

Tadeusz Uhl,
Akademia Górniczo-Hutnicza, HydrogenTech sp. z o.o.

Czy wodór jest przyszłością transportu miejskiego? Stacje tankowania wodoru

część I

W artykule przedstawiono podstawowe informacje niezbędne do skutecznego wdrażania miejskich autobusów wodorowych. Przedsięwzięcie to składa się z dwóch powiązanych z sobą części. Jedną to infrastruktura, drugą to flota pojazdów wyposażonych w ogniwa paliwowe. W pierwszej części przedstawiono infrastrukturę konieczną do uruchomienia komunikacji miejskiej opartej na wodorze. Przedstawiono różne rozwiązania stacji tankowania wodoru oraz zagadnienie logistyczne związane z wdrożeniem (transport i magazynownie). Wyróżniono stacje zintegrowane z produkcją wodoru oraz stacje, do których wodór jest dostarczany ze źródeł zewnętrznych.

Zanieczyszczenie powietrza w miastach oddziałuje negatywnie na zdrowie dużej części populacji ludzi. Gospodarkę europejską kosztuje to ok. 1,5 biliona Euro liczone w kosztach chorób i zgonów [1]. Największy udział w zanieczyszczeniu powietrza w skali świata ma energetyka ok. 59%, na drugim miejscu jest transport z 21%. Szczególnie niekorzystny wpływ na zanieczyszczenie powietrza w miastach ma transport miejski w większości przypadków (szczególnie w Polsce), oparty obecnie na autobusach z silnikiem Diesla. Alternatywnymi środkami masowego transportu miejskiego są; metro, tramwaje, lekkie kolejki miejskie. Jednak ze względu na stosunkowo ni-

skie koszty inwestycyjne oraz krótki czas od momentu zamówienia do dostawy, dominują autobusy. Oprócz autobusów z silnikami diesla są eksploatowane na świecie autobusy z silnikami zasilanymi etanolem, biodieslem, LPG, benzyną, silnikami elektrycznymi zasilanymi z baterii, sprężonym gazem ziemnym i wodorem.

Obecnie jest prowadzonych wiele badań związanych z oceną wpływu poszczególnych typów paliw dla autobusów miejskich na zanieczyszczenie powietrza [2]. Z badań tych wynika, że największy wpływ na zanieczyszczenie powietrza ma paliwo oparte na etanolu. Mniejszy, ale stanowiący 80% paliwa opartego na etanolu ma biodiesel,

LPG 30%, diesel 25%, elektryczność ok. 15% w zależności od struktury elektrycznej produkcji energii, CNG 5% oraz wodór z 3% wpływem w stosunku do paliw opartych na etanolu.

Badając ten wpływ, wzięto pod uwagę wpływ na środowisko całego cyklu życia zarówno pojazdu (wpływ na środowisko produkcji pojazdu, jego recyklingu), jak również wpływ na środowisko cyklu produkcji paliwa, jego transportu i spalania w procesie eksploatacji autobusu. Dla oceny różni autorzy stosują różne wskaźniki wpływu na środowisko; w pracy [3] stosuje wskaźniki oparte na LCA oraz SLCA, w pracy [4] autor stosuje wskaźniki śladu węglowego (CFP), w pracy [5]

autorzy stosują wskaźnik efektywności energetycznej ECO - Indikator 99. Jednak wyniki oszacowania wpływu masowego transportu publicznego określone za pomocą różnych metod są podobne, wskazujące, że najmniejszy wpływ na stan środowiska, mierzony zintegrowanymi wskaźnikami ma paliwo wodorowe. Oprócz wpływu na środowisko bardzo istotnym elementem wielokrotnie decydującym o wyborze rodzaju autobusów do eksploatacji w danym mieście mają czynniki ekonomiczne. Ocena czynników ekonomicznych w większości publikowanych prac jest oparta na zintegrowanych wskaźnikach uwzględniających koszty całego cyklu życia autobusu. W pracy [6] autorzy przeprowadzili analizę ekonomiczną różnych autobusów (z różnym paliwem) stosując metodę wejścia-wyjścia. W pracy tej przeprowadzono analizę dla różnych kombinacji paliwa i układów napędowych, rozróżniono koszty paliwa i koszty pojazdów wraz z ich układami napędowymi. Analiza ekonomiczna uwzględniła koszt kapitału oraz koszty eksploatacyjne [7]. Uwzględniając oba składniki kosztowe można różne paliwa uszeregować w następującej kolejności - od najdroższych do najtańszych. Najbardziej niekorzystne w tych rachunkach okazały się autobusy elektryczne ze względu na stosunkowo duże koszty kapitału wynikające z cen baterii i kosztu ich recyklingu oraz koszty stacji ładowania i stacji szybkiego ładowania. Najtańsze okazały się rozwiązania oparte na LPG i CNG (w oszacowaniu kosztów uwzględniono średnie światowe ceny paliwa w 2017 r.). Bardzo ciekawe są wyniki zintegrowanych analiz środowiskowych i ekonomicznych.

Przyjęto, że waga obu kosztów (środowiskowych i ekonomicznych) jest jednakowa i wynosi 50%. Wyniki opublikowane w pracy [2] pokazują, że najkorzystniejsze jest rozwiązanie oparte na paliwie wodorowym i ogniwach paliwowych typu PEM (*Proton Exchange Membrane*), a najbardziej niekorzystne rozwiązanie oparte na etanolu i biodieslu. Wyniki badań dla lokalnego zastosowa-

nia mogą się nieznacznie różnić, a różnice mogą wynikać z różnych kosztów produkcji paliwa i autobusów w różnych rejonach świata. Dlatego przed podjęciem decyzji co do wyboru autobusów należy przeprowadzić każdorazowo podobne analizy.

Jednak analizy opisane w literaturze [2,3] jednoznacznie wskazują, że światowe tendencje w rozwoju autobusów miejskich idą w kierunku zastosowania elektrycznych autobusów zasilanych ogniwami paliwowymi. Potwierdzają to dostępne raporty globalnych firm konsultingowych [8], które wskazują, że w ciężkim transporcie drogowym (włączając autobusy miejskie i dalekobieżne), w niedalekiej przyszłości dominować będą środki transportu o napędach wodorowych opartych o ogniwa paliwowe oraz silniki elektryczne. Dotyczy to przede wszystkim pojazdów eksploatowanych w obszarze zurbanizowanym, gdzie częstość poruszania się pojazdu po drogach jest duża. Stoimy więc na progu zmian w eksploatowanych flotach z pojazdów o napędzie opartym o spalanie wewnętrzne paliw na pojazdy elektryczne, w tym pojazdy o napędzie wodorowym, gdzie do magazynowania lub wytwarzania energii elektrycznej wykorzystuje się reakcje elektrochemiczne. Niniejszy artykuł w sposób przeglądowy pokazuje jakie trudności napotkać można przy wdrażaniu do praktyki eksploatacyjnej floty autobusów o napędzie wodorowym. Wdrożenie floty autobusów wodorowych wiąże się ze zmianami zarówno w infrastrukturze, jak i konstrukcji samych pojazdów. Artykuł został podzielony na dwie części, w pierwszej części skoncentrowano się na wdrażaniu infrastruktury niezbędnej do eksploatacji floty autobusów miejskich. W drugiej zaś na problemach konstrukcji i eksploatacji autobusów miejskich wyposażonych w ogniwa paliwowe.

■ Infrastruktura niezbędna do eksploatacji autobusów wodorowych

Bardzo istotna we wdrożeniu i optymalizacji procesu eksploatacji floty autobusów wodorowych jest infrastruktura składająca się z źródeł wodoru, środków transportu wodoru, magazynowania wodoru oraz tankowania wodoru wchodzących w skład łańcucha dostaw paliwa wodorowego do autobusów [9]. Wodór w większości produkowany jest z gazu ziemnego poprzez reforming parowy (SMR). Następną stosowaną na skalę przemysłową technologią jest gazyfikacja biomasy lub węgla (BG lub CG), około 48% produkowanego wodoru w skali światowej. Ostatnią technologią stosowaną w praktyce jest elektroliza wody (WE), najczęściej realizowana poprzez zasilanie elektrolizerów energią elektryczną wyprodukowaną przez OZE [10]. Ten ostatni sposób produkcji wodoru jest technologią „zieloną”, nie generującą w procesie produkcji zanieczyszczeń środowiska i w wyniku jej zastosowania produkuje się zielony wodór, który daje w wyniku stosunkowo mały współczynnik CFP. Najtańszą i najbardziej rozpowszechnioną metodą produkcji wodoru jest reforming parowy gazu ziemnego, jednak w wyniku jej stosowania generowane jest zanieczyszczenie powietrza w postaci CO₂. Wodór można produkować w sposób scentralizowany w dużych zakładach chemicznych lub też w sposób rozproszony blisko punktu odbioru. W przypadku stacji tankowania pojazdów paliwem wodorowym można produkować wodór na terenie stacji i w tym przypadku stosuje się zarówno technologie SMR (jeśli obszar, w którym jest stacja tankowania jest zgazyfikowany), jak i technologie WE, gdy na danym obszarze można wykorzystywać nadmiary energii z OZE. Koszty produkcji wodoru zależą silnie od stosowanej technologii i tak według [11] stosując technologię scentralizowanej produkcji wodoru za pomocą technologii SMR, koszt produkcji 1 kg tego gazu szacuje się na 2 EURO i jest silnie zależny od cen gazu ziemnego. W przypadku produkcji rozproszonej koszt ten szacuje się na 4 EURO bez uwzględnienia kosztów emisji CO₂. W przypadku produkcji

wodoru z wody w procesie WE, koszt produkcji scentralizowanej wynosi 6 Euro/kg, a w przypadku produkcji rozproszonej koszt ten szacuje się na 8 EURO/kg. Szacunki w przypadku tej technologii zależą bardzo silnie od ceny produkowanej energii elektrycznej. W chwili obecnej dominuje produkcja scentralizowana co wymaga, przy wdrażaniu floty autobusów wodorowych uwzględnienia transportu wodoru z miejsca produkcji do miejsca tankowania, jak i składowania wodoru. Wodór można transportować w postaci sprężonego gazu lub w postaci płynnej, uzyskanej przez skroplenie gazu. Skroplony wodór transportuje się w specjalnych cysternach pociągami, ciężarówkami lub statkami. Wodór w postaci sprężonego gazu transportuje się rurociągami, w specjalnych rurowozach zabudowanych na naczepach lub przyczepach samochodów ciężarowych lub kolejną. Jeden typowy rurowóz przewozi jednorazowo ok. 300 kg sprężonego wodoru. Na przykład w Niemczech planuje się na większą skalę przewożenie wodoru kolejną [12]. W fazie wdrażania są technologie transportu wodoru związanego z substancjami organicznymi (uwodornianie). Technologia LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*) jest bardzo obiecująca zarówno w zakresie transportu, jak i przechowywania wodoru [13]. Najtańszym sposobem przesyłania wodoru jest przesyłanie za pomocą rurociągu. Jednak już w chwili obecnej istniejąca infrastruktura przesyłowa nie jest wystarczająca, a jej budowa wymaga dużych nakładów kapitałowych. Najczęstszym sposobem transportu wodoru jest transport drogowy rurowozami zabudowanymi na naczepach lub przyczepach [14]. Stosuje się go do przewożenia wodoru w skali regionalnej oraz lokalnej przy zaopatrywaniu stacji tankowania. Koszt przewożenia wodoru na odległość kilkuset kilometrów szacuje się średnio na 2 USD/kg. Uzasadnia to rozproszoną produkcję wodoru, jeśli brak jest rurociągów do przesyłania wodoru, a odległość od producenta jest rzędu kilkuset kilometrów [15]. Kolejnym wyzwaniem przy wdrażaniu floty autobusów wodorowych jest ma-

gazygowanie wodoru na pojeździe oraz w stacjach tankowania. Stosowanych jest kilka sposobów magazynowania wodoru [16]. Największym problemem w magazynowaniu wodoru jest jego ekstremalnie mała gęstość 0.09 kg/m³ (najlżejszy z istniejących pierwiastków). Natomiast wodór ma bardzo dużą energię na jednostkę masy, tj. 33 kWh/kg. Jednak gęstość energii w warunkach normalnych pozostaje mała bo wynosi 0,003 kWh/l, co w porównaniu z olejem napędowym (10 kWh/l) jest wielkością bardzo małą. Dlatego wodór jest przechowywany jako sprężony lub w postaci płynnej. Wówczas ma dużo większą gęstość energii, co prowadzi do zmniejszenia kosztów magazynowania poprzez ograniczoną objętość i podwyższenia wagi.

Jednak skraplanie wodoru wymaga zużycia stosunkowo dużej ilości energii elektrycznej, typowo pomiędzy 12, a 15 kWh/kg. Stanowi to ok. 40% energii zawartej w wodorze [16]. Wodór w stanie ciekłym przechowuje się w zbiornikach kriogenicznych pod ciśnieniem ok. 10 bar. Ze względu na wymagania stosunkowo dużej ilości energii do skraplania wodoru, najczęściej wodór przechowuje się w postaci sprężonej nawet do 900 bar, co wymaga zużycia około 4,4 kWh energii na kilogram wodoru. Stanowi to ok. 13% energii zmagazynowanej w wodorze. Firma Linde podaje, że kompresor jonowy zużywa dla tego samego ciśnienia jedynie 2,7 kWh/kg, co stanowi tylko 8% energii zmagazynowanej w wodorze. Sprężony wodór przechowuje się w zbiornikach kompozytowych najczęściej z warstwą polimerową wewnątrz (ang. *lining*), zbiorniki mogą być wykonane z metalu lub włókna węglowego. Stacje tankowania wodoru mogą mieć różne konstrukcje, które wynikają ze sposobu magazynowania wodoru oraz ciśnienia tankowania. Jak podają źródła literaturowe, w świecie jest eksploatowanych 328 stacji tankowania wodoru, w tym 139 stacji w Europie [17]. Stacje te różnią się technologią przechowywania i dystrybucji wodoru, a przede wszystkim ciśnieniem roboczym tankowania. Wyróżnia

się dwa standardy ciśnienia tankowania 350 bar dla autobusów i aplikacji kolejowych oraz 700 bar dla samochodów osobowych. Wyjątkiem są autobusy firmy Hyundai, które mają również zbiorniki na wodór przystosowane do ciśnienia 700 bar. Wśród stacji tankowania wodoru można wyróżnić stacje dedykowane dla autobusów, najczęściej budowane w zajezdniach lub stacjach publicznych, na których można tankować zarówno autobusy, jak i samochody osobowe. Generalnie stacje tankowania można zrealizować w oparciu o różne źródła wodoru [18]:

- stacje tankowania wodoru zintegrowane z produkcją wodoru,
- stacje tankowania wodoru z zewnętrzną dostawą wodoru, za pomocą transportu drogowego (kolejowego) lub za pomocą rurociągu.

Stacje tankowania różnią się nie tylko ciśnieniem ładowania, ale również wydajnością, co oznacza możliwą maksymalną liczbę pojazdów do zatankowania w jednostce czasu. Jest to szczególnie ważne ze względu na konieczność sprężania wodoru i ograniczoną wydajność sprężarek oraz ich koszt zależny od wydajności. Przeciętny autobus miejski zużywa na dobę ok. 30 kg wodoru.

Klasyczna stacja tankowania wodoru, w przypadku dostarczania wodoru poprzez transport z zakładów produkujących wodór składa się z [19]:

- niskociśnieniowego magazynu wodoru,
- sprężarki wodoru,
- wysokociśnieniowego magazynu wodoru,
- boostera (opcja),
- chłodziarki wodoru,
- dystrybutora do tankowania.

W przypadku stacji z produkcją wodoru, dodatkowo w skład stacji wchodzi urządzenie do produkcji - reformer gazu ziemnego lub elektrolizer, jako najczęściej stosowane oraz urządzenie do doczyszczania wodoru, aby osiągnął on czystość wymaganą przez odpowiednie normy (Norma europejska to norma EN 17124 „Paliwo wodorowe - Specyfikacja



produktu i zapewnienie jakości - Zastosowania polimerowych ogniw paliwowych (PEM) dla pojazdów drogowych") lub normę SAE J2719_201511, określając dopuszczalne zawartości zanieczyszczeń dla wodoru klasy 5, która jest wymagana przy zastosowaniu ogniw paliwowych membranowych. Typowe instalacje tego typu na świecie pozwalają na produkcję od 100 kg (najbardziej rozpowszechnione) do 400 kg wodoru na dobę (największe zrealizowane w praktyce) [20]. Reformingowi poddaje się gaz ziemny lub biogaz, a produktem tego procesu jest wodór oraz dwutlenek węgla. Do realizacji tego procesu konieczna jest woda dejonizowana oraz źródło ciepła do wytwarzania pary o ciśnieniu około 25 bar i temperaturze pomiędzy 700°C, a 1100°C w obecności katalizatora niklowego [21]. Innym źródłem wodoru może być, zintegrowany ze stacją tankowania proces elektrolizy wody. W procesie tym następuje rozkład wody na tlen i wodór poprzez doprowadzenie napięcia DC do elektrolizera. Najczęściej stosowane elektrolizery to elektrolizery alkaliczne i z membranami polimerowymi typu PEM. Aby realizować ten proces konieczne jest doprowadzenie odpowiedniej mocy elektrycznej oraz dejonizowanej wody. Bardzo istotny jest również proces chłodzenia tak, aby proces elektrolizy przebiegał w temperaturze poniżej 100°C, choć współczesne nowe konstrukcje elektrolizerów pozwalają na pracę w temperaturze 130°C, co pozwala na intensyfikację procesu elektrolizy i zwiększenie produkcji wodoru [22]. W obu procesach powstaje wodór, który może zawierać zanieczyszczenia, niedopuszczalne dla zastosowań w ogniwach paliwowych membranowych. W szczególności niebezpieczna jest zawartość nawet śladowych ilości tlenu węgla oraz cząstek stałych, dlatego też po każdym procesie produkcji wodór należy doczyścić w celu usunięcia zanieczyszczeń. W obu wspomnianych procesach produkowany wodór ma stosunkowo niskie ciśnienie, dlatego też bezpośrednio z produkcji wodór po-

winien być magazynowany (buforowany) w niskociśnieniowych zbiornikach, a następnie sprężany i przefiltrowany do wysokociśnieniowych magazynów wodoru, z których bezpośrednio napędzają się zbiorniki w pojazdach lub też dodatkowo spręża się stosując booster, który reguluje ciśnienie tankowania do 350 bar w przypadku autobusów. Konieczna jest też chłodziarka wodoru, tak aby w czasie sprężania wodoru w zbiorniku pojazdu temperatura nie przekroczyła 85°C, co zapewnia bezpieczeństwo przy napełnianiu zbiornika [23]. Koszt budowy stacji tankowania wodoru zawiera się w granicach pomiędzy 0,8 do 2,1 mln Euro [24]. Według tego samego źródła koszt budowy jednego kilometra rurociągu do przesyłania wodoru wynosi 0,4 do 3,2 mln EURO za kilometr.

Co do standardów bezpieczeństwa związanych z zastosowaniem wodoru w pojazdach, to wybuchowość wodoru nie jest większa od wybuchowości metanu lub paliw płynnych, z jedną różnicą - wodór jest nietoksyczny i bezwonny, co powoduje, że trudniej jest wykryć jego obecność. W porównaniu z parami benzyny i gazem ziemnym wodór musi mieć znacznie większą koncentrację, aby mógł wybuchnąć, odpowiednio dla benzyny graniczna wartość koncentracji wynosi 1,1 do 3,3%, dla gazu ziemnego 5,5-14%, natomiast dla wodoru 18,3-59%. Temperatura samozapłonu wodoru wynosi 585°C i jest znacznie większa od obecnie stosowanej benzyny (208-501°C) oraz gazu ziemnego (540°C). Prawie niemożliwe jest spowodowanie wybuchu wodoru w wolnej przestrzeni z powodu jego dużej dyfuzyjności. Wodór jest 14 razy lżejszy od powietrza i przy otwarciu zaworu prędkość wylotu ze zbiornika jest ok. 20 m/s. Wodór jest bezpieczny dla środowiska naturalnego, choć nie jest zbadany wpływ na zmiany klimatyczne, w przypadku, gdy zbierze się nad atmosferą ziemską i stanowić będzie powłokę podobną do ozonowej. Jeśli już wodór zapali się, to słup ognia skierowany jest do góry, a bardzo często płomień jest niewidoczny. Wodór potrze-

buje bardzo mało energii do spowodowania zapłonu, dużo mniej niż benzyna i gaz ziemny. Odpowiednio wartości te wynoszą dla wodoru 0,02 mJ, dla benzyny 0,24 mJ oraz dla gazu ziemnego 0,29 mJ [25]. Pomimo nieznacznych różnic w skłonności wodoru do wybuchu w stosunku do innych paliw stosowanych w transporcie przy budowie stacji tankowania wodoru obowiązują specjalne regulacje [26]. W pracy [26] podano regulacje do budowy stacji tankowania wodoru jakie obowiązują w Chinach i porównano je z wymaganiami stacjami do tankowania CNG. Wymagania te tylko nieznacznie się różnią. Najważniejszą cechą tych regulacji jest podanie najmniejszej dopuszczalnej odległości pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi stacji. Stacja zbudowana według tych regulacji mieści się w prostokącie o wymiarach 25,9 m x 27,1 m. Szczególnie ważna jest norma ISO 17268 dotycząca urządzeń przyłączeniowych wykorzystywanych przy tankowaniu pojazdu zasilanego ogniwami paliwowymi wodorowymi.

■ Przykłady realizacji stacji tankowania wodoru

Wśród istniejących i eksploatowanych stacji tankowania wodoru w Europie dominują stacje z zewnętrznym zapatrzeniem w wodór poprzez dowóz rurowozami, średni koszt dowozu jednego transportu w Europie szacowany jest na 800 Euro [19]. Przykłady takich stacji tankowania, przystosowanych do tankowania autobusów, są stacje w Karlsruhe (rys. 1), Londynie (rys. 2), na lotnisku w Stuttgarcie (rys. 3). Eksploatowane są również stacje wodorowe z produkcją wodoru na terenie stacji. Przykładami takich stacji są stacja w Aberdeen (rys. 4), stacja w Oslo (rys. 5), w których wodór produkowany jest przez elektrolizę wody. Istnieje kilka stacji, do których wodór jest dostarczany za pomocą rurociągu, jak na przykład stacja tankowania w Rotterdamie (rys. 6).



Rys. 1. Stacja tankowania wodoru w Karlsruhe z dostarczaniem wodoru z zewnątrz za pomocą rurowozu, z możliwością magazynowania 100 kg wodoru oraz ciśnieniem tankowania 350 i 700 bar



Rys. 2. Stacja ładowania wodoru w Londynie w zajezdni autobusowej przystosowana do magazynowania wodoru w ilości 180 kg i ciśnieniu tankowania 350 bar

Stacja w Londynie ma konstrukcję kaskadową, co oznacza, że nie musi posiadać boostera, regulację ciśnienia realizuje się za pomocą kaskady zbiorników na wodór. Wodór magazynuje się w niskim ciśnieniu, to jest w ciśnieniu 250 bar, natomiast niewielką ilość gazu magazynuje się w ciśnieniu 450 bar. Procedura tankowania polega na tankowaniu pustego zbiornika autobusu z ciśnienia 250 bar, natomiast dopełnianie wodoru do ciśnienia 350 bar realizuje się z drugiego zbiornika, w którym panuje ciśnienie 450 bar. Jest to rozwiązanie bardziej ekonomiczne, gdyż nie wymaga instalacji boostera. Można stosować system 3 stopniowy (250 bar, 350 bar i 450 bar), co ogranicza konieczność stosowania chłodziwa wodoru. Dodatkowo gaz jest importowany z Holandii i przywożony rurowozami, w których panuje ciśnienie 500 bar. W tym układzie nie ma konieczności instalowania sprężarki wodoru.

W stacji tankowania pracującej w Stuttgarcie jest zainstalowany booster oraz sprężarka wodoru i jest to rozwiązanie bardziej rozpowszechnione.

Wnioski

Bez wątpliwości w niedalekiej przyszłości w miejskim transporcie publicznym dominować będą autobusy elektryczne. Porównując autobusy elektryczne zasilane z baterii oraz z ogniwami paliwowymi (rozwiązania hybrydowe) należy zauważyć różnice pomiędzy tymi dwoma rozwiązaniami. Autobusy bateryjne mają znacznie ograniczony zasięg, długi czas ładowania baterii, problem z głębokim rozładowaniem, które ogranicza żywotność baterii oraz stosunkowo duży koszt zakupu baterii, a co równie ważne - muszą się poruszać po trasach, na których jest możliwość instalacji szybkich ładowarek zwiększających zasięg pojazdów. Natomiast autobusy zasilane z ogniw paliwowych mają znacznie większy zasięg ze względu na znacznie większą gęstość energii odniesioną do wagi źródła, bardzo krótki czas tankowania oraz brak problemów z szybkością



Rys. 3. Stacja tankowania wodoru na lotnisku w Stuttgarcie, z dowozem wodoru z zewnątrz i ciśnieniem tankowania 350 i 700 bar



Rys. 4. Stacja tankowania wodoru z produkcją wodoru poprzez elektrolizę wody w Aberdeen z możliwością magazynowania 420 kg wodoru, i ciśnieniem tankowania 350 bar

degradacją baterii. Autobusy wodorowe mogą być wdrażane zastępując bezpośrednio klasyczne autobusy napędzane silnikami wewnętrznego spalania, bez konieczności zmiany trasy kursowania oraz budowy kosztownych pośrednich stacji szybkiego ładowania.

Jak można zauważyć, autobusy o napędzie elektrycznym zasilane wodorem są łatwiejsze do wdrożenia niż autobusy elektryczne zasilane z baterii, co może być zachętą do ich zastosowania w najbliższej przyszłości. Wdrożenie floty autobusów miejskich wodorowych wymaga budowy dedykowanej stacji tankowania. Stacje te mogą być również wykorzystywane jako stacje tankowania dla samochodów osobowych, jednak wymaga to dodatkowego sprzężenia wodoru.



Rys. 5. Stacja tankowania wodoru z produkcją wodoru za pomocą elektrolizy wody o możliwości magazynowania wodoru w ilości 321 kg oraz ciśnieniu tankowania 350 bar



Rys. 6. Stacja tankowania wodoru przystosowana do odbioru wodoru z rurociągu w Rotterdamie, z ciśnieniem tankowania 350 i 700 bar

Fot. autora



Bibliografia

1. <http://www.euro.who.int/en/media-centre/sections/press-releases/>.
2. A. Sharma, V. Strezov, Life cycle environmental and economic impact assessment of alternative transport fuels and power-train technologies, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.04.160.
3. Onat NC, Kucukvar M, Tatarı O, Uncertainty-embedded dynamic life cycle sustainability assessment framework: An ex-ante perspective on the impacts of alternative vehicle options *Energy* 112:715-728. (2016).
4. Anantharaman G, Krishnamurthy S, Ramalingam V (2013) A review on combustion, performance, and emission characteristics of fuels derived from oil seed crops (biodiesels), *Australian Journal of Crop Science* 7:1350.
5. Brondani M, Hoffmann R, Mayer FD, Kleinert JS (2015) Environmental and energy analysis of biodiesel production in Rio Grande do Sul, Brazil *Clean Technologies and Environmental Policy* 17:129-143.
6. Zhao Y, Tatarı O (2015) A hybrid life cycle assessment of the vehicle-to-grid application in light duty commercial fleet, *Energy* 93:1277-1286.
7. Wood E, Wang L, Gonder J, Ulsh M (2013) Overcoming the range limitation of medium-duty battery electric vehicles through the use of hydrogen fuel-cells, *SAE International Journal of Commercial Vehicles* 6:563-574.
8. McKinsey & Company, "Hydrogen Scaling Up" for Hydrogen Council, November 2017, p. 31.
9. Lei Li, H. Manier, M. A. Manier, Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 103 (2019) 342-360.
10. Lei Li, H. Manier, M. A. Manier, O. Bique, A., E. Zondervan, An outlook towards hydrogen supply chain networks in 2050 - Design of novel fuel infrastructures in Germany. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 90-103. doi:10.1016/j.cherd.2018.03.037.
11. Shell Hydrogen Study: Energy of the future? Shell report, Hamburg, 2017.
12. Almansoori, A., Shah, N., 2012. Design and operation of a stochastic hydrogen supply chain network under demand uncertainty. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 3965-3977.
13. Niermann, M., Drünert, S., Kaltschmitt, M., & Bonhoff, K. (2019). Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs) - techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12, 290.
14. Lahnaoui A, Wulf C, Heinrichs H, Dalmazzone D. Optimizing hydrogen transportation system for mobility by minimizing the cost of transportation via compressed gas truck in North Rhine-Westphalia. *Appl Energy* 2018;223:317-328.
15. <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/Default.aspx>.
16. Reuß, M., Grube, T., Robinus, M., Preuster, P., Wasserscheid, P., & Stolten, D. (2017). Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Applied Energy*, 200, 290-302.
17. <http://www.netinform.net/H2/H2Stations/Default.aspxv>
18. T. Sinigaglia, F. Lewiski, M. E. S. Martins, J. C. M. Siluk, Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review, *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 42, Issue 39, 2017, pp. 24597-24611.
19. D. Apostolou, G. Xydis, A literature review on hydrogen refueling stations and infrastructure. Current status and future prospects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 2019.
20. <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-data/international-hydrogen-fueling-stations> (przełądane 20.01.2020).
21. J. Alzemi, J. Andrews, Automotive hydrogen fueling stations; An international review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 2015, pp. 483-499.
22. S. Toghyani, E. Afshari, E. Baniasadi, S.A. Atyabi, G.F. Thermal and electrochemical performance assessment of a high temperature PEM electrolyzer, *Energy*, 227, 2018, pp. 237-246.
23. N. de Miguel, B. Acosta, D. Baraldi, R. Melideo, R. Ortiz Cebolla, P. Moretto, The role of initial tank temperature on refuelling of on-board hydrogen tanks, *international journal of hydrogen energy* 41, 2016, pp. 8606-8615.
24. International Energy Agency, 'Technology Roadmap. Hydrogen and fuel cells', 2015. Paris, France.
25. Zini G, Tartarini P. Solar hydrogen energy systems: science and technology for the hydrogen economy. Springer, 2011.
26. Shunxi Li, Jinghao Long, Pang-Chieh Sui, Zhengxi Hou, Richard Chahine, Jinsheng Xiao, Addition of hydrogen refueling for fuel cell bus fleet to existing natural gas stations: A case study in Wuhan, China, *Int J Energy Res.* 2019; 1-16.

