

Przemysław KUJDA
Karolina PAWLAK*

EKOLOGICZNE ROZWIĄZANIA ZRÓWNOWAŻONEGO TRANSPORTU PUBLICZNEGO – NISKOEMISYJNOŚĆ I BEZEMISYJNOŚĆ ŚRODKÓW KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Słowa kluczowe: *ekologia, zrównoważony transport publiczny, niskoemisyjność, bezemisyjność, środki transportu zbiorowego, transport miejski*

Celem opracowanego referatu jest pokazanie zalet i wad poszczególnych rozwiązań zrównoważonego transportu publicznego w kierunku szeroko pojmowanej ekologii. Wdrożenie zaproponowanych możliwości wyboru niskoemisyjnego lub bezemisyjnego środka transportu publicznego może przyczynić się do poprawienia jakości życia w mieście przez znaczne zmniejszenie emisji szkodliwych substancji oraz może mieć pozytywny wpływ na środowisko naturalne jak i zdrowie człowieka. Przedstawione zostały również aspekty ekonomiczne jakie niosą za sobą opisane możliwości wyboru środka komunikacji publicznej w mieście.

1. WSTĘP

Sprawne i efektywne funkcjonowanie transportu stanowi siłę napędową gospodarki, umożliwia wzrost gospodarczy i powstawanie nowych miejsc pracy. Jednym z najważniejszych elementów wpływających na rozwój publicznego transportu zbiorowego jest zrównoważony transport, który integruje cele ekologiczne, społeczne oraz gospodarcze. Wiąże się on również z promocją transportu efektywnego, spełniającego oczekiwania społeczeństwa. Zrównoważony transport kładzie nacisk na kontrolę emisji szkodliwych związków występujących w spalinach, a w dłuższej perspektywie czasowej na przejściu z transportu korzystającego z paliw kopalnianych do takiego, który będzie wykorzystywał energię odnawialną. Oprócz tego zakłada także zmniejszenie udziału ruchu samochodowego w przestrzeni miejskiej oraz zwiększenie konkurencyjności transportu zbiorowego [7]. Jednym z czynników prowadzących do rozwoju zrównoważonego transportu jest zrównoważona mobilność, której elementem jest proces planowania i realizacji potrzeb transportowych poprawiających dostępność infrastruktury przyczyniającej się do zmniejszenia kosztów eksploatacji [1,11].

*Koło Naukowe TRANSIT, Politechnika Krakowska

2. NISKOEMISYJNY TABOR AUTOBUSOWY

Komunikacja autobusowa pełni kluczową rolę w transporcie miejskim. Ekologiczne rozwiązania zrównoważonego transportu publicznego zakładają redukcję emisji spalin pojazdów komunikacji miejskiej. W Polsce nadal dominują autobusy wyposażone w silniki spalinowe, które emitują szkodliwe związki do atmosfery co największy wpływ na miasta o dużym natężeniu ruchu. Silniki spalinowe emitują do 70% całkowitego zanieczyszczenia tlenkami azotu i 90% pozostałych zanieczyszczeń powietrza na obszarach o wysokiej urbanizacji (dane z 2014r.). Zła jakość powietrza realnie wpływa na wiele aspektów życia m.in. zagraża życiu ludzkiemu oraz niszczy materiały bogactwa kulturowego przez oddziaływanie kwaśnych roztworów i ozonu. Od lat 90-tych ubiegłego wieku przemysł motoryzacyjny rozwija się i wdraża nowe technologie pozwalające ograniczyć emisję szkodliwych substancji. W tym celu powstały Europejskie Normy Emisji Spalin (EURO) czyli normy dopuszczalnych emisji spalin w nowych pojazdach sprzedawanych na terenie Unii Europejskiej oraz Europejskim Obszarze Gospodarczym. Od spełniania norm spalania są uzależnione opłaty od poruszania się różnych pojazdów po niektórych drogach. Dotyczy to przede wszystkim pojazdów ciężarowych i autobusów. Przykładowo w Polsce pojazd spełniający maksymalnie normę 2, zapłaci dwa razy tyle za przejechanie 1 kilometra drogi co pojazd spełniający minimum normę 5. Od 2000 roku normy EURO są sukcesywnie zaostrzane. W 2014 roku do użytku weszła norma EURO 6 która w stosunku do normy EURO 5 redukuje o 80% więcej zawartości tlenków azotu w spalinach [7]. Wszystkie te dokumenty prowadzą do ograniczenia, a nawet eliminacji związków takich jak: węglowodory (HC), tlenki azotu (NOx), tlenki węgla, cząsteczki stałe.

Normy zakładają, że im mniej przejechanych kilometrów przez dany pojazd, tym mniej spalonego paliwa czyli tlenu węgla wydalonego do atmosfery [5]. Kolejnym przykładem działań Unii Europejskiej na rzecz zwiększania udziału sektora transportowego w sprawie polepszenia jakości powietrza i większej ekologiczności pojazdów jest Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej Wspólnoty Gospodarczej 2009/33/WE z 23 kwietnia 2009 roku w sprawie transportu drogowego. Celem tego dokumentu jest wprowadzenie na rynek ekologicznie czystych i energooszczędnych pojazdów oraz ograniczenie liczby produkowania samochodów osobowych. Według strategii niskoemisyjnej Komisji Europejskiej, emisje gazów cieplarnianych wydzielanych z transportu do 2050 roku muszą być o minimum 60% niższe niż w 1990r. Transport stanowi blisko jedną czwartą emisji gazów cieplarnianych w Europie, dlatego postanowiono zastąpić silniki spalinowe innymi, bardziej ekologicznymi [6, 7].

2.1. AUTOBUSY CNG

Dzięki programom i dofinansowaniu ze środków unijnych i krajowych udział autobusów niskoemisyjnych ciągle wzrasta [10]. Do takich autobusów zaliczamy między innymi te zasilane CNG czy LNG. Pojazdy komunikacji miejskiej wyposażone w takie napędy, wykazują znacznie niższe zużycie energii oraz ograniczają w dużym stopniu emisję szkodliwych substancji zawartych w spalinach w porównaniu z pojazdami o napędzie konwencjonalnym [7]. Compressed Natural Gas (CNG) jest jedną z najczęściej stosowanych metod zasilania pojazdów silnikowych. Gaz ziemny jest mieszaniną węglowodorów lekkich, której głównym składnikiem jest metan (CH_4). Suma zanieczyszczeń emitowanych przez autobus zasilany CNG jest prawie trzykrotnie mniejsza od sumy emitowanych do atmosfery zanieczyszczeń przez porównywalnej klasy autobus zasilany benzyną. Po zastosowaniu takiej alternatywy zmniejszeniu mogą ulec do 85% tlenki azotu i tlenek węgla, a emisja cząstek stałych i związków siarki może osiągnąć wartość bliską zero. Ważnym argumentem jest również to, że składniki zawarte w gazie ziemnym nie są toksyczne i CNG spala się bez wydzielania cząstek sadzy, dymu czy zapachu. Zaletą autobusów zasilanych gazem jest to, że paliwo do ich napędu może być wytwarzane na bazie biomasy lub odpadów komunalnych i wtedy paliwo to jest nazywane biogazem jednak takie rozwiązanie nie zostało do tej pory wdrożone do Polski. Gaz jest również lżejszy od powietrza, co skutkuje tym, że nie unosi się do atmosfery w przeciwieństwie do paliwa płynnego w wypadku wycieku. Kolejnym pozytywnym aspektem jest to, że pojazdy są znacznie cichsze i pozwalają na zmniejszenie hałasu komunikacyjnego o 5-7 decybeli [5].

Autobusy zasilane CNG poruszające się po polskich drogach są w stanie przejechać nie mniej niż 450 km po pełnym tankowaniu. Dla porównania trasy autobusów kursujących w godzinach szczytowych po mieście wynoszą w Warszawie około 250 kilometrów dziennie. Wynika z tego, że ich zasięg jest wystarczający dla obsługi takiej linii. Autobusy zasilane gazem CNG są cięższe od autobusu zasilanego olejem napędowym co wynika z konieczności zamontowania stosunkowo ciężkich butli gazowych. Większa masa autobusu powoduje, że została ograniczona liczba miejsc dla przewożonych pasażerów w stosunku do autobusu zasilanego olejem napędowym. W poniższej tabeli przedstawiono różnicę pomiędzy autobusami Solaris Urbino 12 CNG oraz Solaris Urbino 12 czwartej generacji, które są produkowane kolejno od 2016 i 2014 roku.

Tab. 1. Dane techniczne porównywanych modeli autobusów [8].

Tab. 1. Technical data of the compared models of buses [8].

	Solaris Urbino 12 CNG	Solaris Urbino
Paliwo	CNG	ON
Masa własna autobusu	10400 – 13000 kg	9900 kg
Liczba miejsc siedzących	37+1	40+1
Moc silnika	239 kW przy 2200 obr/min	240 kW przy 2200 obr/min

W przypadku autobusów z silnikiem Diesla cena netto jednego pojazdu utrzymuje się na poziomie 0,9-1,1 mln zł. Model gazowy stanowi koszt ok. 1,1 mln. Cena autobusu CNG jest nieznacznie wyższa od ceny zakupu autobusu zasilanego olejem napędowym a do tego autobusy napędzane gazem ziemnym pozwalają na redukcję kosztów paliwa dochodzącą nawet do 50%. Zwrot takiej inwestycji następuje średnio po około czterech latach eksploatacji, przez co coraz więcej polskich miast decyduje się na zakup pojazdów CNG. Obecnie stanowią one jedynie około 3,5% wszystkich autobusów zarejestrowanych na terenie kraju, a przyczyną niskiej frekwencji może być koszt budowy stacji tankowania pojazdów. Wymagają one dobrze rozwiniętej sieci podziemnych rurociągów gazowych, które są przeznaczone do dostarczania sprężonego gazu ziemnego do stacji tankowania oraz dużego zagospodarowania przestrzeni. Koszt ich budowy szacuje się na 1,5-2,0 mln zł [8].

Według Dyrektywy Parlamentu Europejskiego odległość między stacjami tankowania na terenie Unii Europejskiej nie powinna przekraczać 150 km dlatego planowana jest budowa kolejnych punktów. Aby zachęcić władze miast do wprowadzenia komunikacji miejskiej zasilanej gazem ziemnym została wprowadzona zerowa akcyza na paliwa CNG, a dzięki środkom z Funduszy Niskoemisyjnego Transportu istnieje możliwość znacznego dofinansowania do rozwoju infrastruktury miejskiej. Sektor CNG przez ostatnie dwa lata w Polsce rozwijał się bardzo dynamicznie i w 2019 roku PGNiG Obrót Detaliczny podpisał listy intencyjne w celu budowy infrastruktury do tankowania gazu CNG między innymi w Łomży, Suwałkach, Kielcach czy Lublinie. Szacuje się, że po polskich drogach do końca 2023 roku będzie poruszać się ponad tysiąc autobusów gazowych zasilanych ekologicznym gazem CNG.

2.2. AUTOBUSY HYBRYDOWE

Kolejnym rodzajem niskoemisyjnych środków transportu publicznego są autobusy hybrydowe. Silniki autobusów hybrydowych najczęściej zbudowane są z silnika spalinowego oraz elektrycznego. Konstrukcja pojazdów umożliwia wbudowanie elementów hybrydowego układu napędowego, takich jak akumulatory, kondensatory czy też systemy chłodzenia na dachu pojazdu, nie zmniejszając przy tym ilości miejsca dla pasażerów. Najważniejszymi elementami napędu hybrydowego są: silnik spalinowy, silnik elektryczny, układ mikroprocesorowy, przekładnia, magazyny energii a w części rozwiązań prądnice. W transporcie wyróżniamy trzy rodzaje napędów hybrydowych: szeregowy, równoległy oraz mieszany. Każdy z napędów różni się sposobem połączenia silnika elektrycznego ze spalinowym. W napędzie szeregowym silnik spalinowy pełni rolę generatora, który napędza silnik elektryczny. W tej konstrukcji zadanie napędzania kół spoczywa na jednostce elektrycznej. W momencie, w którym rozładowuje się akumulator jednostka spalinowa włącza się i napędza generator, który doładowuje baterię. Oprócz tego, w połączeniu szeregowym energię pozyskuje się również podczas hamowania. Odmiana równoległa napędu hybrydowego wyróżnia się tym, że silnik spalinowy oraz silnik elektryczny połączone są mechanicznie z kołami. Do napędzania pojazdu może służyć sam silnik spalinowy lub elektryczny, a także oba naraz. Silniki elektryczne są zazwyczaj niewielkiej mocy i służą jako wsparcie dla motoru spalinowego. Jednostki elektryczne mają za zadanie dodawać momentu obrotowego podczas przyspieszania oraz odzyskiwać energię podczas hamowania [3].

Kolejną odmianą napędu stosowanego w pojazdach hybrydowych jest napęd szeregowo-równoległy, łączy on zalety obu powyższych rozwiązań. Jest to zaawansowane rozwiązanie, a przez to bardziej kosztowne w produkcji. W układzie mieszanym możemy korzystać z wydajności układu szeregowego przy niewielkich prędkościach oraz z oszczędności układu równoległego przy prędkościach większych. Praca obu silników zależna jest również od stylu jazdy. Stosunkowo niewielkie odległości mogą być pokonywane wyłącznie za pomocą silnika elektrycznego co eliminuje zużycie paliwa.

Najbardziej zaawansowanym napędem hybrydowym stosowanym obecnie jest układ plug-in (PHEV). Napęd PHEV jest rozwinięciem układu mieszanego i łączy ze sobą właściwości pojazdu hybrydowego z elektrycznym. Innowacją w napędzie plug-in jest gniazdo ładowania które pozwala uzupełnić prąd w akumulatorach korzystając z prądu elektrycznego. Zasięg pojazdu wyposażonego w napęd PHEV na samej jednostce elektrycznej jest znacznie większy niż w typowej hybrydzie. Kierowca takiego pojazdu ma możliwość wyboru jakim trybem chce w danym momencie jechać. Miastem w Polsce, w którym po raz pierwszy wykorzystano technologię plug-in był Inowrocław gdzie w październiku 2018 roku dostarczono pierwsze autobusy wykorzystujące tę innowacyjną technologię. Autobusy o napędzie elektryczno-hybrydowym na większości trasy zasilane są wyłącznie energią elektryczną,

a dodatkowy niewielki silnik spalinowy pełni funkcję pomocniczą. Zużywają o 60% mniej paliwa od diesli, a emisja dwutlenku węgla zostaje zmniejszona od 75% do nawet 90%. Tradycyjne hybrydy mają te osiągi sporo niższe – zużywają ok. 40% mniej paliwa i emitują 40-50% mniej szkodliwych substancji [14, 15].

3. BEZEMISYJNE ŚRODKI KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

Według Ustawy o Elektromobilności i Paliwach Alternatywnych do taboru zero-emisyjnego można zaliczyć pojazdy, które napędzane są energią elektryczną wytworzoną z wodoru w ogniach paliwowych lub zasilane przez silnik, którego spaliny nie powodują lokalnej emisji gazów cieplarnianych. Autobusy zaliczane do grupy niskoemisyjnych to między innymi autobusy elektryczne oraz wodorowe [6].

W czerwcu 2016 r. zaprezentowany został plan rozwoju sektora elektromobilności w Polsce, który jest jednym z kluczowych projektów zapisanych w uchwalonej przez Radę Ministrów Strategii na rzecz Odpowiedzialnego Rozwoju. Zakłada on stworzenie warunków do rozwoju produkcji oraz upowszechniania pojazdów o napędzie elektrycznym. Przewiduje się, że do 2025 roku na polskich drogach pojawi się 1 mln pojazdów elektrycznych [4].

Polskie miasta borykają się z wieloma problemami, a jednym z nich jest pył zawieszony. Pochodzenie tego typu zanieczyszczeń może być naturalne bądź związane z działalnością człowieka. Duży wkład w produkcję szkodliwych pyłów ma transport drogowy. Poniższa tabela przedstawia średnie narażenia na pył PM_{2,5} (aerozole atmosferyczne, których średnica nie jest większa niż 2.5 mikrometra) w latach 2012 do 2018 dla wybranych miast w Polsce.

Tab. 2. Wartość wskaźnika średniego narażenia na pył PM_{2,5} w latach 2012 – 2018

Tab. 2. The value of the average exposure to PM_{2.5} in years 2012 - 2018

Województwo	Miasto	Wartość wskaźnika średniego narażenia na pył PM _{2,5} dla roku:						
		2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012
dolnośląskie	Wrocław	22	22	23	25	26	28	29
podkarpackie	Rzeszów	23	23	23	24	26	28	28,8
małopolskie	Kraków	31	32	32	33	36	37	38,1
wielkopolskie	Poznań	23	24	25	25	25	25	25,5
pomorskie	Trójmiasto	14	14	15	15	16	16	17,8

Optymistyczne w zestawieniu jest to, że w większości miast poziom emisji pyłu PM_{2,5} obniżył się, ale w dalszym ciągu przekracza normy ustalone przez WHO. Norma średniego dobowego stężenia pyłu zawieszonego PM_{2.5} to 25 mikrogramów na metr sześcienny, a roczna norma to 10 mikrogramów na metr sześcienny.

3.1. AUTOBUSY ELEKTRYCZNE

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat obserwujemy zwiększenie zainteresowania problemem emisji zanieczyszczeń środowiskowych. Miejscami, w których można zaobserwować największą emisję szkodliwych substancji są duże aglomeracje miejskie o wysokiej gęstości zaludnienia. Wykorzystywanie autobusów napędzanych spalinowym silnikiem wysokoprężnym powoduje produkcję szkodliwych zanieczyszczeń środowiskowych. Emisji substancji obniżających jakość powietrza sprzyja niska średnia prędkość pojazdu, częste postoje oraz hamowania. Jednym z możliwych rozwiązań prowadzących do zwiększania jakości powietrza w miastach jest wprowadzenie autobusów napędzanych silnikami elektrycznymi. Zaletą tego typu technologii jest uniezależnienie transportu publicznego od paliw konwencjonalnych takich jak olej napędowy czy też gaz ziemny. Autobusy elektryczne cechują się znacznie niższymi kosztami eksploatacyjnymi co bezpośrednio wynika z cen energii elektrycznej, akumulowanej w bateriach pojazdu. Dużą zaletą jest również to, że w trakcie hamowania odzysk energii w typowym ruchu miejskim dochodzi do 30%. Elektrobusesy nie emitują szkodliwych zanieczyszczeń w miejscu ich funkcjonowania, a ponadto ich eksploatację cechuje ochrona środowiska akustycznego, ponieważ pojazdy napędzane silnikiem elektrycznym wyróżniają się niższą emisją hałasu w odniesieniu do autobusów z silnikiem wysokoprężnym. Z ergonomicznego punktu widzenia autobusy elektryczne wytwarzają 70% drgań mniej niż autobusy spalinowe. Zmniejsza to ryzyko wystąpienia zespołu wibracyjnego u kierowcy a także wpływa pozytywnie na komfort jazdy pasażerów [12].

Silnik elektryczny jest najważniejszym elementem funkcjonalnym elektrobusego. Zazwyczaj stosowane są centralne silniki synchroniczne z magnezem stałym. Istnieją także rozwiązania z trakcyjnymi silnikami asynchronicznymi oraz z silnikami elektrycznymi zainstalowanymi bezpośrednio w osi pojazdu zintegrowanymi w piastach kół, bądź zintegrowanymi z osią elektryczną. Kolejnym fundamentalnym elementem baterijnego autobusu elektrycznego są jego akumulatory energii. Typ wykorzystanej w pojeździe baterii zasadniczo determinuje jego dzienny dystans wymagany do przejechania na pojedynczym ładowaniu oraz rodzaj i ilości punktów ładowania na trasie. W elektrobusesach stosuje się baterie litowo-jonowe takie jak np. LTO (Lithium-titanite), która charakteryzuje się mniejszą pojemnością i niższą gęstością energetyczną. Wykorzystuje się je na trasach, w których istnieje możliwość częstego podładowania, co wiąże się z koniecznością wybudowania dodatkowej infrastruktury na trasie pojazdu takiej jak pętle indukcyjne czy pantografy. Sto-

suje się również baterie LFP (Lithium-iron-phosphate), które posiadają wyższą gęstość energetyczną oraz znacznie wyższą pojemność. Powszechnie stosowane w autobusach, w których nie ma możliwości dodatkowego ładowania i rozbudowy infrastruktury na trasie. Ładowanie tego typu pojazdów odbywa się zazwyczaj w zajezdniach i trwa kilka godzin.

Wprowadzenie autobusów elektrycznych niesie za sobą wiele korzyści lecz wiąże się to również z pewnymi problemami. Na zapotrzebowanie elektryczne elektrobusesów wpływa bardzo dużo czynników. Między innymi klimat powodujący zwiększenie zużycia energii przez układy ogrzewające i chłodzące oraz dbające o jakość powietrza wewnątrz autobusu. Istotna jest również topografia terenu, gdzie częste podjazdy mogą powodować większe zapotrzebowanie na energię, co wiąże się z odpowiednim doбором pojemności baterii oraz optymalnym rozplanowaniem tras. Kolejnym problemem jest cena autobusów, ponieważ czasami jest to aż 150% do 250% ceny pojazdu zasilanego silnikiem spalinowym, spełniającym normę Euro 6. W tej sytuacji wprowadzeniu elektrobusesów do eksploatacji może pomóc członkostwo w Unii Europejskiej. Na podstawie „Ram polityki klimatyczno-energetycznej do 2030r.”, co najmniej 80% pracy przewozowej w publicznym transporcie zbiorowym ma być wykonywane z wykorzystaniem środków transportu, które nie są napędzane paliwami konwencjonalnymi [3].

W krajach takich jak Polska gdzie około 90% energii elektrycznej pochodzi z węgla, z czego aż 30% z węgla brunatnego, wykorzystanie autobusu elektrycznego wiąże się z pośrednią emisją zanieczyszczeń środowiskowych w miejscu generacji energii elektrycznej. Inwestowanie w energię pochodzącą z paneli fotowoltaicznych, czy też elektrowni wiatrowych poprawia efektywność. Warto zauważyć, że autobusowe akumulatory energii, które na skutek spadku ich pojemności po określonym cyklu ładowań i rozładowań nie nadają się do dalszego wykorzystania w pojazdach mogą również służyć jako magazyn energii w stacjach ładowania autobusów elektrycznych. Dużą przeszkodą w opłacalności autobusów elektrycznych jest recykling baterii. Z przeprowadzonych badań wynika, że w przypadku akumulatorów LFP, które wykorzystywane są w większości autobusów, bardziej korzystne dla środowiska jest wyprodukowanie nowych akumulatorów niż recykling. Produkcja gazów cieplarnianych oraz zużycie energii są większe niezależnie od zastosowanej metody odzyskiwania [9, 13].

3.2. AUTOBUSY WODOROWE

Z biegiem czasu konwencjonalne paliwa kopalne się skończą, dlatego w dobie dzisiejszych czasów należy częściej spoglądać w stronę paliw alternatywnych. Wodór jest najczęściej występującym pierwiastkiem we Wszechświecie, dlatego naukowcy i inżynierowie znaleźli jego zastosowanie w transporcie mianowicie stworzyli pojazdy napędzane tym właśnie pierwiastkiem.

Wodór w reakcji z tlenem tworzy wodę i prąd niezbędny do zasilania środków komunikacji. Aby technologia napędzania pojazdów wodorem działała na pokładzie autobusu musi się znaleźć ogniwo paliwowe, które wodór w połączeniu z tlenem przetworzy w prąd. Jednym z plusów wdrożenia autobusów wodorowych jest ich bardzo krótki czas tankowania, ponieważ nie przekracza on 10 minut. Zasięg tych autobusów to możliwość pokonania 400 kilometrów po pełnym tankowaniu w czasie 20 godzin. Autobus 12 metrowy do przejechania trasy wynoszącej 100 metrów potrzebuje około 8 kilogramów wodoru, a dla porównania diesel na tym samym dystansie potrzebuje około 40 litrów ropy. Aktualnie cena kilograma wodoru to ok. 9,5 euro. Kilogram wodoru zawiera tyle samo energii co około 4 litry benzyny. Cena autobusu napędzanego wodorem dochodzi nawet do 8 milionów złotych. Dla porównania cena autobusu hybrydowego to koszt 2 milionów złotych, natomiast zwykłego diesla można zakupić za około 1,5 miliona złotych. Z czasem ta cena może ulec zmniejszeniu, ponieważ jest spowodowana wdrożeniem nowych technologii co wiąże się z wysokimi cenami zakupu egzemplarzy. Do pozytywnych aspektów zakupu stosunkowo drogiego autobusu wodorowego możemy zaliczyć to, że z rur wydechowych pojazdów jest wydalana jedynie para wodna, która nie ma negatywnych skutków dla powietrza w obszarach aglomeracyjnych, gdzie ta technologia jest stosowana. W krajach europejskich takich jak Norwegia czy Francja dzięki wprowadzeniu do komunikacji miejskiej autobusów wodorowych wskaźnik emisji zanieczyszczeń zmniejszył się 15 razy. Istotny problem, który występuje w gospodarce krajów to dostępność wodoru. Wodór można wytwarzać z pomocą reformingu parowego metanu czyli reakcji katalitycznej z parą wodną odbywającą się w bardzo wysokiej temperaturze. Możliwe jest także jego pozyskiwanie z ropy naftowej, węgla czy dzięki elektrolizie lub technologii plazmowej. Celem wszystkich wyżej wymienionych metod pozyskiwania wodoru potrzebnego do zasilania pojazdów jest całkowite wyeliminowanie z niego wszelkiej ilości tlenu węgla [2].

Według prognoz na kolejne lata w Polsce przewiduje się powstanie dwóch stacji tankowania wodoru. W 2021 roku firma Lotos planuje rozwijanie infrastruktury potrzebnej do poruszania się w miastach pojazdów wodorowych. W celu sprawdzenia inwestycji elementu programu "Bezemisijny transport publiczny" do Gdańska w 2021 roku mają trafić pojazdy wodorowe. Dzięki dotacjom z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej polskie miasta będą miały szansę zakupu pojazdów zasilanych wodorem, elektrycznych czy też hybrydowych [3].

3.3. TROLEJBUSY

Zrównoważony rozwój transportu nie zawsze równa się z opracowaniem nowych technologii. Czasem lepiej sprawdzają się stare rozwiązania, takie jak trolejbusy. Systemy trolejbusowe powstawały równoległe z pozostałymi systemami komunikacji miejskiej: tramwajami, autobusami i systemami miejskiej kolei nadziemnej lub podziemnej. Z uwagi na koszty trolejbusy stanowiły etap przejściowy do budowy

linii tramwajowych lub ich rozbudowy. Z czasem, w okresie międzywojennym, sytuacja odwróciła się i linie trolejbusowe zaczęły zastępować linie tramwajowe tam, gdzie wielkość przewozów na linii nie była wystarczająco duża, aby pokryć jej koszty eksploatacji. Obecnie trolejbusy nie są najpopularniejszym środkiem transportu. Najbardziej rozpowszechnione systemy trolejbusowe są w krajach byłego Związku Radzieckiego, zwłaszcza w Rosji i na Ukrainie. W 15 byłych republikach radzieckich trolejbusy są eksploatowane w 191 miastach, co stanowi więcej niż połowę wszystkich systemów na całym świecie. W Polsce wiele sieci trolejbusowych zostało zlikwidowanych i obecnie eksploatowane są tylko w trzech miastach czyli w Lublinie, Gdyni i Tychach. Trolejbusy tak samo jak autobusy elektryczne wyposażone są w napęd elektryczny. To co różni je od elektrobusów to sposób zasilania ponieważ ciągle podłączone są do sieci trakcyjnej w której wykorzystuje się prąd stały o napięciu 600 woltów. Najczęściej występującym rodzajem napędu jest silnik centralny, który za pośrednictwem wału napędowego przekazuje siłę napędową na oś napędową. Współczesne trolejbusy mają wiele zalet. Charakteryzują się większym przyspieszeniem niż autobusy, które są ograniczone tylko ze względu na bezpieczeństwo pasażerów stojących. Koszty eksploatacji pojazdów trolejbusowych są znacznie niższe, niż koszty eksploatacji autobusów o tej samej pojemności ze względu na wyeliminowanie szeregu skomplikowanych podzespołów (silnik spalinowy, skrzynia biegów, układ chłodzenia, układ olejowy), dzięki czemu poziom gotowości eksploatacyjnej, niezawodność i żywotność trolejbusów są znacząco wyższe. Nowoczesne trolejbusy wyposażone są w układy rekuperacji energii podczas hamowania przez co wytworzona przez silniki energia elektryczna jest zwracana do sieci zasilającej i może być wykorzystana przez inne pojazdy, znajdujące się na tym samym odcinku zasilania [3].

Zalet trolejbusów jest znacznie więcej, lecz powodem, przez który systemy trolejbusowe nie są najlepszym rozwiązaniem w dużych miastach jest nieopłacalność budowy specjalnej sieci trakcyjnej. Trolejbusy korzystają z tej samej drogi, co inni użytkownicy i nie posiadają szczególnych uprawnień. W związku z tym, podobnie jak autobusy, mogą utknąć w korkach. Nie ma możliwości wyprzedzania się trolejbusów, o ile nie posiadają one zasobników energii elektrycznej lub pomocniczych napędów spalinowych.

4. PODSUMOWANIE

Intensywny rozwój miast w Polsce i na świecie niesie ze sobą większe zapotrzebowanie na transport publiczny. Wprowadzenie niskoemisyjnych i bezemisyjnych środków komunikacji miejskiej ma na celu ochronę życia i zdrowia osób mieszkających w miastach. W poniższych tabelach przedstawiono zalety i wady oraz koszty każdego z opisywanych pojazdów komunikacji publicznej (koszty eksploatacji w porównaniu z autobusami napędzanymi silnikami spalinowymi).

Tab. 3. Zalety i wady opisywanych środków komunikacji miejskiej [3, 6].

Tab. 3. Advantages and disadvantages of described means of public transport [3, 6].

Rodzaj autobusu	CNG	Elektryczne	Wodorowe	Trolejbusy	Hybrydowe
Zalety	redukcja hałasu, zmniejszenie emisji toksycznych spalin: ok. 1,1 mln ton	redukcja hałasu, lepsze przyspieszenie, niskie koszty prądu, wysokie koszty zakupu	brak emisji szkodliwych substancji, większy zasięg niż autobusu elektrycznego	niskie koszty eksploatacji, duże przyspieszenie	znaczne ograniczenie emisji spalin
Wady	mniej miejsca dla pasażerów, konieczny dostęp do sieci gazowej	mały zasięg, wysoka cena autobusu, wysokie koszty wymiany baterii	mała dostępność wodoru, brak infrastruktury w Polsce	nieopłacalność budowy sieci trakcyjnej, poruszanie się po tych samych drogach co inne pojazdy	konieczność budowy stacji ładowania, skomplikowanych technicznie

Tab. 4. Porównanie kosztów zakupu oraz eksploatacji opisywanych środków komunikacji miejskiej [3, 6].

Tab. 4. Comparison of the costs of purchase and operation of described means of public transport [3, 6].

Rodzaj autobusu	CNG	Elektryczne	Wodorowe	Trolejbusy	Hybrydowe
Koszt zakupu	ok. 1,1 mln zł	ok. 2 - 2,5 mln zł	ok. 4 - 8 mln zł	2 - 2,5 mln zł	ok. 1,5 - 2 mln zł
Koszty eksploatacji	do 50% mniejsze koszty	ok. 75% mniejsze koszty	ok. 20% większe koszty	ok. 75% mniejsze koszty	40 % - 60 % mniejsze

Z przeprowadzonej analizy ciężko jednoznacznie stwierdzić, która z opisanych technologii jest najlepsza. Patrząc na całościowe koszty oraz wszystkie zalety, aktualnie najbardziej rozsądne wydaje się zastosowanie autobusów hybrydowych oraz elektrycznych.

LITERATURA

- [1] BRZEZIŃSKI A., REZWOW M., *Zrównoważony transport – ekologiczne rozwiązania transportowe*, Ekorozwój i Agenda 21, Szczecin 2014
- [2] BUBULA M., PIETRUSZCZAK D., *Wybrane aspekty ekologicznych pojazdów samochodowych*, Bezpieczeństwo i ekologia, Autobusy 6/2017, (50-54)
- [3] Eko - Efekt Sp. z o.o., *Analiza kosztów i korzyści związanych z wykorzystaniem autobusów zeroemisyjnych przy świadczeniu usług komunikacji miejskiej w Gnieźnie*, 2019
- [4] FAJCZAK-KOWALSKA A., NOWAK I., KOWALSKA M., *Bezemisyjny transport publiczny*, 12/2017 Autobusy
- [5] FILIPOWICZ J., FILIPOWICZ P., ZAPRAWA K., *Emisja Zanieczyszczeń Spalinowych Przez Autobusy Komunikacji Miejskiej*, 9/2017, (52-55)
- [6] GIS.M., *Analiza porównawcza emisji spalin autobusów miejskich z silnikami zasilanymi olejem napędowym oraz paliwami alternatywnymi*, Politechnika Poznańska, Rozprawa Doktorska, Poznań, 10/2018
- [7] GRZYWA A., GLINIAK M., *Wpływ rozwoju norm emisji spalin EURO na emisję zanieczyszczeń powietrza z pojazdów komunikacji miejskiej na przykładzie miasta Krakowa*, Logistyka, 4/2014, (4310-4314)
- [8] IGNACIUK P., GIL L., WÓJCIK A., *Porównanie kosztów eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej zasilanych gazem CNG i olejem napędowym*, Autobusy 11/2016, (67-69)
- [9] KRAWIEC K., *Proces wprowadzenia autobusów elektrycznych do eksploatacji w przedsiębiorstwach komunikacji miejskiej*, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, 2016
- [10] ORZEL A., STEPANIUK R., *Zrównoważony transport miejski w ramach Programu Operacyjnego Polska Wschodnia 2014–2020*, Autobusy 1-2/2017 (37-39)
- [11] PARADOWSKA M., *Polityka zrównoważonego rozwoju transportu UE w kontekście wybranych aspektów ekonomiki polskich miast*, Ekonomia i Środowisko 3 (46), 2013, (91-99)
- [12] REFUNDA sp. z o.o., *Analiza kosztów i korzyści wykorzystania autobusów zeroemisyjnych*, Bydgoszcz, 2018
- [13] TRELA M., *Emisja zanieczyszczeń i koszty zewnętrzne wynikające z eksploatacji elektrycznego autobusu miejskiego w Polsce w porównaniu do autobusu spalinowego*, Logistyka, 2/2014 (5289-5296)
- [14] SZUMSKA E., PAWEŁCZYK M., *Politechnika Świętokrzyska, Porównanie TCO autobusów miejskich z hybrydowym i konwencjonalnym układem napędowym*, Prace Politechniki Warszawskiej z.118, 2017
- [15] ZIENKIEWICZ K., *Rodzaje Napędów Hybrydowych*, LEFTLANE, 12/2017

ECOLOGICAL SOLUTIONS OF SUSTAINABLE PUBLIC TRANSPORT - LOW-EMISSION AND ZERO-EMISSION MEANS OF PUBLIC TRANSPORT

Key words: *ecology, sustainable public transport, low carbon, zero emissions, public transport, urban transport*

In this paper the authors present the advantages and disadvantages of individual solutions of sustainable public transport towards broadly understood ecology. The implementation of the selected options to choose a low-emission or zero-emission means of public transport may contribute to improving the quality of life in the city by significantly reducing the emission of harmful substances and may have a positive impact on the natural environment and also human health. There were also presented the economic aspects of the described possibilities of choosing the means of public transport in the city.

Corresponding author: e-mail: przemekkujda@gmail.com