęły zarówno cykl życia paliwa w ujęciu Well-to-Wheel, jak i pełny cykl życia pojazdu w ujęciu Cradle-to-Grave, a także zostały określone kluczowe determinanty wpływające na środowisko, co zostało określone w celu pracy.

Do oceny środowiskowej zastosowano metodę śladu środowiskowego EF, która jest metodą nową i rekomendowaną przez Komisję Europejską. Umożliwia ona analizę wyników dla 16 kategorii szkód wpływających na środowisko. Obliczenia wykonano w oprogramowaniu SimaPro z bazą Ecoinvent 3.11. Przyjęto jednostkę funkcjonalną jako pasażerokilometr, która pozwoliła na odzwierciedlenie obciążenia pasażerskiego. Wiarygodność wyników potwierdzono analizą niepewności metodą Monte Carlo.

Wykonano trzy analizy scenariuszowe, które obejmowały:

- wpływ paliw wykorzystywanych w transporcie autobusowym na środowisko,
- wpływ różnych metod produkcji wodoru na środowisko,
- wpływ różnych źródeł energii elektrycznej, która zasila proces elektrolizy, do produkcji wodoru.

W pracy postawiono pytanie badawcze: Czy zastosowanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie autobusowym prowadzi do ograniczenia negatywnego oddziaływania środowiskowego w całym cyklu życia? Na podstawie opracowanej metodyki badawczej, wykonanych badań oraz przedstawionych analiz stwierdzono, że problem badawczy został rozwiązany, a cel rozprawy osiągnięty.

W pracy sformułowano następującą tezę: **Oddziaływanie środowiskowe w cyklu życia autobusu elektrycznego z ogniwami paliwowymi jest zależne od metod produkcji wodoru oraz źródeł wykorzystywanej energii elektrycznej.** Wykonane badania udowodniły postawioną tezę.

Wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie autobusowym może wspomóc proces dekarbonizacji w tym sektorze, ale ostateczne oddziaływanie środowiskowe zależy od metody produkcji wodoru, jak i źródła wykorzystywanej energii elektrycznej. W

cyklu życia pojazdu te etapy w największym stopniu wpływały negatywnie na środowisko w prawie wszystkich kategoriach.

Wniosek ten potwierdza również, że ocena środowiskowa autobusów z ogniwami paliwowymi, nie powinna ograniczać się do analizy samego pojazdu, lecz powinna uwzględniać produkcję paliwa oraz lokalne uwarunkowania energetyczne.

Na podstawie wykonanych badań wysunięto następujące wnioski szczegółowe:

- Autobus z ogniwami paliwowymi wykazał najmniejszy wpływ na emisję gazów cieplarnianych w porównaniu z autobusem o napędzie hybrydowym (różnica ok. 30%) i z silnikiem ZS (różnica ok. 40%). Autobus z ogniwami paliwowymi wykorzystywał wodór powstały w procesie elektrolizy. Elektroliza była zasilana energią elektryczną pochodzącą ze spalania biomasy.
- Na podstawie badań wykazano, że wybór metody produkcji wodoru ma wpływ na oddziaływanie środowiskowe. Analiza wykazała, że wodór produkowany w procesie elektrolizy, zasilanej energią elektryczną pochodzącą ze spalania biomasy ma najniższe emisje gazów cieplarnianych, w porównaniu z metodą produkcji wodoru z reformingu parowego metanu (emisja GHG niższa o około 28%) oraz zgazowania węgla (emisja GHG niższa o około 63%).
- Wytwarzanie energii elektrycznej ze spalania biomasy ma negatywny wpływ na zakwaszenie środowiska oraz wykorzystanie terenów leśnych do pozyskiwania zrębki drzewnej. Ponadto metoda elektrolizy ma wysoki wpływ na kategorię wydobycia minerałów i metali, co wynika z wykorzystania metali szlachetnych m.in. platyny do budowy stosów elektrolizera.
- Wykazano, że na środowisko istotny wpływ ma również źródło energii elektrycznej wykorzystywanej do produkcji wodoru. Na podstawie wyników stwierdzono, że scenariusz uwzględniający eksploatację autobusu z ogniwami paliwowymi zasilanymi wodorem z elektrolizy, do której wykorzystywana jest energia elektryczna z polskiego miksu energetycznego, powodował znaczne obciążenia środowiskowe. Wykazał on największy negatywny wpływ na 13 z 16 analizowanych kategorii wpływu. W związku z tym wykorzystanie autobusów z ogniwami paliwowymi nie zawsze jest najbardziej korzystnym rozwiązaniem. Przy wyborze autobusów do floty miejskiej należy wziąć pod uwagę lokalne warunki energetyczne. Krajowe miksy energetyczne oparte na

odnawialnych źródeł energii oraz na energii jądrowej umożliwiają ograniczenie emisji gazów cieplarnianych.

- Dodatkowo analiza wrażliwości zmian temperatury na zużycie paliwa wskazała, że różnica zużycia paliwa w autobusach z ogniwami paliwowymi między najcieplejszym i najzimniejszym miesiącem wynosiła około 40%. Jest to związane z pracą systemów elektronicznych oraz zużyciem energii niezbędnej do ogrzania i schłodzenia pojazdu.
- Na podstawie analizy środowiskowej produkcji autobusu wykazano, że o wpływie środowiskowym produkcji nie decyduje masa poszczególnych części, lecz rodzaj użytych materiałów. Podzespoły o niewielkiej masie w skali całego pojazdu, takie jak układy elektroniczne czy ogniwo wodorowe, mogą w większym stopniu wpływać na poziom oddziaływania środowiskowego niż elementy konstrukcyjne pojazdu.

Wnioski utylitarne

Wykonane analizy środowiskowe LCA wodoru jako paliwa alternatywnego w autobusach z ogniwami paliwowymi mogą mieć również zastosowanie do innych środków transportu drogowego, które wykorzystują wodór. W tym celu można wykorzystać cykl życia wodoru, uwzględniając etap produkcji wodoru, natomiast na etapie eksploatacji danego środka transportu uwzględnić ilość zużycia paliwa. Etap produkcji danego pojazdu będzie zależał od jego składu materiałowego.

Wykonane analizy LCA uwzględniają lokalne warunki energetyczne, dlatego mogą one stanowić praktyczne narzędzie wspierające planowanie rozwoju transportu publicznego w polskich miastach. Ma to szczególne znaczenie w ramach wymagań wynikających z funkcjonujących przepisów i regulacji, w tym Dyrektywy 2009/33/WE [105] oraz krajowej Ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych z 21 listopada 2024 roku [42]. Przepisy te zobowiązują operatorów do stopniowego ograniczania emisyjności floty. Opracowana analiza pozwoli podejmować decyzje inwestycyjne w oparciu o pełną ocenę środowiskową, a nie tylko o emisje bezpośrednie z eksploatacji.

Wyniki analiz wskazują, że inwestycje związane z zakupem autobusów z ogniwami paliwowymi powinny być prowadzone razem z rozwojem lokalnej produkcji wodoru, w tym energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych. W przeciwnym razie korzyści środowiskowe z wykorzystania tej technologii mogą być ograniczone.

Wytyczne opracowane na podstawie wyników rozprawy mogą być wykorzystane przy tworzeniu kryteriów środowiskowych w przetargach na zakup autobusów miejskich. Pozwoli to uwzględnić pełny cykl życia pojazdu i paliwa, a nie tylko parametry techniczne pojazdu.

Wnioski prognostyczne

Opracowane w pracy zalecenia i wytyczne mogą stanowić narzędzie wspomagające wybór technologii napędu w transporcie publicznym. Uwzględniają również lokalne uwarunkowania energetyczne, infrastrukturalne i transportowe. Dzięki temu mogą być dostosowywane do innych miast w Polsce oraz w innych krajach UE. W związku z tym wyniki rozprawy mają zastosowanie wykraczające poza badany przypadek floty autobusowej.

Zgodnie z nowymi wymaganiami Komisji Europejskiej dotyczącymi Cyfrowych Paszportów Produktów [143] producenci są zobowiązani do wykazywania wpływu środowiskowego produktów w całym cyklu życia. Obowiązek ten obejmuje także środki transportu, a w szczególności montowane w nich akumulatory. Opracowany model LCA może być rozszerzany o kolejne podzespoły lub aktualizowany wraz ze zmianami w strukturze miksu energetycznego.

Wykonane analizy mogą również służyć jako podstawa do wyznaczania śladu węglowego organizacji w sektorze transportu na potrzeby raportowania zrównoważonego rozwoju (ESG, ang. Environmental, Social, and Governance). Operatorzy transportu publicznego coraz częściej zobowiązani są do raportowania emisji w zakresach 1, 2 oraz 3 zgodnie z protokołem GHG. Wykonane analizy w rozprawie pozwalają na uwzględnienie emisji pośrednich wynikających z produkcji paliwa oraz wytwarzania pojazdu.

Bibliografia

- [1] IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Lee, H., Romero, J., Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2023; p 36.
- [2] European Environment Agency. Greenhouse Gas Emissions from Transport in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport> (dostęp: 15.10.2024).
- [3] Ritchie, H. Cars, Planes, Trains: Where Do CO2 Emissions from Transport Come From? Our World in Data. <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport> (dostęp: 22.09.2024).
- [4] European Commission. Climate Action Progress Report 2023. https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/climate-action-progress-report-2023-2023-10-24_en (dostęp: 05.11.2024).
- [5] International Energy Agency. Transport. IEA. <https://www.iea.org/energy-system/transport> (dostęp: 28.10.2024).
- [6] European Hydrogen Observatory. Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/index.php/hydrogen-landscape/end-use/hydrogen-fuel-cell-electric-vehicles> (dostęp: 21.04.2025).
- [7] European Environment Agency. New Registrations of Electric Vehicles in Europe. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/new-registrations-of-electric-vehicles> (dostęp: 23.04.2025).
- [8] Polski Związek Przemysłu Motoryzacyjnego. Licznik Elektromobilności – Sierpień 2025. <https://www.pzpm.org.pl/pl/Elektromobilnosc/Licznik-Elektromobilnosci/Sierpien-2025> (dostęp: 23.04.2025).
- [9] European Hydrogen Observatory. Hydrogen Refuelling Stations. <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/hydrogen-landscape/distribution-and-storage/hydrogen-refuelling-stations> (dostęp: 23.04.2025).
- [10] Transport & Environment. State of European Transport 2024. <https://www.transportenvironment.org/discover/state-of-european-transport-2024/> (dostęp: 24.04.2025).
- [11] European Environment Agency. Sustainability of Europe's Mobility Systems: Climate. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/sustainability-of-europes-mobility-systems/climate> (dostęp: 24.04.2025).
- [12] European Parliament. Climate Change: The Greenhouse Gases Causing Global Warming. <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230316STO77629/climate-change-the-greenhouse-gases-causing-global-warming> (dostęp: 24.04.2025).
- [13] Świstocka, R.; Świderski, G.; Lewandowski, W.; Kurowska, I.; Konopko, A. Globalne Ocieplenie – Przyczyny, Skutki oraz Zapobieganie Zmianom Klimatu. *Bud. Inż. Środowiska* **2015**, 6 (3), 119–130.
- [14] Paltsev, S.; Chen, Y.-H. H.; Karplus, V. J.; Kishimoto, P.; Reilly, J. M.; Löschel, A.; von Graevenitz, K.; Koesler, S. Reducing CO2 from Cars in the European Union. *Transportation* **2018**, 45 (2), 573–595. <https://doi.org/10.1007/s11116-016-9741-3>.

- [15] Crippa, M.; Guizzardi, D.; Banja, F.; Schaaf, M.; Becker, E.; Ferrario, M.; Quadrelli, F.; Martin, R.; Grassi, J.; Rossi, G.; et al. *GHG Emissions of All World Countries*; JRC Science for Policy Report; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2023.
- [16] Organizacja Narodów Zjednoczonych. Ramowa konwencja Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu; Nowy Jork, 9 maja 1992; Dz.U. 1996, nr 53, poz. 238.
- [17] Organizacja Narodów Zjednoczonych. Protokół z Kioto do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu; Kioto, 11 grudnia 1997; Dz.U. 2005, nr 203, poz. 1684.
- [18] Organizacja Narodów Zjednoczonych. Porozumienie paryskie do Ramowej konwencji Narodów Zjednoczonych w sprawie zmian klimatu; Paryż, 12 grudnia 2015; Dz.U. 2017, poz. 36.
- [19] The European Clean Hydrogen Alliance. *Reports of the Alliance Roundtables on Barriers and Mitigation Measures*; European Commission: Brussels, October 2021. https://single-market-economy.ec.europa.eu/system/files/2021-11/ECH2A%20RTs%20reports%20on%20barriers%20and%20mitigation%20measures_FIN_AL.pdf (dostęp: 25.04.2025).
- [20] European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal*; COM(2019) 640 final; European Commission: Brussels, Dec 11, 2019.
- [21] Burchart, D.; Przytuła, I. Review of Environmental Life Cycle Assessment for Fuel Cell Electric Vehicles in Road Transport. *Energies* **2025**, *18*, 1229. <https://doi.org/10.3390/en18051229>.
- [22] European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. 'Fit for 55': Delivering the EU's 2030 Climate Target on the Way to Climate Neutrality*; COM(2021) 550 final; European Commission: Brussels, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52021DC0550> (dostęp: 30.04.2025).
- [23] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Promotion of the Use of Energy from Renewable Sources, PE/48/2018/REV/1. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng> (dostęp: 30.04.2025).
- [24] Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure, and Repealing Directive 2014/94/EU, PE/25/2023/INIT. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj/eng> (dostęp: 30.04.2025).
- [25] Lilico, A.; Drury, D. *The EU Emissions Trading System: Method and Effects of Free Allowance Allocation—In-Depth Analysis*; European Parliament, Directorate-General for Internal Policies of the Union; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2023. <https://data.europa.eu/doi/10.2861/714225> (dostęp: 30.04.2025).
- [26] Directive (EU) 2024/1788 of the European Parliament and of the Council on Common Rules for the Internal Markets for Renewable Gas, Natural Gas and Hydrogen, Amending Directive (EU) 2023/1791 and Repealing Directive 2009/73/EC. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32024L1788> (dostęp: 30.04.2025).
- [27] Regulation (EU) 2022/869 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2022 on Guidelines for Trans-European Energy Infrastructure, Amending Regulations (EC) No

715/2009, (EU) 2019/942 and (EU) 2019/943 and Directives 2009/73/EC and (EU) 2019/944, and Repealing Regulation (EU) No 347/2013, PE/2/2022/REV/1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32022R0869> (dostęp: 30.04.2025).

[28] Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the Establishment of a Framework to Facilitate Sustainable Investment, and Amending Regulation (EU) 2019/2088, PE/20/2020/INIT. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/eng> (dostęp: 30.04.2025).

[29] European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A New Circular Economy Action Plan for a Cleaner and More Competitive Europe*; COM(2020) 98 final; European Commission: Brussels, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0098> (dostęp: 30.04.2025).

[30] European Commission. *Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe*; COM(2020) 301 final; European Commission: Brussels, 2020. <https://op.europa.eu/pl/publication-detail/-/publication/5602f358-c136-11ea-b3a4-01aa75ed71a1/language-en> (dostęp: 30.04.2025).

[31] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.*; Ministerstwo Klimatu i Środowiska: Warszawa, 14 stycznia 2021.

[32] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. *Sprawozdanie z działalności Porozumienia sektorowego na rzecz rozwoju gospodarki wodorowej*; Ministerstwo Klimatu i Środowiska: Warszawa, 2024. <https://www.gov.pl/web/klimat/sprawozdanie-z-dzialalnosci-porozumienia-sektorowego-na-rzecz-rozwoju-gospodarki-wodorowej> (dostęp: 30.04.2025).

[33] Agencja Rozwoju Przemysłu S.A. Doliny wodorowe; Agencja Rozwoju Przemysłu S.A.: Warszawa. <https://arp.pl/pl/jak-dzialamy/transformacja-energetyczna-/doliny-wodorowe/> (dostęp: 12.10.2025).

[34] Pilszyk, M.; Juszczak, A.; Gonera, Ł. *Wyścig po wodór. Państwa i ich strategie wodorowe*; Policy Paper No. 5/2023; Polski Instytut Ekonomiczny: Warszawa, 2023. ISBN 978-83-67575-58-4.

[35] H2Poland. Wodorowe autobusy. <https://h2poland.eu/pl/kategorie/transport/wodorowe-autobusy> (dostęp: 11.10.2025).

[36] Główny Urząd Statystyczny. Bank Danych Lokalnych. <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/start> (dostęp: 29.08.2025).

[37] Federal Statistical Office of Germany (Destatis). <https://www.destatis.de> (dostęp: 29.08.2025).

[38] Dyr, T.; Misiurski, P.; Ziółkowska, K. Costs and Benefits of Using Buses Fuelled by Natural Gas in Public Transport. *J. Cleaner Prod.* **2019**, *225*, 1134–1146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.317>.

[39] Pyza, D.; Gołda, P.; Sendek-Matysiak, E. Use of Hydrogen in Public Transport Systems. *J. Cleaner Prod.* **2022**, *335*, 130247. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130247>.

[40] Bethoux, O. Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Art and Perspectives. *Energies* **2020**, *13*, 5843.

[41] Hydrogen Council. *Hydrogen Scaling Up. A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition*; Hydrogen Council, 2017.

- [42] Ustawa z dnia 21 listopada 2024 r. o zmianie ustawy o elektromobilności i paliwach alternatywnych oraz niektórych innych ustaw. Dz.U. 2024, poz. 1853.
- [43] Decarbonation Tech. Vehicle 74. https://www.decarbonation-tech.com/vehicle_74/ (dostęp: 21.09.2025).
- [44] Tokyo Metropolitan Government. Fuel Cell Buses. <https://www.tokyo-h2-navi.metro.tokyo.lg.jp/tonaisuiso/nenryo-denchi-bus> (dostęp: 21.09.2025).
- [45] Grube, T.; Rex, M. *Deployment of Fuel Cell Vehicles in Road Transport and the Expansion of the Hydrogen Refueling Station Network: 2024 Update*; Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Energie & Umwelt, Vol. 645; Institute of Climate and Energy Systems: Jülich, 2024. ISBN 978-3-95806-786-8.
- [46] PAK-PCE Polish Hydrogen Bus Sp. z o.o. *Technical Specification: NesoBus 12*. <https://www.nesobus.pl/en/> (dostęp: 22.09.2025).
- [47] Solaris Bus & Coach Sp. z o.o. *Zero Emissions Powertrains—Product Catalogue 2022/2023*. <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zeroemissions/hydrogen> (dostęp: 22.09.2025).
- [48] Mercedes-Benz Bus. eCitaro Fuel Cell – Facts. https://www.mercedes-benz-bus.com/de_DE/models/ecitaro-fuel-cell/facts (dostęp: 22.09.2025).
- [49] ARTHUR BUS GmbH. Marketing materials. <https://www.arthurbus.com/> (dostęp: 22.09.2025).
- [50] Autosan. Sancity 12LFH. <https://autosan.pl/autobusy-miejskie/sancity-12lfh/> (dostęp: 22.09.2025).
- [51] Haraldsson, K.; Folkesson, A.; Saxe, M.; Alvfors, P. A First Report on the Attitude Towards Hydrogen Fuel Cell Buses in Stockholm. *Int. J. Hydrogen Energy* **2006**, *31* (3), 317–325. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.11.008>.
- [52] EHFCV. BAE Systems Series-ER Powers MBTA Buses. <https://ehfcv.com/bae-systems-series-er-powers-mbta-buses/> (dostęp: 05.10.2025).
- [53] Lucia, U. Overview on Fuel Cells. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2014**, *30*, 164–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.025>.
- [54] Rand, D. A. J.; Dell, R. M. *Hydrogen Energy: Challenges and Prospects*; The Royal Society of Chemistry: Cambridge, U.K., 2007.
- [55] Saikia, K.; Kakati, B. K.; Boro, B.; Verma, A. Current Advances and Applications of Fuel Cell Technologies. In *Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization*; Sarangi, P., Nanda, S., Mohanty, P., Eds.; Springer: Singapore, 2018. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1307-3_13.
- [56] Alaswad, A.; Palumbo, A. V.; Dassisti, M.; Abdelkareem, M. A.; Olabi, A. G. Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide. *Encycl. Smart Mater.* **2022**, *2*, 315–333.
- [57] Uzunoglu, M.; Alam, M. S. Fuel-Cell Systems for Transportations. In *Power Electronics Handbook*; Elsevier, 2018.
- [58] Alazemi, J.; Andrews, J. Automotive Hydrogen Fuelling Stations: An International Review. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2015**, *48*, 483–499. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.085>.

- [59] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. Wiceminister Ireneusz Zyska na otwarciu stacji wodorowej. <https://www.gov.pl/web/klimat/wiceminister-ireneusz-zyska-na-otwarciu-stacji-wodorowej> (dostęp: 16.10.2025).
- [60] HydrogenReady. Stacje tankowania wodoru. <https://hydrogenready.com/stacje-tankowania-wodoru/> (dostęp: 16.10.2025).
- [61] Stacje NesoBus. <https://stacjeneso.pl/> (dostęp: 16.10.2025).
- [62] H2Poland. Mapa inwestycji wodorowych. <https://h2poland.eu/pl/mapa-inwestycji-wodorowych/> (dostęp: 16.10.2025).
- [63] GasHD. Stacje wodorowe w Polsce. <http://gashd.eu/wodor-h2/stacje-wodorowe-w-polsce/> (dostęp: 16.10.2025).
- [64] SAE International. *Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*; SAE Standard J2601_202005; SAE International: Warrendale, PA, Revised May 2020 (Issued March 2010). https://doi.org/10.4271/J2601_202005.
- [65] Bielski Rynek. Stacje tankowania wodoru w Bielsku-Białej powstaną w 2025 roku. https://bielskirynek.pl/pl/11_wiadomosci/6130_stacje-tankowania-wodoru-w-bielsku-bialej-powstana-w-2025-roku.html (dostęp: 16.10.2025).
- [66] International Energy Agency. *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities*; OECD/IEA: Paris, France, 2019.
- [67] Hydrogen Council. *How Hydrogen Empowers the Energy Transition*; Hydrogen Council, 2017.
- [68] Pethaiah, S. S.; Sadasivuni, K. K.; Jayakumar, A.; Ponnammam, D.; Tiwary, C. S.; Sasikumar, G. Methanol Electrolysis for Hydrogen Production Using Polymer Electrolyte Membrane: A Mini-Review. *Energies* **2020**, *13*, 5879. <https://doi.org/10.3390/en13225879>.
- [69] British Petroleum. *Energy Outlook 2020 Edition*; BP, 2020.
- [70] International Energy Agency. *Global Hydrogen Review 2024*; IEA: Paris, France, 2024.
- [71] IRENA. *World Energy Transition Outlook 2022*; International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, 2022.
- [72] Mitrova, T.; Melnikov, Y.; Chugunov, D.; Glagoleva, A. *Hydrogen Economy – Path to the Low-Carbon Development*; Moscow, Russia, 2019.
- [73] IEA. *Global Hydrogen Demand by Sector in the Net Zero Scenario, 2020–2030*; IEA: Paris, France, 2023.
- [74] Molnarne, M.; Schroeder, V. Hazardous Properties of Hydrogen and Hydrogen Containing Fuel Gases. *Process Saf. Environ. Prot.* **2019**, *130*, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.07.012>.
- [75] Izba Gospodarcza Gazownictwa. <https://www.igg.pl/> (dostęp: 03.03.2025).
- [76] ISO 14040:2006. *Environmental Management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework*; International Organization for Standardization: Geneva, 2006.
- [77] ISO 14044:2006. *Environmental Management — Life Cycle Assessment — Requirements and Guidelines*; International Organization for Standardization: Geneva, 2006.
- [78] Hunt, R. G.; Franklin, W. E.; Hunt, R. G. LCA — How It Came About. *Int. J. Life Cycle Assess.* **1996**, *1*, 4–7. <https://doi.org/10.1007/BF02978624>.

- [79] Guinée, J. B.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Zamagni, A.; Masoni, P.; Buonamici, R.; Ekvall, T.; Rydberg, T. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future. *Environ. Sci. Technol.* **2011**, *45* (1), 90–96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>.
- [80] Burchart, D.; Przytuła, I. Carbon Footprint of Electric Vehicles—Review of Methodologies and Determinants. *Energies* **2024**, *17*, 5667. <https://doi.org/10.3390/en17225667>.
- [81] Fołęga, P. *Ocena emisji gazów cieplarnianych w autobusowym transporcie publicznym*; Monografia, Vol. 1028; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej: Gliwice, Poland, 2024.
- [82] Lubecki, A.; Szczurowski, J.; Zarębska, K. A Comparative Environmental Life Cycle Assessment Study of Hydrogen Fuel, Electricity and Diesel Fuel for Public Buses. *Appl. Energy* **2023**, *350*, 121766.
- [83] Gazda-Grzywacz, M.; Grzywacz, P.; Burmistrz, P. Environmental Benefits of Hydrogen-Powered Buses: A Case Study of Coke Oven Gas. *Energies* **2024**, *17*, 5155.
- [84] Ahmadi, P.; Raeesi, M.; Changizian, S.; Teimouri, A.; Khoshnevisan, A. Lifecycle Assessment of Diesel, Diesel-Electric and Fuel Cell Transit Buses under Real Urban Driving Cycles with Fuel Cell Degradation and Battery Aging Using Machine Learning Techniques. *Energy* **2022**, *259*, 125003.
- [85] Jelti, F.; Allouhi, A.; Al-Ghamdi, S. G.; Saadani, R.; Jamil, A.; Rahmoune, M. Environmental Life Cycle Assessment of Alternative Fuels for City Buses: A Case Study in Oujda City, Morocco. *Int. J. Hydrogen Energy* **2021**, *46*, 25308–25319.
- [86] Grazieschi, G.; Zubaryeva, A.; Sparber, W. Energy and Greenhouse Gases Life Cycle Assessment of Electric and Hydrogen Buses: A Real-World Case Study in Bolzano Italy. *Energy Rep.* **2023**, *9*, 6295–6310.
- [87] Iannuzzi, L.; Hilbert, J. A.; Silva Lora, E. E. Life Cycle Assessment (LCA) for Use on Renewable Sourced Hydrogen Fuel Cell Buses vs Diesel Engines Buses in the City of Rosario, Argentina. *Int. J. Hydrogen Energy* **2021**, *46*, 29694–29705.
- [88] Pederzoli, D. W.; Carnevali, C.; Genova, R.; Mazzucchelli, M.; Del Borghi, A.; Gallo, M.; Moreschi, L. Life Cycle Assessment of Hydrogen-Powered City Buses in the High V.LO-City Project: Integrating Vehicle Operation and Refuelling Infrastructure. *SN Appl. Sci.* **2022**, *4*, 57.
- [89] Migliarese Caputi, M. V.; Coccia, R.; Venturini, P.; Cedola, L.; Borello, D. Assessment of Hydrogen and LNG Buses Adoption as Sustainable Alternatives to Diesel Fuel Buses in Public Transportation: Applications to Italian Perspective. *E3S Web Conf.* **2022**, *334*, 09002.
- [90] Ribau, J. P.; Silva, C. M.; Sousa, J. M. C. Efficiency, Cost and Life Cycle CO₂ Optimization of Fuel Cell Hybrid and Plug-in Hybrid Urban Buses. *Appl. Energy* **2014**, *129*, 320–335.
- [91] Skrucany, T.; Kendra, M.; Stopka, O.; Milojević, S.; Figlus, T.; Csiszár, C. Impact of the Electric Mobility Implementation on the Greenhouse Gases Production in Central European Countries. *Sustainability* **2019**, *11*, 4948.
- [92] Sheng, M. S.; Sreenivasan, A. V.; Sharp, B.; Du, B. Well-To-Wheel Analysis of Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption for Electric Vehicles: A Comparative Study in Oceania. *Energy Policy* **2021**, *158*, 112552.
- [93] Burchart-Korol, D.; Jursova, S.; Fołęga, P.; Korol, J.; Pustejovska, P.; Blaut, A. Environmental Life Cycle Assessment of Electric Vehicles in Poland and the Czech Republic. *J. Clean. Prod.* **2018**, *202*, 476–487.

- [94] Wong, E. Y. C.; Ho, D. C. K.; So, S.; Tsang, C.-W.; Chan, E. M. H. Life Cycle Assessment of Electric Vehicles and Hydrogen Fuel Cell Vehicles Using the GREET Model—A Comparative Study. *Sustainability* **2021**, *13*, 4872.
- [95] He, X.; Wang, F.; Wallington, T. J.; Shen, W.; Melaina, M. W.; Kim, H. C.; De Kleine, R.; Lin, T.; Zhang, S.; Keoleian, G. A.; et al. Well-To-Wheels Emissions, Costs, and Feedstock Potentials for Light-Duty Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China in 2017 and 2030. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2021**, *137*, 110477.
- [96] Wang, Q.; Xue, M.; Lin, B.-L.; Lei, Z.; Zhang, Z. Well-To-Wheel Analysis of Energy Consumption, Greenhouse Gas and Air Pollutants Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicle in China. *J. Clean. Prod.* **2020**, *275*, 123061.
- [97] Sadeghi, S.; Ghandehariun, S. Comparative Environmental Assessment of a Gasoline and Fuel Cell Vehicle with Alternative Hydrogen Pathways in Iran. *Int. J. Automot. Eng.* **2020**, *10*, 3266–3280.
- [98] Ren, L.; Zhou, S.; Peng, T.; Ou, X. Greenhouse Gas Life Cycle Analysis of China's Fuel Cell Medium- and Heavy-Duty Trucks under Segmented Usage Scenarios and Vehicle Types. *Energy* **2022**, *249*, 123628.
- [99] Qian, S.; Li, L. A Comparison of Well-To-Wheels Energy Use and Emissions of Hydrogen Fuel Cell, Electric, LNG, and Diesel-Powered Logistics Vehicles in China. *Energies* **2023**, *16*, 5101.
- [100] Qiao, Q.; Zhao, F.; Liu, Z.; Jiang, S.; Hao, H. Comparative Study on Life Cycle CO₂ Emissions from the Production of Electric and Conventional Vehicles in China. *Energy Procedia* **2017**, *105*, 3584–3595.
- [101] Usai, L.; Hung, C. R.; Vásquez, F.; Windsheimer, M.; Burheim, O. S.; Strømman, A. H. Life Cycle Assessment of Fuel Cell Systems for Light Duty Vehicles, Current State-of-the-Art and Future Impacts. *J. Clean. Prod.* **2021**, *280*, 125086.
- [102] Lie, K. W.; Synnevåg, T. A.; Lamb, J. J.; Lien, K. M. The Carbon Footprint of Electrified City Buses: A Case Study in Trondheim, Norway. *Energies* **2021**, *14*, 770.
- [103] Harris, A.; Soban, D.; Smyth, B. M.; Best, R. Assessing Life Cycle Impacts and the Risk and Uncertainty of Alternative Bus Technologies. *Renewable Sustainable Energy Rev.* **2018**, *97*, 569–579.
- [104] Muñoz, P.; Franceschini, E. A.; Levitan, D.; Rodriguez, C. R.; Humana, T.; Correa Perelmuter, G. Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses. *Energy Convers. Manage.* **2022**, *257*, 115412.
- [105] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/33/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania ekologicznie czystych pojazdów transportu drogowego w celu wsparcia mobilności niskoemisyjnej.
- [106] O'Connell, A.; Pavlenko, N.; Bieker, G.; Searle, S. *A Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of European Heavy-Duty Vehicles and Fuels*; International Council on Clean Transportation, 2023. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Lifecycle-assessment-trucks-and-buses-emissions-Europe.pdf> (dostęp: 03.01.2025).
- [107] Eltohamy, H.; van Oers, L.; Lindholm, J.; Raugei, M.; Lokesh, K.; Baars, J.; Husmann, J.; Hill, N.; Istrate, R.; Jose, D.; Tegstedt, F.; Beylot, A.; Menegazzi, P.; Guinée, J.; Steubing, B. Review of Current Practices of Life Cycle Assessment in Electric Mobility: A First Step

Towards Method Harmonization. *Sustainable Prod. Consumption* **2024**, 52, 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.10.026>.

[108] The Public-Private Infrastructure Advisory Facility (PPIAF). Urban Bus Toolkit. <https://www.ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/UrbanBusToolkit/assets/1/1c/1c14.html> (dostęp: 03.01.2025).

[109] Hellekes, J.; Winkler, C. Incorporating Passenger Load in Public Transport Systems and Its Implementation in Nationwide Models. *Procedia Comput. Sci.* **2021**, 184, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.03.022>.

[110] Zalecenie Komisji (UE) 2021/2279 z dnia 15 grudnia 2021 r. w sprawie stosowania metod oznaczania śladu środowiskowego do pomiaru efektywności środowiskowej w cyklu życia produktów i organizacji oraz informowania o niej. https://environment.ec.europa.eu/system/files/2021-12/Commission%20Recommendation%20on%20the%20use%20of%20the%20Environmental%20Footprint%20methods_0.pdf (dostęp: 03.01.2025).

[111] Joint Research Centre. *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European Context*, 1st ed.; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2011. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-Recommendations-for-Life-Cycle-Impact-Assessment-in-the-European-context.pdf> (dostęp: 08.01.2026).

[112] Donaldson, A. *Platform Data Release – Environmental Footprint 3.1 User Documentation*; Simapro, 2023. <https://simapro.com/wp-content/uploads/2023/11/Platform-EF-3.1-Release-User-Documentation.pdf> (dostęp: 10.01.2026).

[113] Fazio, S.; Biganzoli, F.; De Laurentiis, V.; Zampori, L.; Sala, S.; Diaconu, E. *Supporting Information to the Characterisation Factors of Recommended EF Life Cycle Impact Assessment Methods*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018. <https://doi.org/10.2760/002447>.

[114] Bassi, A.; Biganzoli, S.; Ferrara, F.; Amadei, N.; Valente, A.; Sala, A.; Ardente, S. *Updated Characterisation and Normalisation Factors for the Environmental Footprint 3.1 Method*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2023. <https://doi.org/10.2760/798894>.

[115] Crenna, E.; Secchi, M.; Benini, L.; Sala, S. Global Environmental Impacts: Data Sources and Methodological Choices for Calculating Normalization Factors for LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2019**, 24, 1851–1877. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01604-y>.

[116] Rozporządzenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 22 marca 2023 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz.U. 2023, poz. 819.

[117] Bertrand, J. AMConcourse 1115 Speaker 2 Jeremie Bertrand. <https://www.climate-change-solutions.co.uk/wp-content/uploads/2014/09/AMConcourse1115Speaker2JeremieBertrand.pdf> (dostęp: 10.01.2026).

[118] Wernet, G.; Bauer, C.; Steubing, B.; Reinhard, J.; Moreno-Ruiz, E.; Weidema, B. The Ecoinvent Database Version 3 (Part I): Overview and Methodology. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2016**, 21, 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>.

[119] PCR 2016:04 – UN CPC 49112 & 49113. *Product Category Rules: Public and Private Buses and Coaches*.

- [120] Graedel, T. E.; Harper, E. M.; Nassar, N. T.; Reck, B. K. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLOS ONE* **2014**. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
- [121] Helbig, C.; Bradshaw, A. M.; Wietschel, L.; Thorenz, A.; Tuma, A. Environmental Impacts of Rare Earth Production. *MRS Bull.* **2022**. <https://doi.org/10.1557/s43577-022-00286-6>.
- [122] Nuss, P.; Eckelman, M. J. Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. *PLOS ONE* **2014**, 9 (7), e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>.
- [123] Vyavahare, G. C.; et al. Polybutylene Terephthalate (PBT) Blends and Composites: A Review. *Vietnam J. Chem.* **2024**. <https://doi.org/10.1002/vjch.202300177>.
- [124] Jiang, S. P.; et al. Aqueous Tape Casting Technique for the Fabrication of $\text{Sc}_{0.1}\text{Ce}_{0.1}\text{Zr}_{0.89}\text{O}_{2+\delta}$ Ceramic for Electrolyte-Supported Solid Oxide Fuel Cell. *Int. J. Hydrogen Energy* **2019**, 44 (23). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.181>.
- [125] Rubinstein, R. Y.; Kroese, D. P. *Simulation and the Monte Carlo Method*, 10th ed.; John Wiley & Sons, 2016.
- [126] Heijungs, R. On the Number of Monte Carlo Runs in Comparative Probabilistic LCA. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2020**, 25, 394–402. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01698-4>.
- [127] Tan, Y.; Borghi, R.; Tan, R. R. Uncertainty in Inventories for Life Cycle Assessment: State-of-the-Art, Challenges, and New Technologies. *Environ. Prog. Sustainable Energy* **2025**, e14644. <https://doi.org/10.1002/ep.14644>.
- [128] Mendoza Beltran, A.; et al. Life Cycle Assessment under Uncertainty: A Scoping Review. *World* **2022**, 3 (3), 692–717. <https://doi.org/10.3390/world3030039>.
- [129] Pogoda Rybnik. <https://cmx.pogodarybnik.pl/> (dostęp: 18.12.2025).
- [130] U.S. Department of Energy. Fuel Economy in Cold Weather. <https://www.energy.gov/energysaver/fuel-economy-cold-weather> (dostęp: 28.12.2025).
- [131] Göhlich, D.; Fay, T.-A.; Jefferies, D.; Lauth, E.; Kunith, A.; Zhang, X. Design of Urban Electric Bus Systems. *Des. Sci.* **2018**, 4, e15. <https://doi.org/10.1017/dsj.2018.10>.
- [132] Chiriac, G.; Lucache, D. D.; Nițucă, C.; Dragomir, A.; Ramakrishna, S. Electric Bus Indoor Heat Balance in Cold Weather. *Appl. Sci.* **2021**, 11 (24), 11761. <https://doi.org/10.3390/app112411761>.
- [133] Lohse-Busch, H.; Duoba, M.; Rask, E.; Stutenberg, K.; et al. Ambient Temperature (20°F, 72°F and 95°F) Impact on Fuel and Energy Consumption for Several Conventional Vehicles, Hybrid and Plug-In Hybrid Electric Vehicles and Battery Electric Vehicle. SAE 2013 World Congress & Exhibition, Detroit, Michigan, USA, April 16, 2013. <https://doi.org/10.4271/2013-01-1462>.
- [134] Yan, Q.; Toghiani, H.; Lee, Y.-W.; Liang, K.; Causey, H. Effect of Sub-Freezing Temperatures on a PEM Fuel Cell Performance, Startup and Fuel Cell Components. *J. Power Sources* **2006**, 160 (2), 1242–1250. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.02.075>.
- [135] Arat, H.; Çeper, B. Investigation of Instantaneous Temperature Variations in Hydrogen PEM Fuel Cell Stack under Cold Climate Conditions. *Int. J. Hydrogen Energy* **2024**, 107. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.294>.

- [136] Liu, K.; Wang, J.; Yamamoto, T.; Morikawa, T. Exploring the Interactive Effects of Ambient Temperature and Vehicle Auxiliary Loads on Electric Vehicle Energy Consumption. *Appl. Energy* **2018**, *227*, 324–331. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.074>.
- [137] Dyrektywa 2005/55/WE w sprawie homologacji typu pojazdów ciężkich i silników do nich w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń (Euro IV i V).
- [138] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 595/2009 z dnia 18 czerwca 2009 r. dotyczące homologacji typu pojazdów silnikowych i silników w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z pojazdów ciężarowych o dużej ładowności (Euro VI) i zmieniające rozporządzenie (WE) nr 715/2007 i dyrektywę 2007/46/WE oraz uchylające dyrektywy 80/1269/EWG, 2005/55/WE i 2005/78/WE.
- [139] Merkisz, J.; Pielecha, J.; Radzimirski, S. *New Trends in Emission Control in the European Union*; Springer Tracts on Transportation and Traffic, Vol. 4; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-02705-0>.
- [140] International Energy Agency. <https://www.iea.org/> (dostęp: 02.04.2026).
- [141] Le-Boulch, D.; Morisset, V.; Jobard, Z.; Burguburu, A.; Czyrnek-Delêtre, M. M. Life Cycle Assessment of Nuclear Power in France: EDF Case Study. *EPJ Nucl. Sci. Technol.* **2024**, *10*, 8. <https://doi.org/10.1051/epjn/2024005>.
- [142] Smyntek, P. M.; Lamagna, N.; Cravotta, C. A., III; Strosnider, W. H. J. Mine Drainage Precipitates Attenuate and Conceal Wastewater-Derived Phosphate Pollution in Stream Water. *Sci. Total Environ.* **2022**, *815*, 152672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152672>.
- [143] Liu, W.; Zhang, Z.; Xie, X.; Yu, Z.; von Gadow, K.; Xu, J.; Zhao, S.; Yang, Y. Analysis of the Global Warming Potential of Biogenic CO₂ Emission in Life Cycle Assessments. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 39857. <https://doi.org/10.1038/srep39857>.
- [144] Maniscalco, M. P.; Longo, S.; Cellura, M.; Micciché, G.; Ferraro, M. Critical Review of Life Cycle Assessment of Hydrogen Production Pathways. *Environments* **2024**, *11*, 108. <https://doi.org/10.3390/environments11060108>.
- [145] Mehmeti, A.; Angelis-Dimakis, A.; Arampatzis, G.; McPhail, S. J.; Ulgiati, S. Life Cycle Assessment and Water Footprint of Hydrogen Production Methods: From Conventional to Emerging Technologies. *Environments* **2018**, *5*, 24. <https://doi.org/10.3390/environments5020024>.
- [146] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/1781 z dnia 13 czerwca 2024 r. w sprawie ustanowienia ram ustalania wymogów ekoprojektu w odniesieniu do zrównoważonych produktów oraz zmiany dyrektywy (UE) 2020/1828 i rozporządzenia (UE) 2023/1542 i uchylenia dyrektywy 2009/125/WE.

STRESZCZENIE

Światowe problemy środowiskowe, takie jak zmniejszające się zasoby paliw kopalnych i rosnące zanieczyszczenie środowiska, zwiększyły zainteresowanie rozwojem alternatywnych źródeł energii. Szczególne znaczenie ma to w sektorze transportu, który odpowiada za dużą część emisji gazów cieplarnianych. Ograniczenie tych emisji jest jednym z głównych elementów transformacji systemów przewozowych. W związku z tym wodór jest rozpatrywany jako paliwo alternatywne, mogące wspomóc proces dekarbonizacji tego sektora. Praca koncentruje się na eksploatacji autobusów z ogniwami paliwowymi na wodór, ze względu na ich rosnącą popularność we flotach polskich miast.

Głównym celem pracy była środowiskowa ocena cyklu życia wodoru obejmująca zarówno cykl paliwa (ang. Well-to-Wheel), jak i cykl pojazdu (ang. Cradle-to-Grave). Dodatkowo na podstawie wyników zidentyfikowano kluczowe determinanty oddziaływania środowiskowego.

Obliczenia wykonano przy pomocy oprogramowania SimaPro z bazą Ecoinvent 3.11, wykorzystując metodę Environmental Footprint 3.1. Jako jednostkę funkcjonalną przyjęto pasażerokilometr (1 pkm) przy współczynniku obłożenia 35%, a przebieg referencyjny pojazdu ustalono na 800 000 km. Wiarygodność wyników potwierdzono analizą niepewności metodą Monte Carlo. Ponadto przeprowadzono również trzy analizy scenariuszowe: porównanie paliw wykorzystywanych w transporcie autobusowym, porównanie metod produkcji wodoru oraz porównanie źródeł energii elektrycznej zasilających elektrolizę.

W ramach wyników badań stwierdzono, że, wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie autobusowym może wspomóc proces dekarbonizacji w tym sektorze, ale ostateczne oddziaływanie środowiskowe zależy od metody produkcji wodoru, jak i źródła wykorzystywanej energii elektrycznej. W cyklu życia pojazdu te etapy w największym stopniu wpływały negatywnie na środowisko w prawie wszystkich kategoriach.

Wniosek ten potwierdza również, że ocena środowiskowa autobusów z ogniwami paliwowymi, nie powinna ograniczać się do analizy samego pojazdu, lecz powinna uwzględniać produkcję paliwa oraz lokalne uwarunkowania energetyczne. Wyniki rozprawy mogą stanowić podstawę dla formułowania kryteriów środowiskowych w przetargach na tabor miejski, raportowania ESG oraz wytycznych dla polityki transportowej i energetycznej.

ABSTRACT

Global environmental problems, such as declining fossil fuel reserves and growing pollution, have increased interest in the development of alternative energy sources. This is particularly important in the transport sector, which is responsible for a large share of greenhouse gas emissions. Reducing these emissions is one of the main elements of the transformation of transport systems. For this reason, hydrogen is considered an alternative fuel that may support the decarbonisation of this sector. The present work focuses on the operation of buses powered by hydrogen fuel cells, due to their growing popularity in the fleets of Polish cities.

The main aim of the study was the environmental assessment of the life cycle of hydrogen, covering both the fuel cycle (Well-to-Wheel) and the vehicle cycle (Cradle-to-Grave). In addition, the key factors determining environmental impact were identified based on the results.

The calculations were carried out using SimaPro software with the Ecoinvent 3.11 database, applying the Environmental Footprint 3.1 method. The functional unit was defined as one passenger-kilometre (1 pkm) with an occupancy rate of 35%, and the reference mileage of the vehicle was set at 800,000 km. The reliability of the results was confirmed by an uncertainty analysis using the Monte Carlo method. In addition, three scenario analyses were performed: a comparison of fuels used in bus transport, a comparison of hydrogen production methods, and a comparison of electricity sources powering the electrolysis process.

The results of the study showed that the use of hydrogen as an alternative fuel in bus transport may support the decarbonisation of this sector. However, the final environmental impact depends on both the method of hydrogen production and the source of the electricity used. Within the vehicle life cycle, these stages had the strongest negative impact on the environment in nearly all impact categories.

This conclusion also confirms that the environmental assessment of fuel cell buses should not be limited to the analysis of the vehicle itself. It should also take into account fuel production and local energy conditions. The results of the dissertation may serve as a basis for formulating environmental criteria in public tenders for urban bus fleets, for ESG reporting, and for guidelines in transport and energy policy.