

# Geneza technologii wodorowych

The genesis of hydrogen technologies

Dr Andrzej Szałek (Toyota Central Europe), inż. Jakub  
Stefaniak (Politechnika Warszawska, Wydział Mechaniczny  
Energetyki i Lotnictwa)  
2022-04-01

## Summary

In the era of searching for new, ecological energy sources, the question arises which of the energy carriers is the optimal choice. The answer to this question may be hydrogen. It is a fuel that is used in every branch of industry due to its high calorific value and the possibility of its production at the place of demand. Hydrogen technology is widely available and scalable, which makes it possible to use it not only in passenger transport, but also in stationary applications, heavy transport, water transport or rail transport. Hydrogen power units with accessories, thanks to their scalability, can be used in virtually any technical solution. Given the need to replace classic fossil fuels with another raw material that will provide the same or higher efficiency of existing solutions, hydrogen becomes the right choice. Hydrogen can be converted into electricity using fuel cells, and it can also be converted into mechanical energy in the combustion process in an internal combustion engine like other gases.

**Keywords:** hydrogen, hydrogen technologies, fuel cells, transport, passenger cars

## Streszczenie

W dobie poszukiwania nowych, ekologicznych źródeł energii pojawia się pytanie, który z nośników energii jest optymalnym wyborem. Odpowiedzią na to pytanie może być wodór. Jest to paliwo, które wykorzystane jest w każdej gałęzi przemysłu ze względu na jego wysoką kaloryczność oraz możliwość jego produkcji w miejscu zapotrzebowania. Technologia wodorowa jest szeroko dostępna i skalowalna, co umożliwia wykorzystanie jej nie tylko w transporcie osobowym, ale również w zastosowaniach stacjonarnych, transporcie ciężkim, transporcie wodnym czy transporcie kolejowym. Wodorowe jednostki napędowe wraz z osprzętem, za sprawą swojej skalowalności mogą znaleźć zastosowanie w praktycznie każdym rozwiązaniu technicznym. Biorąc pod uwagę konieczność zastąpienia klasycznych paliw kopalnych innym surowcem, który zapewni taką samą bądź wyższą sprawność istniejących rozwiązań, wodór staje się odpowiednim wyborem. Wodór może być przekształcany w energię elektryczną za pomocą ogniw paliwowych, a także może być przekształcany w energię mechaniczną w procesie spalania w silniku spalinowym jak inne gazy.

**Słowa kluczowe:** wodór, technologie wodorowe, ogniwa paliwowe, transport, samochody osobowe

## Spis treści

Historia technologii wodorowych .....	3
Skalowalność układu napędowego .....	14
Podsumowanie.....	20
Bibliografia.....	21

## Historia technologii wodorowych

Troska o kondycje naszej planety dla przyszłych pokoleń, wysoka emisyjność układów konwencjonalnych oraz wyczerpujące się zasoby paliw kopalnych przyświecały Toyocie podczas tworzenia napędów przyszłości. Już przeszło 30 lat temu rozpoczęte zostały badania nad implementacją zelektryfikowanych napędów w motoryzacji. Na przestrzeni tego okresu jasnym stało się, że możliwym jest nie tylko obniżenie bądź całkowite wyeliminowanie emisji zanieczyszczeń przez sektor transportu, lecz wprowadzenie technologii, która umożliwiłaby oczyszczanie powietrza podczas eksploatacji środków transportu. Odpowiedzią na ten problem stał się napęd wodorowy, który dzięki nieustannie rozwijanej infrastrukturze tankowania i nowoczesnych metod produkcji może stać się wiodącym rodzajem napędu w transporcie<sup>1</sup>.

Toyota równolegle rozpoczęła prace nad technologią hybrydową, wodorową i akumulatorową już w 1992 roku. Po zaledwie czterech latach od rozpoczęcia prac badawczych dotyczących technologii wodorowych zadebiutował pierwszy pojazd FCEV (z ang. Fuel Cell Electric Vehicle). Był to model FCEV-1 (rys. 1) zbudowany na bazie Toyoty RAV4, moc wyjściowa zastosowanych ogniw wynosiła 22,5 kW. Pojazd wyposażony był w zbiornik z wodorku metalu, który umożliwiał magazynowanie wodoru pod ciśnieniem 350 bar. Pojazd prototypowy mógł poruszać się z prędkością do 100 km/h, co obecnie nie jest imponującym wynikiem, lecz w tamtych okresie było to dużym osiągnięciem. Zbiorniki mieściły 2 kg wodoru co pozwalało pokonać zasięg aż 250km.

Rysunek 1. Toyota FCEV-1, 1996

(Toyota news; data dostępu: 17.02.2022)



W 2001 roku Toyota opracowała kolejne modele koncepcyjne FCHV-3 i FCHV-4 (rys. 2) zbudowane w oparciu o nadwozie Toyoty Highlander. W tym modelu moc wyjściowa układu ogniw

---

<sup>1</sup> Australia's National Hydrogen Strategy. COAG Energy Council Hydrogen Working Group, <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>, data dostępu: 17.02.2022;

Zajkowski K., Siwek K., Karpiński W., (2016); pt. „Wykorzystanie niekonwencjonalnych technologii w zasilaniu nowoczesnych pojazdów”

paliwowych wynosiła 90 kW, jest to czterokrotnie wyższa wartość niż w przypadku poprzedniego modelu koncepcyjnego. Zastosowany układ napędowy pozwalał na rozpędzenie pojazdu do około 150 km/h i przejechanie maksymalnie 250 kilometrów. Rok później Toyota uzyskała dopuszczenie do eksploatacji samochodów napędzanych wodorem, ograniczona liczba egzemplarzy została dostarczona na rynek japoński i amerykański (USA). Wersja wprowadzona w 2002 roku wyposażona była w ten sam zestaw ogniw paliwowych, który umożliwiał pokonanie ponad 300 km po jednorazowym zatankowaniu pojazdu.

Rysunek 2. Toyota FCHV-4, 2001

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Rok 2003 był rokiem przełomowym w historii technologii wodorowych, na targach Tokio Motor Show zaprezentowany został koncepcyjny model Toyota Fine-N. Był to pojazd wodorowy, którego zbiorniki magazynowały wodór pod ciśnieniem 700 bar. W każdym z czterech kół pojazdu zamontowany został silnik elektryczny o mocy 25 kW, generujący 110 Nm maksymalnego momentu obrotowego. Według deklaracji producenta pojazd był w stanie pokonać nawet 500 km przy pełnych zbiornikach. Dzięki położonemu naciskowi na optymalizację wymiarów zastosowanego ogniwa paliwowego, udało się zmniejszyć jego wysokość do 150 mm.

Rysunek 3. Toyota Fine-N, 2003

(Ultimatecarpage; data dostępu 21.02.2022)



Wiedza jaką udało się zebrać podczas tworzenia wymienionych wcześniej pojazdów koncepcyjnych, pozwoliła na opracowanie pierwszych limitowanych produkcyjnie modeli wodorowych Toyoty. W 2008 roku zaprezentowane zostały dwa modele Toyoty: FCHV-adv (rys. 4) i FCHV. Przeprojektowanie układu ogniw paliwowych pozwoliło na zwiększenie sprawności aż o 25%. Zastosowany został również system rekuperacji, który umożliwiał odzyskiwanie części energii kinetycznej podczas hamowania pojazdu. Energia była magazynowana w akumulatorze niklowo-wodorkowym, który wykorzystywany był do wspomagania układu napędowego, równoległe do ogniw paliwowych. Dodatkowo system ogniw paliwowych wyposażony został w system kontrolny monitorujący degradację katalizatora elektrody, poprawiający trwałość ogniwa. Zastosowane ogniwa paliwowe posiadały membranę polimerową oraz elektrody, w których platyna pełniła rolę katalizatora reakcji. Całkowita moc układu wynosiła 90 kW. Pierwszy produkcyjny pojazd wodorowy Toyoty był rewolucyjny pod względem zasięgu jaki oferował, maksymalnie mógł on przejechać 560 km. Wynik ten był o tyle zaskakujący, że model FCHV-adv pod względem swojego zasięgu przewyższał znacząco możliwości klasycznych napędów konwencjonalnych oferowanych w tym czasie. Wysoki zasięg możliwy był dzięki zastosowaniu innowacyjnych materiałów do produkcji zbiorników magazynujących wodór. Stało się to możliwe dzięki kompozytowym zbiornikom ciśnieniowym, które opracowane zostały przez Toyotę. Pojazd wyposażony był w dwa takie zbiorniki, które łącznie miały pojemność 156 litrów. Umieszczone zostały pod tylną kanapą oraz pod podłogą bagażnika. Model FCHV posiadał zbiorniki poprzedniej generacji, które utrzymywały gaz pod ciśnieniem 35 MPa, których pojemność była mniejsza o 8 litrów (łącznie 148 litrów) względem odpowiednika wysokociśnieniowego. Skutkowało to jedynie zasięgiem około 330 km, przy zastosowaniu tego samego układu ogniw paliwowych i akumulatora niklowo-wodorkowego.



Rysunek 4. Toyota FCHV-adv, 2008

(Autonews; data dostępu 21.02.2022)



Po dwudziestu dwóch latach od rozpoczęcia badań podnoszących sprawność i funkcjonalność napędów wodorowych, w 2014 roku Toyota zaprezentowała światu swój pierwszy produkcyjny wodorowy pojazd, który dostępny był na wszystkich kontynentach. Model nosił nazwę Mirai (rys. 5), który w języku japońskim oznacza przyszłość. Rzeczywiście nazwa modelu odzwierciedla kierunek rozwoju produktów Toyota. W rzeczywistości Mirai stała się kolejną generacją pojazdów hybrydowych Toyota, z tą różnicą, że głównym źródłem energii nie był już silnik konwencjonalny a ogniwo paliwowe. Do budowy układu napędowego wykorzystano ten sam sterownik mocy co w klasycznym napędzie hybrydowym. Tutaj również produkowana w ogniwie energia elektryczna oraz zgromadzona w akumulatorze wysokonapięciowym trafiała równoległe do silnika elektrycznego. Układ ten pozwalał na przełączanie się pomiędzy pozyskiwaniem energii z ogniwa bądź z akumulatora. Zastosowany został akumulator trakcyjny niklowo-wodorkowy o pojemności 1.6 kWh, który znalazł zastosowanie w takich modelach jak Toyota Camry. Akumulator pełni w pojeździe wodorowym rolę magazynu energii, który gromadzi energię odzyskiwaną podczas hamowania. Stopień naładowania akumulatora utrzymywany jest między 20-80%, dzięki temu akumulatory trakcyjne zastosowane w pojazdach hybrydowych charakteryzuje bardzo wysoka trwałość. W momencie osiągnięcia zbyt niskiego poziomu naładowania akumulatora, ogniwo równoległe doładowuje go energią elektryczną. Zachowanie optymalnych warunków ładowania i rozładowywania akumulatora gwarantuje jego długą żywotność i bezawaryjność układu napędowego. Energia z akumulatora trakcyjnego pobierana jest podczas ruszania pojazdu oraz w przypadku poruszania się ze stałą prędkością. Dodatkowo akumulator wspomaga układ napędowy energią w momencie gwałtownego przyspieszania, co zapewnia dynamikę i elastyczność układu<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Merkisz J., Pielecha I., (2015); pt. „Układy elektryczne pojazdów hybrydowych”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej;

Merkisz J., Pielecha I., (2015); pt. „Układy mechaniczne pojazdów hybrydowych”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej;

Schmidt T., (2020); pt. „Pojazdy hybrydowe i elektryczne”, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności)

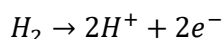
Rysunek 5. Toyota Mirai pierwszej generacji, 2014

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)

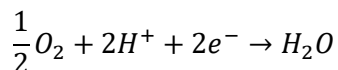


Wodorowe pojazdy Toyoty są tak naprawdę kolejną generacją zeroemisyjnych pojazdów hybrydowych. Tak jak zostało wspomniane, głównym źródłem energii jest ogniwo paliwowe, którego zasada działania jest bardzo prosta.

Wodór dostarczany jest ze zbiorników wysokociśnieniowych do ogniwa paliwowego, gdzie dzięki regulatorowi ciśnienia możliwy jest dobór odpowiednich parametrów przepływu gazu do kierowanego do anody (rys. 7). Wodór przepływając przez poziome kanały dyfunduje na porowatej powierzchni membrany polimerowej w obecności katalizatora w postaci warstwy Pt/C o grubości 2-3  $\mu\text{m}$ . Zmiana katalizatora z platynowego na platynowo kobaltowy zapewniła aktywność katalityczną większą o 80% względem poprzednich generacji ogniw paliwowych. Następnie protony przenikają przez cienką warstwę membrany elektrolitowej. Zastosowanie membrany polimerowej zapewnia bardzo wysoką przewodność protonów do katody. Elektronów niemożące przeniknąć przez membranę, tworząc prąd zasilają silnik elektryczny i akumulator, w zależności od warunków eksploatacji pojazdu. Reakcja chemiczna zachodząca w anodzie<sup>3</sup>:



Następnie jony wodoru łączą się z tlenem, doprowadzanym za pomocą sprężarki powietrza. W poprzedniej generacji ogniwa kanały powietrzne charakteryzowały się dużą szerokością, co sprzyjało zatrzymywaniu się pary wodnej, utrudniając dyfuzję tlenu do warstwy katalitycznej. Zjawisko to jest skrajnie niepożądane, gdyż zmniejsza wydajność ogniwa. Podjęta została decyzja o zmianie kształtu kanałów powietrznych, aby wyeliminować zjawisko retencji wilgoci. Dzięki zastosowaniu w budowie katody wąskich kanałów o przestrzennej strukturze, przepływ tlenu jest turbulentny co zwiększa dyfuzję tlenu do warstwy katalitycznej. Reakcja chemiczna zachodząca w katodzie<sup>3</sup>:



Powierzchnia katody ma własności hydrofobowe, które umożliwiają szybkie odprowadzanie powstałej w ogniwie wody. W celu poprawnej pracy całego ogniwa, membrana musi pozostać stale nawilżona. W konstrukcji ogniw paliwowych Toyoty został wyeliminowany układ zewnętrznego

---

<sup>3</sup> O'Hayre R., Cha S., Colella W., Prinz F., (2016); pt. „Fuel Cell Fundamental, Third Edition”, USA, Wiley;

Hasegawa T., Imanishi H., Nada M., Ikogi Y., (2016); pt. „Development of the fuel cell system in the Mirai FCV. In SAE Technical”;

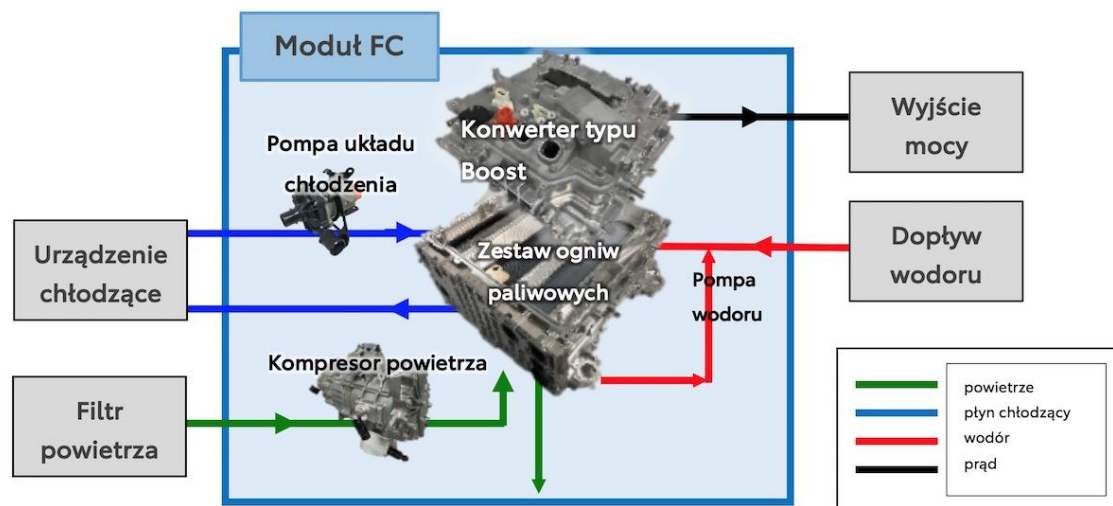
Matsunaga M., Fukushima T., Ojima K., (2009); pt. „Powertrain system of Honda FCX Clarity fuel cell vehicle”



systemu nawilżania. Uzyskano to dzięki integralnemu układowi nawilżania membrany elektrolitowej oraz specjalnie dobranym kanałom przepływowym następuje recyrkulacja części wilgoci z powrotem do układu. Pozwoliło to na obniżenie masy układu ogniw o 13 kg oraz obniżenie jego objętości o 15 litrów<sup>4</sup>.

Rysunek 6. Zespół niskotemperaturowego ogniwa paliwowego Toyoty

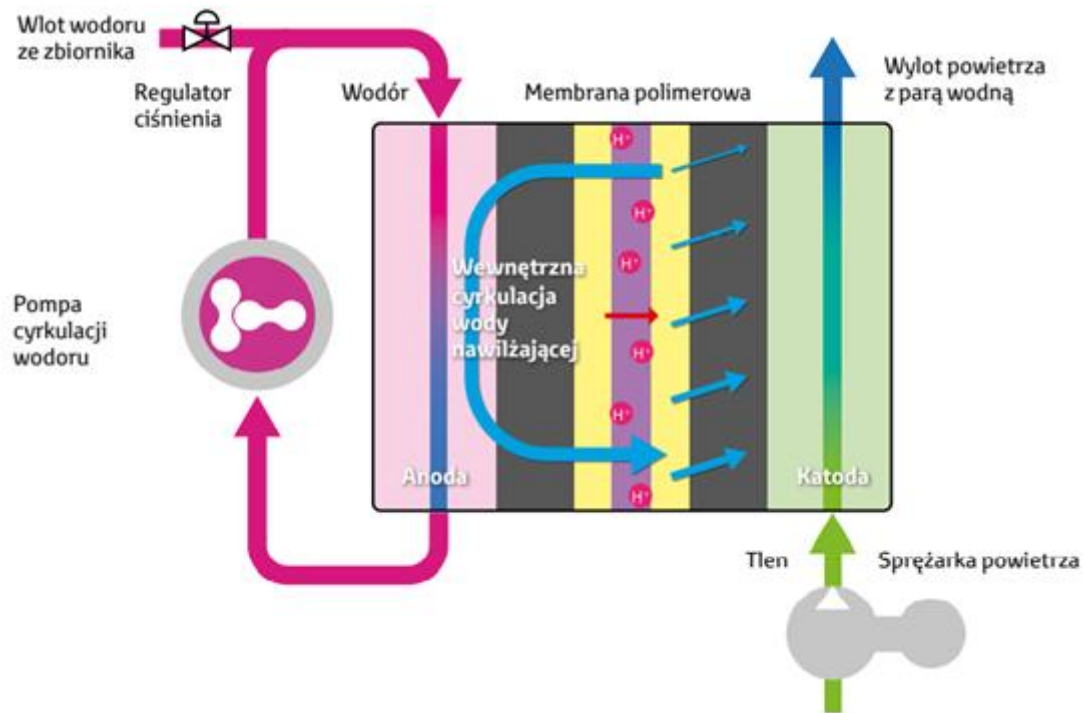
(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



<sup>4</sup> O'Hayre R., Cha S., Colella W., Prinz F., (2016); pt. „Fuel Cell Fundamental, Third Edition”, USA, Wiley; Hasegawa T., Imanishi H., Nada M., Ikogi Y., (2016); pt. „Development of the fuel cell system in the Mirai FCV. In SAE Technical”

Rysunek 7. Zasada działania ogniwa paliwowego Toyoty

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Przepływ wodoru wymuszony jest pompą cyrkulacyjną. Część gazu, która nie uległa rozkładowi na membranie wprowadzana jest ponownie do obiegu. W modelu Mirai zastosowana została przetwornica napięcia, zwiększająca napięcie prądu generowanego przez ogniwa paliwowe do 650 V. Takie rozwiązanie pozwoliło na zasilenie silnika elektrycznego prądem wyższej mocy, przy jednoczesnym obniżeniu liczby cel w ogniwie (370 cel)<sup>5</sup>.

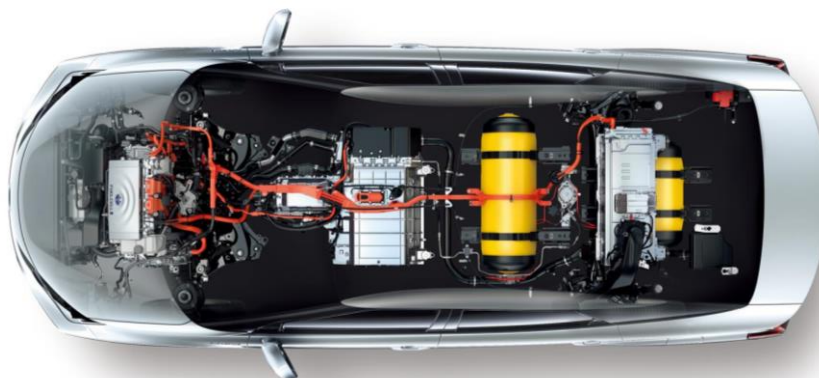
Objęściowym wskaźnikiem gęstości mocy nazywamy stosunek mocy generowanej przez ogniwo paliwowe do jego objętości wyrażonej w litrach. Wszystkie wymienione usprawnienia jakie zastosowano w ogniwach paliwowych montowanych w Toyocie Mirai pierwszej generacji zaowocowały ponad dwukrotnym wzrostem objęściowego wskaźnika mocy względem ogniw opracowanych w 2008 roku. Ogniwa Toyoty Mirai pierwszej generacji charakteryzowały się objęściowym wskaźnikiem gęstości mocy na poziomie 3,1 kW/L, zaś ogniwa modelu FCHV-adv posiadały jedynie 1,4 kW/L.

<sup>5</sup> Szalek A., (2020); pt. „Energy Conversion in motor vehicles”;

Szalek A., Pielecha I., Cieślak W., (2021); pt. „Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC)”

Rysunek 8. Budowa Toyoty Mirai pierwszej Generacji

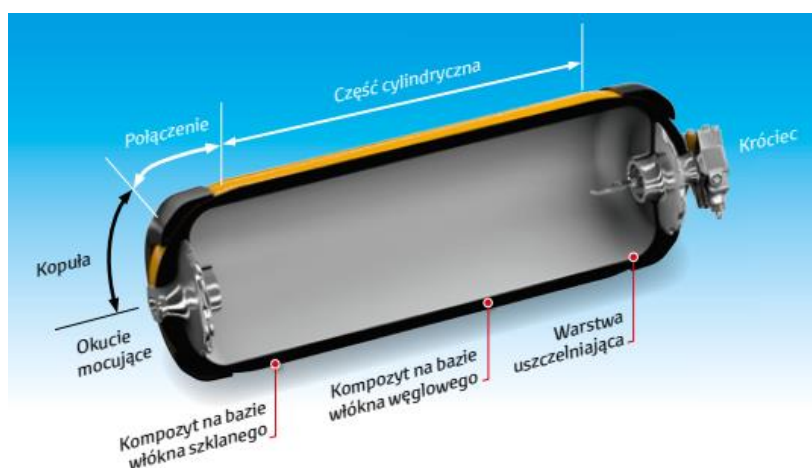
(Toyota News; data dostępu: 17.04.2022)



Na rys. 8 przedstawiona została budowa pojazdu Toyota Mirai pierwszej generacji. Samochód wyposażony został w dwa zbiorniki magazynujące wodór pod ciśnieniem 70 MPa wykonane z materiałów kompozytowych. Struktura zbiornika złożona jest z trzech warstw (rys. 9), wewnętrzna warstwa zrobiona z tworzywa sztucznego zapewnia doskonałą szczelność zbiornika. Kolejna warstwa wykonana została z włókna węglowego, zapewnia ona wytrzymałość na wysokie ciśnienie panujące w zbiorniku. Zewnętrzna warstwa zaś to kompozyt z włókien szklanych, zapewniających ochronę przed uszkodzeniami mechanicznymi zbiornika. Wykonanie zewnętrznej warstwy z włókien szklanych pozwoliło obniżyć zużycie włókien węglowych o przeszło 40%, zredukowało to znacząco koszt produkcji komponentu przy zachowaniu jego właściwości mechanicznych i wytrzymałościowych.

Rysunek 9. Budowa zbiornika kompozytowego, Toyota Mirai pierwszej generacji, 2014

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



W 2020 roku zaprezentowana została Toyota Mirai drugiej generacji (rys. 10), nowy model został przekonstruowany względem poprzedniej generacji. Zastosowanie platformy GA-L umożliwiło

bardziej ergonomiczne rozmieszczenie komponentów układu napędowego oraz większą ilość miejsca w kabinie pojazdu. W pojeździe znajdują się trzy zbiorniki wysokociśnieniowe mogące przechowywać 5,6 kg wodoru pod ciśnieniem 70 MPa, w poprzedniej generacji zbiorniki mieściły jeden kilogram wodoru mniej pod tym samym ciśnieniem. Zasięg pojazdu wzrósł o 30% względem modelu poprzedniej generacji. Rekordowy zasięg uzyskany przez Toyotę Mirai drugiej generacji to 1000 km. Dodatkową korzyścią z zastosowania nowej platformy było rozłożenia masy 50:50 między osiami pojazdu.

Rysunek 10. Toyota Mirai drugiej generacji, 2020

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Zestaw ogniw paliwowych zastosowany w najnowszej generacji Toyoty Mirai został umieszczony w jednej obudowie wraz z pompą wody, chłodnicą międzystopniową, sprężarką klimatyzacji, sprężarką powietrza oraz pompą cyrkulacji wodoru. W konstrukcji stosu ogniw zastosowano metodę zgrzewania tarciovego z przemieszaniem, dzięki czemu zredukowano dystans między ogniwem paliwowym a obudową. Inżynierowie Toyoty skupili się na optymalizacji wszystkich komponentów pod względem masy i sprawności, efektem tego jest obniżenie masy całego zespołu o 50% przy jednoczesnym 12% wzroście generowanej mocy. Tak jak w poprzedniej generacji ogniwo paliwowe wykorzystuje membranę polimerową. Zastosowano mniejszą liczbę ogniw w stosie (aktualnie 330, wcześniej 370). Objętościowy wskaźnik gęstości mocy stosu ogniw wzrósł z 3,1 kW/L do 4,4 kW/L, a maksymalna moc z 114 kW do 128 kW. Dodatkowo udało się usprawnić system uruchamiania ogniwa w temperaturze do  $-30^{\circ}\text{C}$ .

Proces tankowania Toyoty Mirai trwa niespełna 3 minuty i nie wymaga pomocy obsługi stacji tankowania. W trakcie tankowania pojazd cały czas komunikuje się ze stacją w celu pomiaru szczelności oraz monitorowania ilości wodoru w zbiorniku. Komunikacja możliwa jest dzięki falom podczerwieni (rys. 11), które stale przekazują niezbędne informacje z odbiornikiem umieszczonym w nalewaku dystrybutora.

Rysunek 11. Diody podczerwone umieszczone przy króćcu do tankowania Toyoty Mirai drugiej generacji

(opracowanie własne)



Katalizatorem reakcji w ogniwie Toyoty Mirai drugiej generacji jest warstwa platynowo kobaltowa o grubości 2-3  $\mu\text{m}$ . Istotnym jest jednak fakt ilości użytej platyny w stosie ogniw paliwowych gdyż jest ona mniejsza niż dzisiejszych konstrukcjach katalizatorów samochodów z silnikami spalinowymi. Dodatkowo, możliwości technologicznie pozwalają na odzyskanie 95% tego pierwiastka w procesie recyklingu ogniwa. Producenci ogniw paliwowych nieustannie starają się stworzyć nowe materiały, które będą mogły zastąpić wykorzystanie platyny jako katalizatora reakcji<sup>6</sup>.

W zespole m (rys. 12) gabaryty przetwornicy napięcia zostały zmniejszone o 21% względem rozwiązania zastosowanego w modelu poprzedniej generacji. Waga podzespołu została obniżona została o 2,9 kg do 25,5 kg. Toyota po raz pierwszy wykorzystwała w tranzystorach sterownika mocy IPM (z ang. Intelligent Power Module) materiał półprzewodnikowy nowej generacji oparty o węgiel krzemu. Pozwoliło to na zwiększenie mocy wyjściowej i mniejsze zużycie energii przy zastosowaniu mniejszej liczby tranzystorów, co z kolei przyczyniło się do zmniejszenia liczby ogniw paliwowych w stosie.

Toyota Mirai drugiej generacji wyposażona została w akumulator trakcyjny litowo-jonowy o pojemności 1,2 kWh (4 Ah). Pomimo mniejszej pojemności, wcześniej wynosiła 1,6 kWh (6,5 Ah), nowy akumulator trakcyjny jest wydajniejszy oraz generuje wyższą moc. Akumulator zawiera 84 cele, które łącznie generują napięcie znamionowe na poziomie 310,8 V, poprzednio nikolowo-wodorkowy akumulator generował napięcie 244,8 V. Masa całkowita układu akumulatora została obniżona z 46,9 kg do 44,6 kg. Maksymalna moc wyjściowa została zwiększona z 25,5 kW x 10 sekund do 31,5 kW x 10 sekund. Mniejsze wymiary akumulatora pozwoliły na umieszczenie go za tylnym rzędem siedzeń. Akumulator chłodzony jest powietrzem, którego wloty znajdują się po obydwu stronach tylnych siedzeń tylnej kanapy<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> O'Hayre R., Cha S., Colella W., Prinz F., (2016); pt. „Fuel Cell Fundamental, Third Edition”, USA, Wiley; Brzeżański M., Szalek A., Szramowiat M., (2019); pt. „Tests of the vehicle's power unit with fuel cells at reduced ambient temperature”

<sup>7</sup> Hu X., Jiang J., Egardt B., Cao D., (2015); pt. „Advanced power-source integration in hybrid electric vehicles: multicriteria optimization approach”;

Stefaniak J., (2022); pt. „Analiza porównawcza i badania bezstopniowych przekładni napędowych K311 i P610 Toyoty Corolli”;

Cieślak W., Pielecha I., Szalek A., (2015); pt. „Assessment of parameters of the hybrid drive system in vehicles in urban traffic conditions”



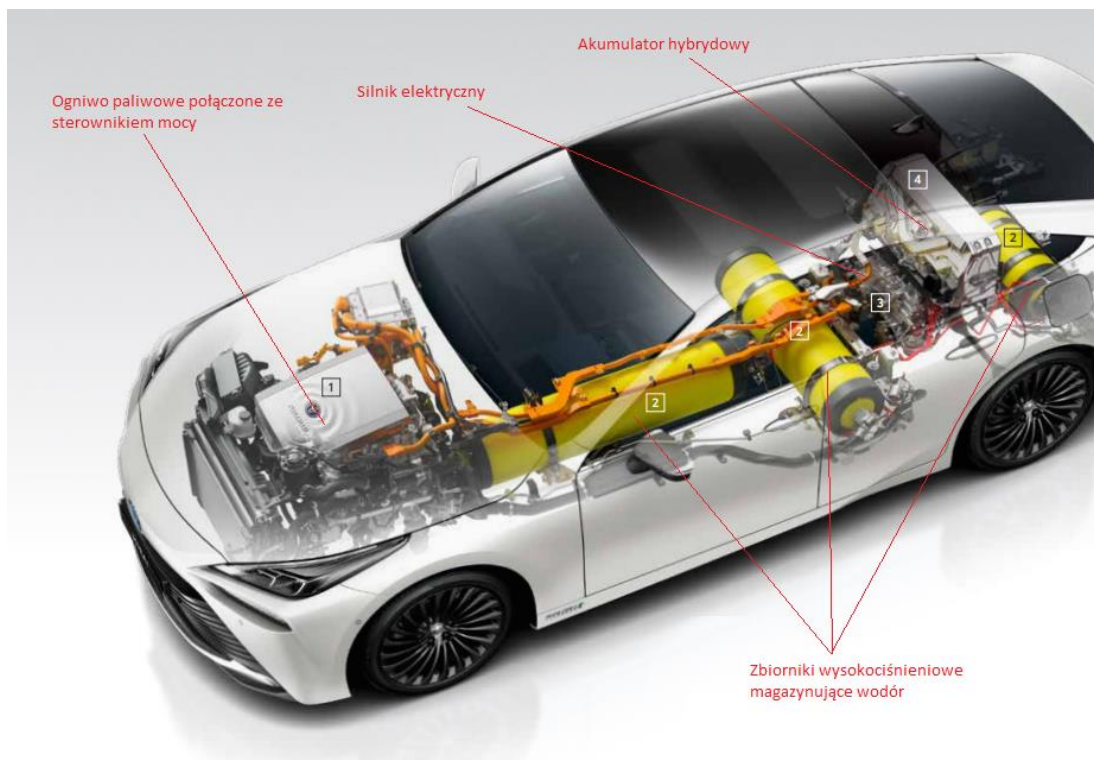
Rysunek 12. Zespół ogniwo paliwowych Toyota Mirai drugiej generacji

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Rysunek 13. Budowa Toyota Mirai drugiej generacji, 2020

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)





W Toyocie Mirai drugiej generacji w układzie dolotowym zastosowano zespół oczyszczania powietrza, który usuwa zanieczyszczenia z zasysanego powietrza. Do pochłaniania cząstek stałych, tlenków azotu, dwutlenku siarki i innych zanieczyszczeń służy specjalny filtr katalityczny, który eliminuje od 90 do 100% zanieczyszczeń o średnicy od 0 do 2,5 mikrona.

Na przestrzeni lat firmie Toyota udało się zautomatyzować proces produkcji ogniw paliwowych i skrócić czas produkcji jednego ogniwa z 15 minut do około 15 sekund. Umożliwiło to masową produkcję Toyoty Mirai drugiej generacji, a także przyjęcia celu produkcyjnego na poziomie 30 tys. samochodów rocznie. Wraz z rozwojem infrastruktury wodorowej w Polsce i na świecie, pojazdy te stawać się będą coraz powszechniejsze ze względu na swój duży zasięg, krótki czas tankowania oraz funkcjonalność użytkowania. Toyota w następnych latach dążyć będzie do wydłużenia żywotności swoich ogniw paliwowych, tak aby sprostały bardzo dużym obciążeniom oraz ciągłej pracy, jaka wymagana jest w transporcie ciężkim. W pojazdach osobowych wykorzystanie układu napędowego bardzo rzadko odbywa się pod pełnym obciążeniem, a sam czas użytkowania pojazdu jest ułamkiem całego okresu eksploatacji. Samochody osobowe dużą część czasu są nieużytkowane, bądź przemierzają krótkie odcinki w niskim zakresie obciążenia. W transporcie ciężkim pojazdy wykorzystywane pod bardzo pod dużym obciążeniem, toteż Toyocie zależy na minimalizacji zużycia ogniw paliwowych. Celem jest opracowanie układu ogniw, które nie wymagają serwisu membrany polimerowej na przestrzeni całego okresu eksploatacji pojazdu transportu ciężkiego.

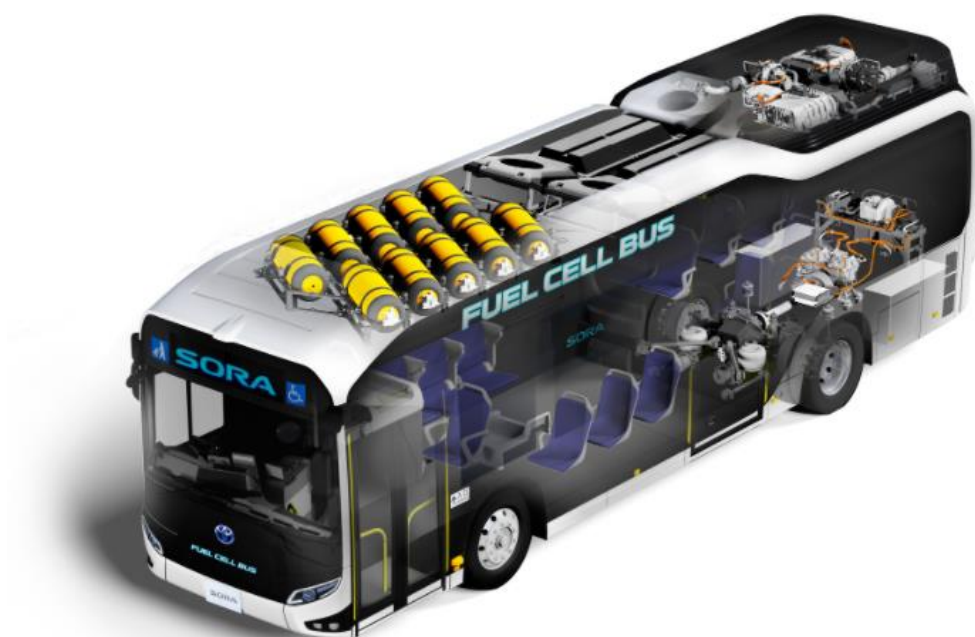
Toyota planuje również udoskonalanie swoich zbiorników wysokociśnieniowych, tak aby ich koszt produkcji był coraz niższy. Zmniejszenie ilości wykorzystanych, drogich włókien węglowych jest najprostszą drogą do obniżenia ceny gotowego komponentu. Na przestrzeni następnych lat, spodziewanym jest kolejny przełom w produkcji zbiorników wodorowych.

## Skalowalność układu napędowego

Najważniejszą cechą wodorowego układu napędowego Toyoty jest jego skalowalność, możliwa jest jego implementacja do różnych środków transportu oraz w rozwiązaniach stacjonarnych. Toyota opracowała miejski autobus wodorowy o nazwie Sora (rys. 14), do napędu, którego został zastosowany układ napędowy z Toyoty Mirai pierwszej generacji. Pojazd posiada 10 zbiorników kompozytowych, magazynujących wodór pod ciśnieniem 70 MPa. Do budowy wykorzystano dwa zespoły ogniw paliwowych z Toyoty Mirai pierwszej generacji, generujących łącznie moc 228 kW. Autobus może przewozić 79 pasażerów, w tym 22 na miejscach siedzących i 56 stojących.

Rysunek 14. Autobus miejski Toyota Sora

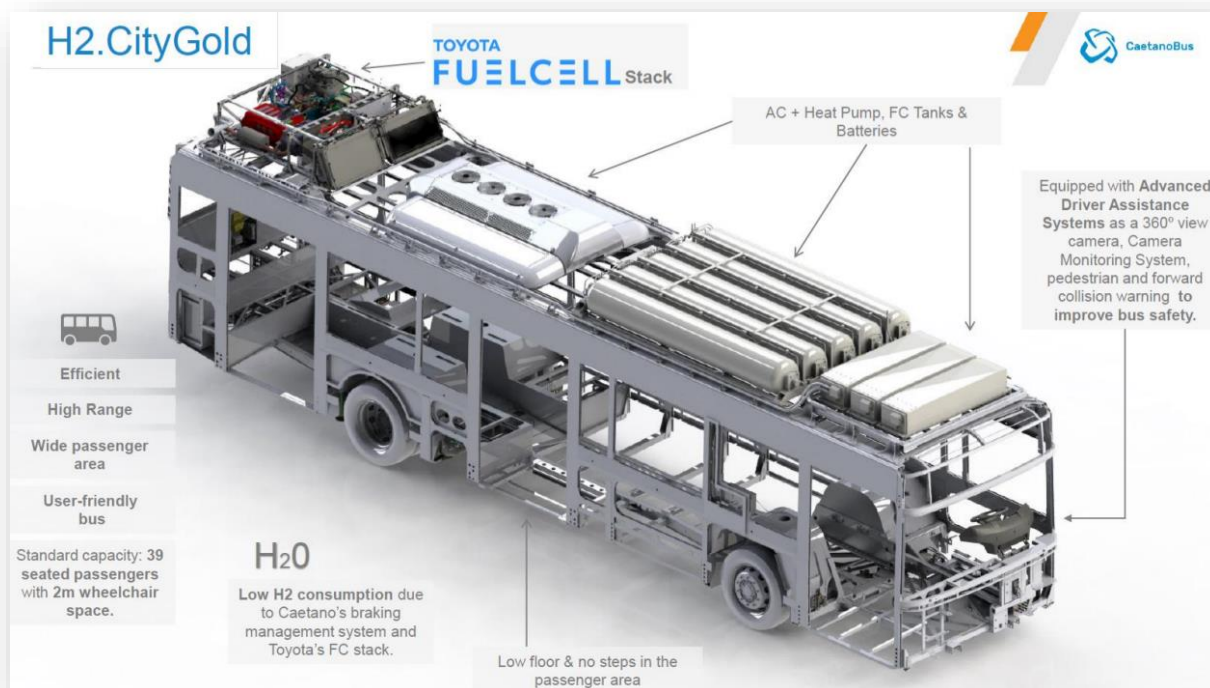
(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Ogniwa paliwowe Toyoty zaimplementowane zostały również do wodorowego pojazdu Caetanobus (rys. 15). Autobus ten produkowany jest w Europie przez portugalską firmę Caetano.

Rysunek 15. Portugalski autobus miejski firmy CaetanoBus

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



W sierpniu 2017 roku zawarte zostało porozumienie między firmami Seven-Eleven Japan Co. i Toyotą Motor Corporation rozpoczynające wspólny projekt mający na celu obniżenie emisji dwutlenku węgla do środowiska. Toyota wprowadziła do projektu wodorowe ciężarówki o ładowności do 3 ton (rys. 16). Ciężarówki opracowane zostały we współpracy z firmą Hino, gdzie ich maksymalny zasięg wynosi 200km, a czas tankowania kilka minut. W ciężarówkach energia elektryczna produkowana przez ogniwa paliwowe wykorzystywana jest nie tylko do napędzania silnika elektrycznego, ale również do zasilania agregatu chłodniczego podczas jazdy i postoju. W 2017 roku otwarty został przyjazny dla środowiska i klientów sklep Seven-Eleven Chiyoda Nibancho Store, będący flagową placówką nowej inicjatywy środowiskowej. Drugi taki obiekt, sklep Seven-Eleven Sagamihara Hashimotodai Itchome Store, powstał w 2018 roku, zastosowane w nim źródła energii odnawialnej zaspokajają 46% zapotrzebowania na energię elektryczną.

Rysunek 16. Toyota Hino, ciężarówka wodorowa

(Automacha; data dostępu: 21.02.2022)



Toyota we współpracy z firmą Hino opracowała także wielkogabarytową ciężarówkę wodorową (rys. 17), której maksymalny zasięg wynosić będzie 600km, a masa dopuszczalna będzie wynosić 25 ton. W projekcie wykorzystane zostały ogniwa niskotemperaturowe z elektrolitem polimerowym, stosowane w Toyocie Mirai drugiej generacji jak i nowo opracowane zbiorniki wysokociśnieniowe oraz akumulator litowo-jonowy. W Japonii transport ciężarowy stanowi około 70% całkowitej emisji CO<sub>2</sub> z pojazdów użytkowych, zatem niezmiernie ważnym staje się opracowywanie także rozwiązań zeroemisyjnych dla pojazdów ciężarowych. Wiosną 2022 roku rozpoczęły się testy serii prototypowej tego modelu.

Rysunek 17. Wielkogabarytowa ciężarówka na wodór firmy Toyota oraz Hino

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Rozwiązania wodorowe Toyoty znajdują również zastosowanie w dużych, wieloosiowych pojazdach ciężarowych. Projekt o nazwie „Truck Alpha” został rozpoczęty w 2017 roku we współpracy firm Toyota i Kenworth Trucks. Do ciężarówki (rys. 18) zaimplementowane zostały ogniwa paliwowe Toyoty. Stworzona wspólnie ciężarówka posiada maksymalny zasięg do 500 km, a czas tankowania trwa około 30 minut. Ciężarówka nie posiada ograniczeń w zakresie ciągłości pracy i transportowanego ładunku, oznacza to, że może być wykorzystywana przez całą dobę. Pojazd wykorzystywany jest aktualnie w stanie Kalifornia w USA przez firmę UPS i Toyota Logistics.

Rysunek 18. Ciężarówka wielkogabarytowa Toyoty i Kenworth Trucks

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Ogniwa paliwowe Toyoty znalazły także zastosowanie w łodzi firmy Energy Observer (rys. 19), która jest eksperymentalnym katamaranem zasilanym energią ze źródeł odnawialnych. Ponieważ system ogniwi paliwowych Toyoty został od początku stworzony jako rozwiązanie modułowe, możliwym było zaadoptowanie go do jachtu oceanicznego. Projekt ten jest przykładem użycia napędu wodorowego poza transportem drogowym i możliwości wykorzystania go w rozwiązaniach w wielu gałęziach transportu i przemysłu.



Rysunek 19. Katamaran Energy Observer

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



Współpraca z firmą Energy Observer Development nie zakończyła się jedynie na opracowaniu eksperymentalnego katamaranu. W 2020 roku został zaprezentowany generator stacjonarny o nazwie GEH2, zbudowany w oparciu o ogniwa paliwowe Toyoty (rys.20). Zastosowano w nim ogniwa paliwowe z modelu Mirai, cały moduł waży około 290 kg i generuje 60 kW mocy (w szczycie 92 kW).

Rysunek 20. Generator stacjonarny GEH2 firmy EOD i Toyota

(Toyota France; data dostępu: 21.02.2022)



Wykorzystanie ogniw paliwowych jako główne źródło energii w układach napędowych nie jest jedynym sposobem wykorzystywania wodoru jako paliwa. Toyota w 2017 roku rozpoczęła projekt mający na celu opracowanie wodorowego silnika tłokowego. Mimo powstałej już konstrukcji jest on wciąż na wstępnym etapie rozwoju oraz testów. Prace rozwojowe wodorowego silnika ciepłego skupiają się na zastosowaniu jednostki napędowej w komercyjnym pojeździe. Eksperymentalny silnik wodorowy już wykorzystywany jest w pojeździe Corolla Sport biorącego udział w wyścigach z serii Super Taikyu pod szyldem ROOKIE Racing w Japonii. W 2021 roku zaprezentowany został również eksperymentalny pojazd Toyota GR Yaris (rys. 21) w wersji z wodorowym silnikiem tłokowym. Silnik ten nosi oznaczenie G16E-GTS, ma pojemność 1,6 litra oraz jest wyposażony w turbosprężarkę. W tej jednostce napędowej przeprojektowany został układ wtłokowy, tak by możliwym było wykorzystanie wodoru jako paliwa. Wodór spala się dużo szybciej niż benzyna, a to oznacza dużą dynamikę przy jednoczesnej zeroemisyjności układu napędowego.



Rysunek 21. Toyota GR Yaris Hydrogen

(Toyota News; data dostępu: 17.02.2022)



## Podsumowanie

Technologie wodorowe w obecnej dekadzie będą znajdować coraz szersze zastosowanie nie tylko w transporcie kołowym, co zostało zobrazowane na przytoczonych przykładach, ale także w innych dziedzinach transportu jak i po za nim (np. generatory prądu). Dynamika wzrostu ich wykorzystania będzie niewątpliwie związana bezpośrednio z rozwojem infrastruktury tankowania.

Ogniwa paliwowe niskotemperaturowe typu PEM posiadają wyższą sprawność niż obecnie, powszechnie stosowane silniki spalinowe. Dalsze badania nad ich rozwojem przyczynią się do podniesienia ich sprawności oraz trwałości przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji.

Zastosowanie wodoru jako paliwa nie musi oznaczać zakończenia ery silników cieplnych, dając okres przejściowy dla tego rodzaju napędu. Badania nad silnikami tłokowymi zasilanymi wodorem wciąż trwają i mogą zakończyć się wprowadzeniem ich do szerokiego zastosowania.

## Bibliografia

1. Australia's National Hydrogen Strategy. COAG Energy Council Hydrogen Working Group, <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>, data dostępu: 17.02.2022
2. Automacha; <https://automacha.com/toyota-partners-with-7-11-for-hydrogen-truck-pilot-program/>, data dostępu: 21.02.2022
3. Autonews; <https://www.autonews.fr/photo/a,3388,toyota-fchv-adv.html>, data dostępu 21.02.2022
4. Borowski P., Pielecha I., Cieřlik W., Bueschke W., Czajka J., (2014); pt. „Hybrydyzacja układów napędowych pojazdów samochodowych”
5. Brzeżański M., Szałek A., Szramowiat M., (2019); pt. „Tests of the vehicle's power unit with fuel cells at reduced ambient temperature”
6. Cieřlik W., Pielecha I., Szałek A., (2015); pt. „Assessment of parameters of the hybrid drive system in vehicles in urban traffic conditions”
7. Hasegawa T., Imanishi H., Nada M., Ikogi Y., (2016); pt. „Development of the fuel cell system in the Mirai FCV. In SAE Technical”
8. Hu X., Jiang J., Egardt B., Cao D., (2015); pt. „Advanced power-source integration in hybrid electric vehicles: multicriteria optimization approach”
9. Matsunaga M., Fukushima T., Ojima K., (2009); pt. „Powertrain system of Honda FCX Clarity fuel cell vehicle”
10. Merksiz J., Pielecha I., (2015); pt. „Układy elektryczne pojazdów hybrydowych”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
11. Merksiz J., Pielecha I., (2015); pt. „Układy mechaniczne pojazdów hybrydowych”, Poznań, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej
12. O'Hayre R., Cha S., Colella W., Prinz F., (2016); pt. „Fuel Cell Fundamental, Third Edition”, USA, Wiley
13. Schmidt T., (2020); pt. „Pojazdy hybrydowe i elektryczne”, Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności
14. Stefaniak J., (2022); pt. „Analiza porównawcza i badania bezstopniowych przekładni napędowych K311 i P610 Toyoty Corolli”
15. Szałek A., (2020); pt. „Energy Conversion in motor vehicles”
16. Szałek A., Pielecha I., Cieřlik W., (2021); pt. „Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) Energy Flow Analysis in Real Driving Conditions (RDC)”
17. Toyota France; <https://media.toyota.fr/toyota-motor-europe-investit-dans-la-start-up-eodev-pour-promouvoir-les-solutions-hydrogene/>, data dostępu: 21.02.2022
18. Toyota News; <https://www.toyotanews.eu/pl/>, data dostępu: 17.02.2022
19. Ultimatecarpage; <https://www.ultimatecarpage.com/slide/220/Toyota-Fine-N.html>, data dostępu 21.02.2022
20. Zajkowski K., Siwek K., Karpiński W., (2016); pt. „Wykorzystanie niekonwencjonalnych technologii w zasilaniu nowoczesnych pojazdów”