



Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego



Rzeczpospolita
Polska

Dofinansowane przez
Unię Europejską



Wydział Elektryczny
Katedra Elektrotechniki, Energoelektroniki i Elektroenergetyki

Materiały do seminarium z przedmiotu:

Zasady zrównoważonego rozwoju

Kod: EMS1A1011

Temat:

**Elektromobilność w transporcie publicznym
jako element zrównoważonego rozwoju**

Opracował: dr inż. Marcin Andrzej Sulkowski

Białystok 2025



**Fundusze Europejskie
dla Rozwoju Społecznego**



**Rzeczpospolita
Polska**

**Dofinansowane przez
Unię Europejską**



Materiały przygotowane w ramach projektu „PB 5.0 – dostosowanie oferty dydaktycznej Politechniki Białostockiej do potrzeb nowoczesnej gospodarki oraz zielonej i cyfrowej transformacji” (nr umowy FERS.01.05-IP.08-0327/23-00) w ramach programu Fundusze Europejskie dla Rozwoju Społecznego 2021-2027 współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Plus.

Publikacja jest udostępniona na licencji Creative Commons - Uznanie autorstwa 4.0 (CC BY 4.0). Pełna treść licencji dostępna na stronie creativecommons.org.



Autobusy w publicznej komunikacji miejskiej w Polsce

Autobusy w komunikacji miejskiej w 2022r.	12 271 szt.	100%
Autobusy elektryczne w komunikacji miejskiej w 2023r.	> 1 000 szt.	>8,15%
Trolejbusy w komunikacji miejskiej w 2022r. (Gdynia, Lublin, Tychy)	235 szt.	1,92%

Kluczowe informacje

- Całkowita liczba autobusów w komunikacji miejskiej w Polsce była stabilna w przeciągu ostatniej dekady i utrzymuje się na poziomie ok. 12 tysięcy pojazdów. Na koniec 2022 roku było to 12 271 autobusów.
- Liczba autobusów elektrycznych bateryjnych oraz wodorowych w parku pojazdów komunikacji miejskiej przekroczyła 1000 szt., a dodatkowo w 3 polskich miastach funkcjonuje komunikacja trolejbusowa – w Gdyni, Lublinie i Tychach. Łącznie na koniec 2022 roku udział pojazdów zeroemisyjnych (elektrycznych bateryjnych, wodorowych i trolejbusów) wynosił ponad 10% w całej krajowej flocie.
- Jak wskazano w części dotyczącej rynku pojazdów, autobusy miejskie są wyjątkowym segmentem w Polsce, ze względu na bardzo szybki przyrost liczby pojazdów z napędem alternatywnym, szczególnie elektrycznym. Udział napędów elektrycznych w liczbie nowych rejestracji jest w Polsce wyższy niż w skali wszystkich państw Unii Europejskiej. Niewątpliwie w segmencie autobusów Polska jest jednym z europejskich liderów w zakresie zarówno produkcji pojazdów ogółem, jak i rejestracji pojazdów z napędami alternatywnymi.

Rynek nowych autobusów miejskich w Polsce w 2023

roku

Rejestracje nowych autobusów miejskich
w 2023 r.

848 szt. 100%

Autobusy elektryczne BEV

335 szt. 39,5%

Autobusy z silnikiem Diesela

291 szt. 34,3%

Autobusy hybrydowe

104 szt. 12,3%

Autobusy gazowe CNG, LNG

72 szt. 8,5%

Autobusy wodorowe FCEV

46 szt. 5,4%

Kluczowe informacje

- Komunikacja miejska jest najszybciej rozwijającym się rynkiem pojazdów elektrycznych w Polsce. Istotny udział miały w tym zakresie programy dopłat do zakupu pojazdów, w tym „Zielony Transport Publiczny” NFOŚiGW. W 2023 roku w Polsce zarejestrowano łącznie
- 848 nowych autobusów miejskich. Największy udział (39,5%) przypadł elektrycznym autobusom bateryjnym BEV – 335 szt. W 2023 roku zarejestrowano również 46 szt.
- autobusów wodorowych. Najczęściej kupowanym autobusem miejskim w 2023 roku był
- Solaris Urbino 12 electric (108 szt.).

TCO dla autobusu miejskiego – przykład metodologii

TCO – ang. **Total Cost of Ownership**. Instrument pozwalający na ocenę całkowitego kosztu posiadania i użytkowania produktu lub usługi, uwzględniający nie tylko inwestycję początkową, ale wszystkie pozostałe koszty w całym cyklu życia produktu lub usługi.



Studium przypadku eksploatacji floty autobusów FCEV i BEV - projekty JIVE, JIVE 2

- Projekty JIVE (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe) oraz JIVE 2 polegały na rozdyponowaniu i szczegółowym monitorowaniu floty kilkuset autobusów z ogniwem paliwowym napędzanych wodorem (FCEV) w 22 miastach Europy. Projekty zostały dofinansowane w ramach Clean Hydrogen Partnership (wcześniej funkcjonującego jako FCH JU), w ramach programu Horyzont 2020. Na podstawie danych zebranych w tych projektach oraz
- dodatkowych informacji pozyskanych w przeprowadzonym badaniu powstał raport porównujący całkowity koszt użytkowania pojazdu (TCO) dla autobusów miejskich BEV oraz FCEV (A. Zimmerer et al., 2023).

Źródło: A. Zimmerer, S. Eckert, V. Roderer, External Costs and Benefits of Fuel Cell Hydrogen Bus Systems, (2023), https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Deliverables_JIVE%20D3.22_%20JIVE2%20D3.6_D4.3_final.pdf

Studium przypadku eksploatacji floty autobusów FCEV i BEV - projekty JIVE, JIVE 2 c.d.

Elementy kosztowe uwzględnione przy kalkulacji całkowitego kosztu użytkowania pojazdu TCO na podstawie danych z programów JIVE oraz JIVE 2:

- Koszty inwestycyjne: a) koszt pojazdu, b) koszt infrastruktury Koszty eksploatacyjne: c) koszt paliwa, d) koszt kierowcy Koszty napraw serwisowych: e) koszty regularnych serwisów i napraw, f) koszty wymiany po- dzespołów, g) koszty regularnych serwisów i naprawy infrastruktury ładowania / tankowania
- W kalkulacji TCO założono 12 letnią długość życia i eksploatacji floty autobusów BEV oraz FCEV w 2 różnych lokalizacjach, o odmiennej charakterystyce (różny pokonywany roczny przebieg, różny model produkcji energii elektrycznej i wodoru, itp.).
- W analizie autorzy wykorzystali m.in. dane zbierane w okresie styczeń 2020 – grudzień 2022 od 14 operatorów autobusowych, dotyczących floty prawie 200 autobusów FCEV. W sumie w tym okresie autobusy pokonały ponad 10 mln kilometrów.
- W kontekście danych eksploatacyjnych autobusów BEV autorzy przeprowadzili badanie ankietowe miejskich operatorów autobusowych, uzyskując szczegółowe dane m.in. o flocie 34 autobusów BEV w 7-miesięcznym okresie eksploatacji. Informacje zostały uzupełnione o dane ze źródeł literaturowych.

1. Fuel Cell Electric Buses, <https://www.fuelcellbuses.eu/projects/jive-2> A. Zimmerer, S. Eckert, V. Roderer, External Costs and Benefits of Fuel Cell Hydrogen Bus Systems, (2023), https://www.fuelcellbuses.eu/sites/default/files/documents/Deliverables_JIVE%20D3.22_%20JIVE2%20D3.6_D4.3_final.pdf
- 2.

Studium przypadku eksploatacji floty autobusów FCEV i BEV – porównanie założeń dotyczących infrastruktury

Lokalizacja nr 1		FCEV	BEV
Infrastruktura	Rozmiar	- Stacja tankowania wodoru zaprojektowana dla floty 40 autobusów - Koszty w obliczeniach TCO dzielone na 1 autobus	- Stacja ładowania - zaprojektowana dla floty 60 autobusów - Koszty w obliczeniach TCO dzielone na 1 autobus
	Dostawy paliwa /energii	Wodór produkowany w procesie elektrolizy Chlor-Alkali z energii sieciowej Koszt H2: 6,8 €/kg H2	Ładowani prądem sieciowym Koszt energii: 0,18 €/kWh
	Parametry ekonomiczne	- Koszty inwestycyjne: 2,7 mln € - Koszty eksploatacyjne: 93 tys. € rocznie	- Koszty inwestycyjne: 2 mln € - Koszty eksploatacyjne: 100 tys. € rocznie

Lokalizacja nr 2		FCEV	BEV
Infrastruktura	Rozmiar	- Stacja tankowania wodoru zaprojektowana dla floty 20 autobusów - Koszty w obliczeniach TCO dzielone na 1 autobus	- Stacja ładowania zaprojektowana dla floty 60 autobusów - Koszty w obliczeniach TCO dzielone na 1 autobus
	Dostawy paliwa /energii	- Wodór produkowany w procesie elektrolizy z energii wiatrowej (OZE) - Koszt H2: 7,0 €/kg H2	- Ładowani w 100% energią wiatrową (OZE) - Koszt energii: 0,21 €/kWh
	Parametry ekonomiczne	Koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne uwzględnione w cenie wodoru	- Koszty inwestycyjne: 2 mln € - Koszty eksploatacyjne: 100 tys. € rocznie

Studium przypadku eksploatacji floty autobusów FCEV i BEV – charakterystyka pracy

Charakter pracy autobusów

Lokalizacja nr 1

- Roczny dystans pokonywany przez autobusy: **58 000 km**. Długość
- życia autobusu – **12 lat**. Dane dotyczące autobusów BEV
- zgromadzone na podstawie informacji eksploatacyjnych 37 autobusów przez 7 miesięcy.

FCEV

- Konsumpcja wodoru 6,4 kg/100 km
- Autobus zazwyczaj tankowany 1 raz dziennie
- Trasa autobusów miejskich - wszystkie linie / trasy dostępne

BEV

- Konsumpcja energii 133 kWh /100 km Autobus często
- doładowywany, 2 razy dziennie
- Trasa autobusów miejskich – ok. 80% dostępnych linii / tras

Lokalizacja nr 2

- Roczny dystans pokonywany przez autobusy: **94 000 km**. Długość życia
- autobusu – **12 lat**. Dane dotyczące autobusów BEV zgromadzone na
- podstawie średnich wartości z informacji przesłanych przez operatorów.

FCEV

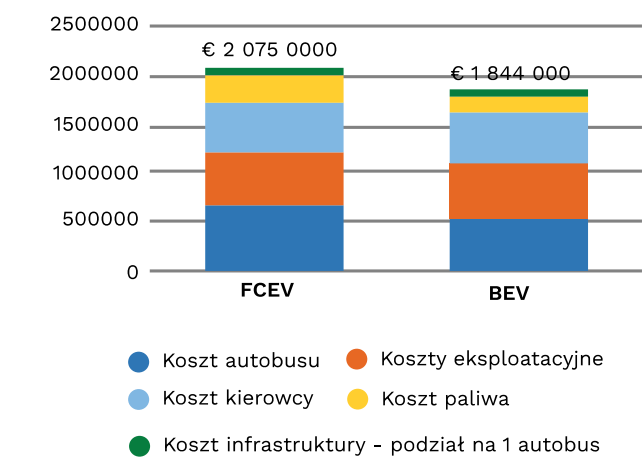
- Konsumpcja wodoru 6,7 kg²H /100 km Autobus zazwyczaj
- tankowany 1 raz dziennie
- Trasa autobusów miejskich oraz trasy pomiędzy miastami

BEV

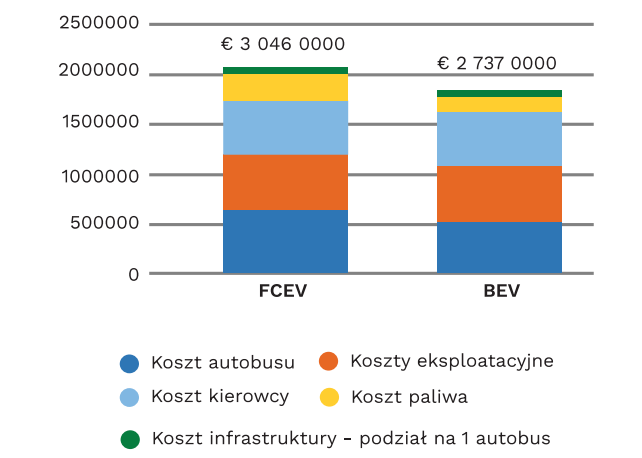
- Konsumpcja energii 110 kWh /100 km Autobus często
- doładowywany, 2 razy dziennie
- Tradycyjne trasy wszystkich autobusów miejskich

Studium przypadku eksploatacji floty autobusów FCEV i BEV – TCO, okres 12 lat

TCO w lokalizacji nr 1 (58 000 km/rocznie),
okres 12 lat



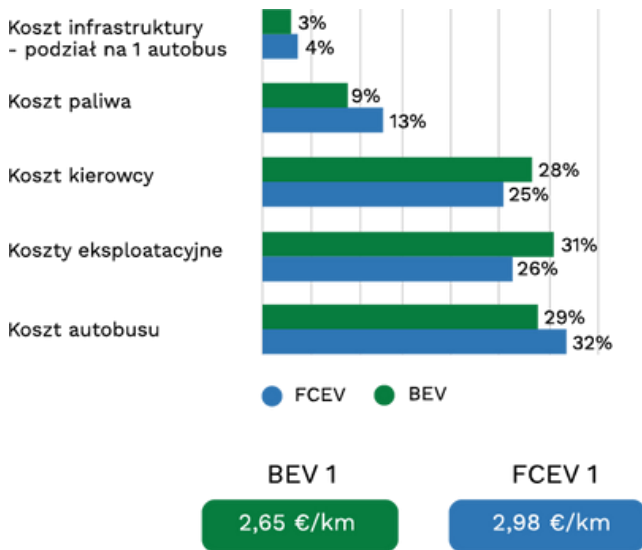
TCO w lokalizacji nr 2 (94 000 km/rocznie),
okres 12 lat



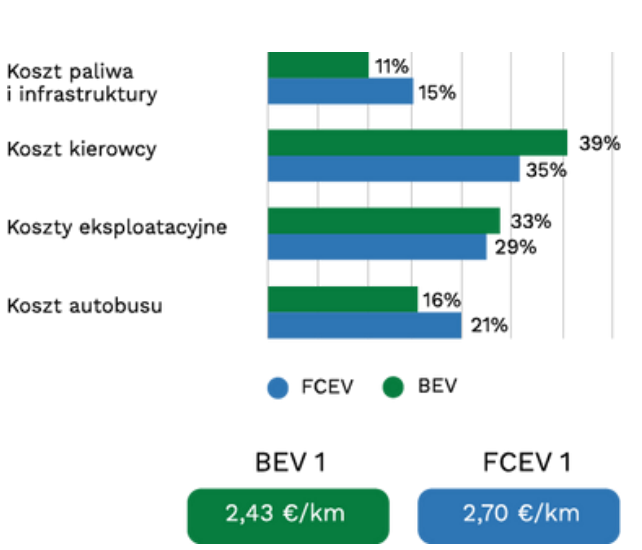
Kluczowe informacje

- W lokalizacji nr1, przy założonym rocznym przebiegu 58 tysięcy km oraz 12-letnim okresie eksploatacji, całkowity koszt posiadania autobusu miejskiego (TCO) w przypadku autobusu wodorowego FCEV wyniósł 2 075 000 euro, a autobusu bateryjnego BEV 1 844 000 euro.
- W lokalizacji nr 2 przy założonym rocznym przebiegu 94 tysiące km oraz 12-letnim okresie eksploatacji, całkowity koszt posiadania autobusu miejskiego (TCO) w przypadku autobusu wodorowego FCEV wyniósł 3 046 000 euro, a autobusu bateryjnego BEV 2 737 000 euro.

Procentowy udział kosztów w TCO w lokalizacji nr 1 (58 000 km/rocznie),
okres 12 lat



Procentowy udział kosztów w TCO w lokalizacji nr 2 (94 000 km/rocznie),
okres 12 lat



Flota autobusów BEV a flota FCEV w komunikacji miejskiej – wnioski

1. W przeprowadzonym badaniu porównania TCO dla floty elektrycznych autobusów bateryjnych BEV oraz wodorowych FCEV, w obu scenariuszach eksploatacji – rocznego przebiegu na poziomie 58 tysięcy kilometrów oraz 94 tysięcy kilometrów, całkowity koszt posiadania pojazdu był wyższy dla autobusów wodorowych o ok. 10%.
2. Połączony koszt paliwa i infrastruktury dla łącznego okresu 12 lat był niższy dla autobusów bateryjnych BEV o ok. 35% w obu przypadkach (w scenariuszu nr 2 różnica wynosiła ok. 33%).
3. Największe różnice występowały w kosztach pojazdów oraz kosztach paliwa wraz z infrastrukturą na korzyść bateryjnych autobusów BEV.
4. Ogólnie w obu scenariuszach koszt paliwa i infrastruktury nie przekraczał 20% TCO, we wszystkich 4 analizowanych przypadkach. Największy udział w całkowitym koszcie TCO posiadał koszt zakupu autobusu, koszty eksploatacyjne oraz koszt wynagrodzenia kierowcy.
5. Wraz ze wzrostem przebiegu rocznego w całkowitym koszcie użytkowania pojazdu TCO rośnie znacząco waga kosztów wynagrodzenia kierowcy oraz kosztów eksploatacyjnych.
6. Badanie przedstawia przede wszystkim w sposób dość kompleksowy wpływ różnych czynników na całkowity koszt posiadania pojazdu TCO floty autobusów BEV i FCEV. Trzeba pamiętać, że koszt jest w bardzo dużym stopniu wrażliwy na warunki lokalne i może się on znacząco różnić w zależności od przyjętych parametrów.
7. Największa wrażliwość na zmiany TCO występuje w cenie autobusów, która jest zależna od jego długości, wyposażenia, producenta, itd., rocznym pokonywanym dystansie, który jest zależny stricte od warunków lokalnych oraz modelu ładowania pojazdów, w tym lokalnych cen energii elektrycznej oraz wodoru.
8. Niemniej, wyniki w przybliżony sposób pokazują obecne różnice w całkowitym koszcie eksploatacji autobusów miejskich w krajach europejskich. Kalkulacja kosztu TCO może być pomocnym narzędziem analitycznym przy podejmowaniu decyzji o wymianie taboru na elektryczny, jednak powinna być przeprowadzona w oparciu o założenia lokalnego operatora autobusowego i tras po których poruszać się będzie dany pojazd bądź flota pojazdów.
9. Badanie pokazuje również, że bez wsparcia publicznego w zakresie zakupu pojazdu, budowy infrastruktury czy dofinansowania do pokrycia części kosztów energii/ wodoru, koszt TCO zarówno dla autobusów bateryjnych jak i wodorowych jest wysoki. Obecnie koszt zakupu pojazdów BEV i FCEV jest znacząco wyższy niż autobusów hybrydowych, gazowych oraz z napędem konwencjonalnym.

Napęd elektryczny w autobusowej komunikacji miejskiej – wnioski i rekomendacje

1. Instrumenty polityki klimatycznej Unii Europejskiej z jednej strony nakładają ograniczenia oraz zaostżenia wobec autobusów o napędzie konwencjonalnym (EU ETS II / BRT ETS, zaostżające się normy emisji spalin, rozporządzenie HDV, itp.), z drugiej strony dotują zakup oraz pokrycie części kosztów eksploatacyjnych autobusów zeroemisyjnych – BEV oraz FCEV. Efekty tej polityki, w połączeniu z silnym i innowacyjnym sektorem producentów autobusowych w Polsce, są dobrze widoczne na polskim rynku autobusów miejskich. W 2023 roku udział miejskich autobusów elektrycznych w liczbie nowych rejestracji wyniósł ok. 45% (39,5% BEV, 5,4% FCEV).
2. Rynek bateryjnych pojazdów elektrycznych BEV jest obecnie dużo bardziej ugruntowany niż pojazdów wodorowych FCEV, jednak obie technologie mają swoje zalety i wady. Wstępne porównania wyłącznie aspektów ekonomicznych w zakresie eksploatacji floty autobusów BEV oraz FCEV w krajach głównie Europy zachodniej wyrażane jako TCO (całkowity koszt posiadania i użytkowania pojazdu), wskazują na ok. 10% niższe koszty w eksploatacji floty autobusów BEV przez okres 12 lat.
3. Zakładając pozyskanie krajowych lub unijnych środków na cel zakupu autobusów BEV lub FCEV oraz niezbędnej infrastruktury ładowania lub tankowania, oba rodzaje pojazdów powinny być brane pod uwagę, po analizie lokalnych czynników i wymagań komunikacyjnych, takich jak planowany dzienny oraz roczny przebieg autobusu, lokalne ukształtowanie terenu i możliwość wykorzystania różnych modeli ładowania pojazdów, dedykowana oferta rynkowa producentów autobusowych dla konkretnego operatora, dostęp do lokalnie produkowanej energii OZE, itp.
4. Poza czynnikami ekonomicznymi trzeba również brać pod uwagę charakterystykę techniczną autobusów. Autobusy wodorowe FCEV wydają się posiadać przewagę w obszarach aglomeracyjnych, w których doładowania autobusów w trakcie dnia są problematyczne ze względu na różne aspekty lokalne (geograficzne, urbanizacyjne) lub w transporcie pomiędzy sąsiadującymi miastami i w transporcie podmiejskim. Jednocześnie, wraz z eksploatacją większej liczby autobusów wodorowych FCEV w czasie uwidocznia się kolejne silne i słabe strony tej technologii, którymi będzie można zarządzać.
5. Bez wątpliwości pozostaje potrzeba kontynuacji i wzmocnienia polityki wsparcia wobec obu technologii autobusów miejskich BEV oraz FCEV. Różnice ekonomiczne w 2023/24 roku w zakresie eksploatacji autobusów konwencjonalnych oraz elektrycznych są bardzo duże, a wymiana dużej części krajowej floty autobusów miejskich (kilku tysięcy do roku 2030 w celu spełnienia wymagań polityki UE) stawia przed miastami i operatorami komunikacji miejskiej olbrzymie wyzwanie finansowe i logistyczne. Równolegle niezbędne są nakłady na rozwój technologiczny, dzięki któremu w perspektywie następnej dekady znacząco zmalałby koszt produkcji i cena autobusów BEV i FCEV oraz koszt infrastruktury (baterie, ogniwa paliwowe, produkcja taniej energii odnawialnej oraz paliw RFNBO, itp.), jak również poprawiły się parametry techniczne pojazdów (dostępny



Dziękuję za uwagę

Źródło: [Elektromobilnosc-i-paliwa-alternatywne-w-Polsce-do-2030-roku.-Raport-IEN-i-WZ-UW-v27.04.24-1.pdf](#)