

Powrót do przyszłości czyli hybrydowy Citaro napędzany ogniwami paliwowymi

Zbigniew Rusak



Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell Hybrid drugiej generacji

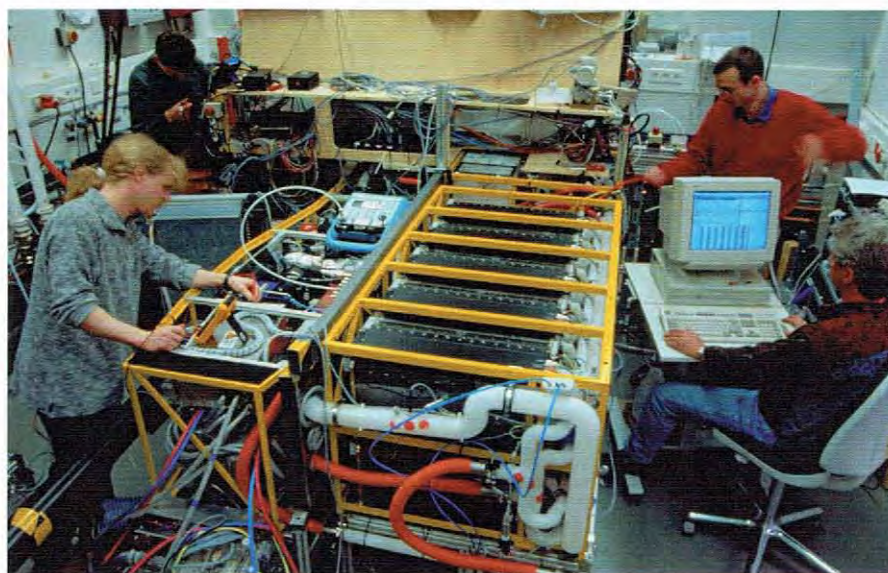
Ostatnie kilka lat to okres dynamicznego rozwoju autobusów z napędem hybrydowym. Każdy z producentów stara się opracować pojazd o możliwie jak najniższym zużyciu paliwa i jak najniższej emisji spalin. Obok silników elektrycznych czy elementów gromadzących energię hamowania, nowe pojazdy wyposażone są w zaawansowane oprogramowanie, automatycznie wyłączające silnik podczas postoju na przystanku lub pod światłami. Wszystko po to, aby do minimum ograniczyć negatywne oddziaływanie środków transportu na środowisko. Daimler postanowił iść o krok dalej, prezentując kompilację autobusu z napędem hybrydowym i wodorowym. Pierwsze jazdy próbne wykazały, że nie jest to kolejny pojazd studialny, lecz w pełni dojrzała konstrukcja, którą można wprowadzić do normalnej eksploatacji w ruchu miejskim.

Geneza

Pierwszy egzemplarz autobusu wodorowego Daimler zaprezentował w 1997 r. podczas Kongresu UITP w Stuttgarcie. Był to NEBUS bazujący na popularnym niskopodłogowym autobusie Mercedes O405N2. Mimo standardowej

długości 12 m, masa własna autobusu była tak duża, że jego pojemność wynosiła tylko 58 pasażerów, czyli na tym samym poziomie jak w przypadku dziewięciometrowego midibusu. Dodatkowo duże gabaryty komponentów układu napędowego sprawiły, że w NEBUS trzeba było wprowadzić poprzeczny stopień tuż

za środkowymi drzwiami, tak jak to ma miejsce w autobusach niskowejściowych. Ostatecznie wyprodukowano tylko jeden egzemplarz tego pojazdu, który w toku testów, umożliwił zebranie pierwszych doświadczeń związanych z wykorzystaniem ogniw paliwowych w rozwiązaniach mobilnych.



Zespół ogniw paliwowych podczas prób laboratoryjnych w 1997 r. (fot. Daimler AG)



NEBUS – autobus napędzany ogniwami paliwowymi, bazujący na Mercedesie O405N2 (fot. Daimler AG)

Dzięki tym doświadczeniom Daimler przygotował się do kolejnego dużego projektu, którego celem było sprawdzenie różnych rozwiązań pozyskiwania wodoru oraz eksploatacji autobusów wodorowych w normalnym ruchu miejskim w różnych warunkach klimatycznych i topograficznych. W 2001 r. rozpoczęto prace na autobusie wodorowym bazującym na Mercedesie Citaro. Został on zbudowany w ramach europejskiego projektu CUTE (Clean Urban Transport for Europe), który został dofinansowany przez Unię Europejską kwotą 21 mln euro. W ramach tego projektu 30 autobusów wodorowych trafiło w 2003 r. do dziesięciu miast europejskich: Barcelony, Amsterdamu, Madrytu, Hamburga, Londynu, Luksemburga, Porto, Sztokholmu, Stuttgartu i Reykjavíku. Obok Daimlera w programie CUTE uczestniczyli także Ballard Power System (ogniwa paliwowe), BP, Shell, Repsol, Norsk Hydro, First Bus i Hamburger Elektrizitätswerke. Pierwszy egzemplarz Citaro z napędem wodorowym został przekazany komunalnemu przewoźnikowi z Madrytu podczas kongresu UITP w 2003 r. W ciągu sześciu lat wszystkie autobusy dostarczone w ramach projektu CUTE przejechały w ciągu 135 tys. godzin blisko 2 mln kilometrów, przewożąc łącznie 7 mln pasażerów. Średni wskaźnik uruchomienia wahał się od 90 do 95%, co pokazuje, że większość technicznych problemów została już rozwiązana. Poza Europą, 6 kolejnych pojazdów zostało zakupionych przez przewoźników z Perth



Premiera Mercedes Citaro Fuel Cell pierwszej generacji w Madrycie (fot. Daimler AG)



Mercedes Citaro Fuel Cell dla SSB Stuttgart (fot. Daimler AG)



Wodorowy Citaro na Placu Tien-An-Men w Pekinie (fot. Daimler AG)



Mercedes B napędzany wodorem
(fot. Daimler AG)

i Pekinu. Doświadczenia zdobyte w toku eksploatacji wodorowych Citaro pozwoliły na przygotowanie kolejnej generacji tego pojazdu.

Tym razem Daimler poszedł inną ścieżką. Aby do minimum obniżyć koszty projektu, prace nad nowym pojazdem odbywały się dwutorowo. W zakresie rozwoju ogniw paliwowych przyjęto założenie stworzenia tej samej platformy zarówno dla pojazdów użytkowych, jak i osobowych. Daimler specjalnie dla prowadzenia prac rozwojowych powołał do życia dedykowane centrum kompetencyjne z siedzibą w Kirchheim-Nebern. Obecnie koncern

pracuje nad kilkoma wersjami pojazdów od samochodów osobowych klasy B, poprzez Sprintera, kończąc na autobusie Citaro. Dzięki scentralizowaniu prac znacznie przyspieszono etap prac projektowych. Planuje się, że na przełomie lat 2010-2011 B-klasa napędzana wodorem wejdzie do seryjnej produkcji. Tym samym dzięki osiągnięciu odpowiedniej skali produkcji, cena jednego z najbardziej cenotwórczych elementów, jakim są ogniwa paliwowe powinna znacząco obniżyć się.

Jak wspomniano na wstępie, nowy autobus to kompilacja rozwiązań stosowanych zarówno w pojazdach wodorowych jak i hybrydowych. Z modelu Citaro G BlueTec Hybrid przejęto takie podzespoły jak asynchroniczne silniki elektryczne zamontowane w piastach kół, baterie litowo-jonowe, układy sterowania mocą i sterowane elektrycznie elementy osprzętu pomocniczego. Przy opracowywaniu nowej konstrukcji szczególny nacisk położono na zwiększenie niezawodności, podatności obsługowej i trwałości.

Nadwozie

Bazą nowego modelu jest sprawdzona konstrukcja klasycznego Citaro. W porównaniu z autobusem wodorowym poprzedniej generacji zmianie uległa obudowa komponentów dachowych, która została bardziej zharmonizowana z resztą nadwozia. Zmieniono kształt świetlika przedniej tablicy kierunkowej, który harmonijnie został wkomponowany w obudowę dachu. Kolejną zauważalną różnicą jest wprowadzenie elementów stylistycznych z Citaro po face-liftingu, takich jak ściana czołowa i tylna. Z uwagi na zabudowę znacznej

liczby komponentów na dachu pojazdu wzmocniono niektóre elementy kratownicy. Sztywność nadwozia jest jednak lepsza niż w autobusie pierwszej generacji z uwagi na zmniejszenie masy komponentów dachowych i lepsze ich rozłożenie na dachu.

Citaro Fuell Cell Hybrid wyposażono w trzy drzwi w układzie 2-2-2. Drzwi środkowe i tylne są otwierane na zewnątrz. Powoduje to, że wnętrze zwłaszcza w sąsiedztwie środkowych drzwi zostało optymalnie przystosowane do potrzeb osób niepełnosprawnych. Zmiana koncepcji układu napędowego spowodowała, że we wnętrzu można było wykorzystać typową wieżę obudowy silnika, taką samą jaką jest stosowana w autobusach Citaro wyposażonych w stojący silnik Diesla. Dzięki temu na zwisie tylnym można było wygospodarować dodatkowe 3 miejsca siedzące.

Nowa aranżacja i stylistyka wnętrza została przejęta z Citaro G Hybrid. W poręcze wykonane ze stali nierdzewnej wkomponowano elementy informacji pasażerskiej. Dla podkreślenia proekologicznego charakteru nowego pojazdu, wykładzinę podłogową wykonano w formie drewnianych paneli. Brak zbiornika paliwa spowodował, że zagospodarowanie wnętrza, zwłaszcza w przedniej części pojazdu można dowolnie kształtować i przystosowywać do indywidualnych potrzeb przewoźnika. Dzięki zmniejszeniu masy własnej z 14200 do 13200 kg, wzrosła pojemność pojazdu z poziomu 72 do 76 pasażerów.

Duży nacisk położono na zwiększenie komfortu podróży. Zastosowanie nowego osprzętu pomocniczego zasilanego elektrycznie i uruchamianego według potrzeb przyczyniło się do znacznego ograniczenia



Mercedes Citaro Fuel Cell Hybrid podczas prezentacji na nabrzeżu portowym w Hamburgu



Nowy kształt tylnej ściany

hałasu we wnętrzu. Praktycznie podczas postoju panuje cisza, tak jak w przypadku trolejbusu. Podczas jazdy największy hałas emitowany jest w wyniku styku opon z nawierzchnią jezdni. Także obniżenie masy własnej, a co za tym idzie również obniżenie środka ciężkości, spowodowało, że na przedniej osi zamiast sztywnej belki, zabudowano niezależne zawieszenie.

Stanowisko kierowcy jest takie samo jak w przypadku klasycznego Citaro. Tak sam jest także sposób prowadzenia pojazdu. Układ informacji na kokpicie pozostawiono bez zmian i jedyną różnicą jest zastąpienie wskaźnika poziomu paliwa, informacją o ciśnieniu wodoru w butlach.

Układ magazynowania i przetwarzania energii

Sercem układu napędowego nowego autobusu są dwa zestawy ogniw paliwowych HY-90 składające się z 396 pojedynczych ogniw. Zostały one zamontowane na dachu pojazdu ponad tylną osią wraz z układem chłodzenia. Ogniwa te wytwarzają łącznie 120 kW energii elektrycznej. Energia elektryczna powstaje w wyniku syntezy cząstek tlenu pobieranego z atmosfery i wodoru pobieranego z zestawu butli w obecności katalizatora umieszczonego pomiędzy polimerową membraną PEM. Efektem ubocznym reakcji jest ciepło i para wodna.

Dla porównania ogniwa paliwowe stosowane w autobusie pierwszej generacji P5-1 składały się 1860 pojedynczych ogniw i miały moc 250 kW. Ma to bezpośrednie przełożenie na masę tych komponentów. Ogniwa pierwszej generacji ważyły 1040 kg, nie wliczając w to elementów układu chłodzenia. W nowym autobusie masa zintegrowanych z wentylatorami ogniw paliwowych nie przekracza 690 kg. Tak znaczne obniżenie mocy zamontowanych ogniw było możliwe z uwagi na ich zwiększoną sprawność wewnętrzną, niższe zapotrzebowanie mocy do napędu urządzeń pomocniczych oraz zastosowanie układu rekuperacji energii, pokrywające chwilowe zapotrzebowanie na moc z zestawu baterii litowo-jonowych.

O ile w autobusach pierwszej generacji sprawność ogniw wahała się w zakresie od 38 do 43%, o tyle obecnie sprawność ta wzrosła do poziomu od 51 do 58%. Aby jak najlepiej wykorzystać wytwarzaną energię, część ciepła powstająca podczas reakcji jest wykorzystywana do ogrzewania przestrzeni pasażerskiej. W przypadku braku potrzeb grzewczych, ciepło emitowane przez ogniwa paliwowe jest odprowadzane

na zewnątrz za pomocą czterech wysoko wydajnych wentylatorów. Obniżenie zapotrzebowania na moc uzyskano również dzięki zastosowaniu nowego osprzętu pomocniczego. W autobusie pierwszej generacji wszystkie sprężarki i pompa układu kierowniczego były połączone mechanicznie przy pomocy pasków klinowych ze specjalną przystawką mocowaną pomiędzy silnikiem elektrycznym, a skrzynią biegów. Pracowały one non stop bez względu na rzeczywiste zapotrzebowanie. W autobusie drugiej generacji cały dodatkowy osprzęt jest napędzany elektrycznie, a poszczególne komponenty włączane są automatycznie, gdy zachodzi taka potrzeba. Tym samym obniżono o 25% zapotrzebowanie na energię niezbędną do napędu dodatkowego wyposażenia.

Jak już wspomniano zwiększone zapotrzebowanie na energię podczas ruszania wykorzystywane jest z układu rekuperacji energii. W tym celu tuż za zestawem butli przeznaczonych do magazynowania wodoru, zamontowano zestaw baterii litowo-jonowych o pojemności 26 kWh. Oprócz dodatkowej mocy przy ruszaniu, baterie te są w stanie zasilić silniki elektryczne o mocy 120 kW w taki sposób, że autobus jest w stanie przejechać kilka kilometrów, tylko i wyłącznie pobierając energię z baterii. Aby zapewnić optymalną temperaturę pracy, która dla baterii Li-ion waha się w granicach od 15 do 55 stopni, baterie wyposażono w zintegrowany układ chłodzenia cieczą. Baterie wyróżniają się wysoką wydajnością w stosunku do masy, która wynosi 330 kg.

Czynnikiem niezbędnym dla wytworzenia energii elektrycznej jest wodór. Jest on gromadzony w zestawie butli montowanych w przedniej części pojazdu pod ciśnieniem 350 bar. Zastosowanie bardziej efektywnych ogniw spowodowało zmniejszenie liczby butli z 9 do 7. To spowodowało kolejne obniżenie masy i pozwoliło



Wnętrze autobusu wodorowego z charakterystyczną panelową podłogą

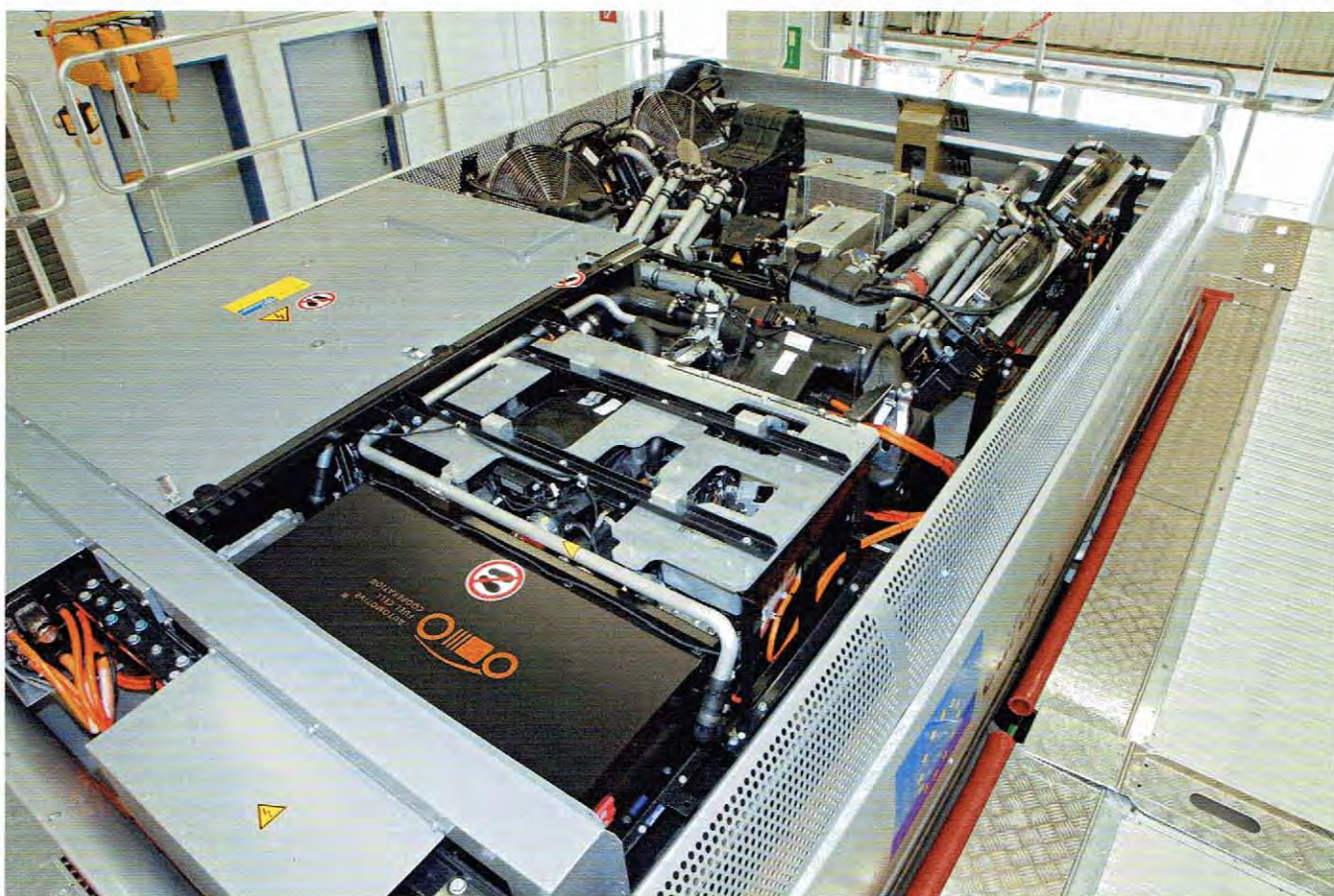
wyogospodarować dodatkowe miejsce na baterie. Mimo zmniejszenia zapasu wodoru o 35 kg, zwiększono zasięg autobusu z 200 do 250 km.

Wszystkie elementy sterowania oraz układy pomocnicze, takie jak przekształtniki mocy DC/AC, kompresor sprężonego powietrza, kompresor klimatyzacji, pompa wspomaganie układu kierowniczego i układ sterowania mocą zamontowano we wnętrzu wieży. Chcąc obniżyć cenę pojazdu, większość komponentów zaadaptowano z Citaro z napędem hybrydowym.

Zastosowanie nowych rozwiązań, jak i wprowadzenie komponentów nowej generacji umożliwiło poprawę efektywności całego układu. Nowy autobus zużywa o połowę mniej wodoru. Zmniejszenie zużycia osiągnięto także dzięki zastosowaniu mechanizmu rekuperacji energii hamowania.



Rozkład komponentów w Citaro Fuel Cell Hybrid (rys. Daimler AG)



Zestaw ogniw paliwowych wraz z układem chłodzenia zamontowany na dachu pojazdu (fot. Daimler AG)

W zależności od lokalnych warunków ruchu i topografii zużycie paliwa obniżono od 10 do 25% w porównaniu z pojazdami pierwszej generacji. W połączeniu z osprzętem pomocniczym załączanym wg potrzeb, zużycie wodoru wynosi od 10 do 14 kg/100 km. Dla porównania autobusy pierwszej generacji zużywają od 20 do 24 kg wodoru na 100 km.

Układ napędowy

Podobnie jak w przypadku układu przetwarzania energii, zmieniono całkowicie architekturę układu napędowego, adaptując wiele rozwiązań z autobusu hybrydowego. W autobusie pierwszej generacji energia elektryczna dostarczana była do asynchronicznego silnika elektrycznego o mocy 205 kW, który poprzez automatyczną skrzynię biegów ZF 6HP592 przekazywał energię na specjalny most portalowy. W autobusie drugiej generacji zrezygnowano ze skrzyni przekładniowej i zastosowano most portalowy ZF AVE130 z dwoma silnikami elektrycznymi o mocy 80 kW każdy, zamontowanymi w piastach kół. Nowe rozwiązanie przyczyniło się do uzyskania większej przestrzeni w rejonie tylnej

osi, dalszej redukcji masy i ograniczenia hałasu we wnętrzu pojazdu pochodzącego od przekładni. Nowy most portalowy pozwolił także na zunifikowanie części zamiennych zawieszenia i układu hamulcowego z pozostałymi modelami Citaro.

Podatność obsługa

Wprowadzenie nowej generacji ogniw paliwowych, baterii i silników elektrycznych znacznie zmniejszyło nakłady na obsługę i naprawy. Większość elementów układu jezdnego jest bezobsługowa. Także w układzie wytwarzania i przetwarzania energii zastosowano przeważnie urządzenia niewymagające obsługi. To właśnie te przeniesiono na dach pojazdu. Aby do minimum ograniczyć przeglądy armatury butli, zastosowano zawory bezpieczeństwa sterowane elektronicznie. Także zestaw baterii wyposażono w funkcję samodiagnozy i ich stan można sprawdzić poprzez przyłączenie komputera warsztatowego do przyłącza diagnostycznego. Pozostałe komponenty przeniesiono do wnętrza wieży tak, że nowy autobus można z powodzeniem obsługiwać na tych samych stanowiskach, co autobusy konwencjonalne.

Rozwój technologiczny ogniw znacznie wydłużył ich żywotność. O ile w autobusach pierwszej generacji trwałość ogniw wynosiła 2 tys. godzin pracy, o tyle w nowych pojazdach została powiększona do 12 tys. godzin. Przekłada się to na sześcioletni okres eksploatacji. Dodatkowo wzrosła także trwałość osprzętu pomocniczego dzięki wprowadzeniu funkcji automatycznego załączania i wyłączania. Także obniżenie masy własnej wpłynie na wydłużenie trwałości wszystkich elementów układu jezdnego.

Premiera nowej generacji autobusu miała miejsce podczas ubiegłorocznej Wystawy Transportu Publicznego towarzyszącej Kongresowi UITP w Wiedniu. Krótka seria dziesięciu takich pojazdów zostanie wyprodukowana w tym roku specjalnie dla Hamburga. Cała partia trafi do niemieckiego przewoźnika Hamburger Hochbahn, obsługującego to olbrzymie portowe miasto. Realizacja projektu była możliwa dzięki wsparciu federalnego Ministerstwa Transportu, Budownictwa i Gospodarki Komunalnej.

Podsumowanie

Jak widać z powyższego opisu Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell Hybrid jest w pełni dojrzałą konstrukcją. Na razie barierą wprowadzenia tego typu pojazdów jest jeszcze wysoka cena ogniw paliwowych i brak infrastruktury związanej z dystrybucją sprężonego wodoru. Aby pokonać te bariery, Daimler rozpoczął współpracę z innymi globalnymi koncernami. 9 września 2009 r. przedstawiciele wielkich koncernów podpisali list intencyjny w sprawie wprowadzenia do seryjnej produkcji przyjaznych środowisku samochodów napędzanych ogniwami paliwowymi. Wśród sygnatariuszy listu są takie firmy, jak Daimler AG, Ford Motor Company, General Motors Corporation/Opel, Honda Motor Co., Ltd., Hyundai Motor Company, Kia Motors Corporation, Renault SA i Nissan Motor Co., Ltd. oraz Toyota Motor Corporation. W liście określono, że każdy z producentów do 2015 r. przygotowuje własne konstrukcje pojazdów z zerową emisją spalin wykorzystujących ogniwa paliwowe, przystosowane do lokalnych uwarunkowań poszczególnych rynków. Jednocześnie każdy z koncernów ma dostosować swą strategię marketingową tak, aby cel ten mógł być osiągnięty, w przyjętych ramach czasowych. Zgodnie z zamierzeniami od 2015 r. bramy fabryk na całym świecie ma opuszczać kilkaset tysięcy pojazdów wykorzystujących tę technologię. Tylko takie działanie może wpłynąć na znaczne obniżenie ceny komponentów. Podpisanie listu intencyjnego jest odpowiedzią na dynamicznie rosnący ruch w dużych aglomeracjach miejskich. Pojazdy wodorowe mają umożliwić drastyczne zmniejszenie emisji CO₂ emitowanego przez sektor transportowy. Współpraca dużych koncernów samochodowych pozwala także na stworzenie lepszej platformy dyskusji z koncernami energetycznymi i paliwowymi. Wprowadzenie nowej technologii bez stałego rozszerzania odpowiedniej infrastruktury, będzie niemożliwe. Przewiduje się, że pierwsze stacje napełniania wodorem będą powstawać w dużych aglomeracjach miejskich. Ich celem będzie zaspokojenie potrzeb zarówno pojazdów komunalnych, jak i indywidualnych użytkowników, eksploatujących małe samochody miejskie. Kolejnym etapem będzie budowa sieci stacji wzdłuż korytarzy łączących wybrane metropolie, by w końcu stworzyć szeroką sieć dystrybucji. Takie działania podejmowane są m.in. w Niemczech, USA, Kanadzie i Japonii.

Przykładem takiego postępowania może być niemiecki projekt H2 Mobility,

Tab. 1.

Porównanie parametrów technicznych autobusów Mercedes-Benz napędzanych ogniwami paliwowymi

Marka i typ pojazdu	Mercedes-Benz O405N2 NEBUS	Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell	Mercedes-Benz Citaro Fuel Cell
Rodzaj pojazdu	niskopodłogowy autobus miejski		
Masa własna [t]	14,2		13,2
Długość [mm]	11995	11950	11950
Szerokość [mm]	2500	2550	
Wysokość [mm]	3500	3688	3400
Pojemność			
-siedzących	34	30	26
-stojących	24	42	50
Układ napędowy	wodorowo-elektryczny		hybrydowy, szeregowy wodorowo-elektryczny
Pierwotne źródło energii	10 ogniw paliwowych zasilanych za pomocą wodoru	2 ogniwa paliwowe zasilane za pomocą wodoru	2 ogniwa paliwowe zasilane za pomocą wodoru zintegrowane z układem chłodzącym
Moc [kW]	250	170	160
Liczba i pojemność butli do magazynowania wodoru	7 x 150 dm ³	9 x 205 dm ³	7 x 205 dm ³
Wtórne źródło energii	2 silniki elektryczne zamontowane w piastach kół	silnik elektryczny zamontowany za tylną osią	2 silniki elektryczne zamontowane w piastach kół
Moc maksymalna [kW]	2 x 75 kW	205 kW	2 x 80 kW
Typ baterii	-	-	litowo-jonowa o pojemności 27 kWh
Przekładnia	-	ZF 6HP-590	-

który przewiduje budowę sieci stacji wodorowych w tym kraju. Członkami projektu obok Ministerstwa Transportu i koncernu Daimler są takie firmy jak EnBW, Linde, OMV, Shell, Total, Vattenfall i Narodowa Organizacja Technologii Wodoru i Ogniw Paliwowych NOW. Dzięki projektowi ma powstać wzorcowy model wykorzystania wodoru w sektorze transportowym, który ma być adaptowany w innych krajach Unii Europejskiej. W pierwszej fazie realizacji projektu, ma zostać przeprowadzona wielowariantowa analiza budowy sieci stacji wodorowych z uwzględnieniem optymalizacji kosztów jej budowy, możliwości dofinansowania ze strony sektora publicznego do czasu rozpowszechnienia się napędów

wodorowych w skali zapewniającej opłacalność ekonomiczną oraz niezbędnej standaryzacji w zakresie magazynowania i transportu wodoru. Zakończenie tej fazy planowane jest na koniec przyszłego roku. W fazie drugiej planowanej do końca 2015 r. ma zostać rozpoczęta budowa sieci finansowanej przy współudziale państwa.

Już dziś Niemcy są liderem w zakresie wykorzystania wodoru w transporcie lądowym. Pierwsze stacje napełniania powstały w Berlinie i w Hamburgu. Obecnie u naszych zachodnich sąsiadów działa 30 stacji, z których siedem jest ogólnodostępnych. Łącznie w Niemczech eksploatowanych jest ponad 100 pojazdów napędzanych ogniwami paliwowymi.



Wprowadzenie do produkcji Mercedesesa Citaro Fuel Cell Hybrid stanowi kolejny krok na drodze tworzenia systemów opartych na bezemisyjnych środkach transportu