



## **POTENCJAŁ OGNIW PALIWOWYCH JAKO ŹRÓDŁO NAPĘDU ŚRODKÓW TRANSPORTU**

**Jarosław MARKOWSKI, Ireneusz PIELECHA,  
Marcin NOWACKI, Damian OLEJNICZAK**

*Politechnika Poznańska*

*Instytut Silników Spalinowych i Transportu*

*ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska*

*tel.: +48 61 665 2207, fax: +48 61 665 2204*

*e-mail: jaroslaw.markowski@put.poznan.pl, ireneusz.pielecha@put.poznan.pl*

*marcin.ro.nowacki@doctorate.put.poznan.pl,*

*damian.a.olejniczak@doctorate.put.poznan.pl*

**Paweł WIRKOWSKI**

*Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny*

*ul. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia*

*e-mail: p.wirkowski@amw.gdynia.pl*

**Magdalena DUDEK, Andrzej RAŹNIAK**

*Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie*

*Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego*

*al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków*

*e-mail: potoczek@agh.edu.pl*

*razniak@agh.edu.pl*

### **Streszczenie**

*Energia pozyskiwana z kopalnych surowców energetycznych związana jest z termicznymi procesami utleniania paliw. Procesy te oprócz generowania energii cieplnej są przyczyną emisji związków szkodliwych spalin do atmosfery: tlenku węgla, dwutlenku węgla, tlenków azotu, węglowodorów i cząstek stałych oraz tlenków siarki. Związki te stanowią istotne zagrożenie dla człowieka i środowiska w którym żyje. W związku z dużym udziałem pozyskania energii z paliw kopalnych w procesach ich spalania, konieczne jest poszukiwanie innych sposobów uzyskania tzw. "czystej energii". Duży potencjał w tym zakresie mogą mieć ogniwa paliwowe, których rozwój umożliwił próby ich wykorzystania we wszystkich rodzajach środków transportu, a w szczególności w pojazdach drogowych. Istotnym czynnikiem rozwoju ogniów paliwowych jest ich względnie duża sprawność oraz zaostreżenie norm emisji zanieczyszczeń z silników spalinowych stosowanych do napędu środków transportu. Koncepcja ich stosowania jest związana z wieloma problemami eksploatacyjnymi. Z tego względu w artykule podjęto próbę oceny potencjału ogniów paliwowych w zastosowaniu ich jako źródła energii do napędu środków transportu. Dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych ogniów paliwowych oraz możliwości ich wykorzystania.*

**Słowa kluczowe:** *ogniwo paliwowe, energia, napęd, metanol, wodór, środki transportu*

## 1. Wprowadzenie

Rozwój napędów różnego rodzaju środków transportu stymulowany aktami normatywnymi z zakresu ochrony środowiska osiągnął wysoki poziom technologiczny. Świadczą o tym wykorzystywane materiały do ich budowy oraz wyrafinowane procesy technologiczne ich przetwarzania. Pomimo nowych technologii stosowanych w silnikach spalinowych nie udaje się uzyskać znaczącego zwiększenia sprawności energetycznej, która ściśle jest związana ze zużyciem paliwa. Również realizacja cieplnych procesów silnikowych przebiegających w silniku spalinowym jest przyczyną emisji zanieczyszczeń w postaci tlenków azotu, tlenku węgla, węglowodorów, dwutlenku węgla oraz cząstek stałych. Dlatego poszukuje się nowych sposobów poprawy właściwości energetycznych zespołów napędowych. Przykładami takich działań są elektryfikacja zespołów napędowych w postaci wprowadzenia układów hybrydowych z zastosowaniem silników elektrycznych, układów generowania energii elektrycznej i układów jej przechowywania. Te trzy główne funkcje hybrydowego układu napędowego stosowanego w pojazdach osobowych wymagają zastosowania silnika spalinowego, elektrycznego, generatora energii elektrycznej oraz akumulatora. Powoduje to znaczne zwiększenie masy pojazdu. Jednak połączenie zalet takich jak duża sprawność silnika elektrycznego przy jego dobrych parametrach napędowych, zwiększenie sprawności energetycznej silnika przez ograniczenie jego zakresu eksploatacji do punktów charakterystyki o największych sprawnościach oraz wykorzystanie zasobnika energii elektrycznej wraz z układami odzysku energii elektrycznej z energii mechanicznej np. podczas hamowania pojazdu, przyczynia się do dużego wskaźnika sprawności napędu. Dobre rezultaty uzyskiwane dla napędów hybrydowych wynikające ze sprawności napędowej silnika elektrycznego skłaniają do podążania w kierunku napędu całkowicie elektrycznego. Problemem dotychczasowym w tego typu rozwiązaniu jest magazynowanie energii elektrycznej w akumulatorze i sprawność tego procesu w zależności od temperatury eksploatacji pojazdu oraz kwestia źródeł produkcji energii elektrycznej. Kiedy pochodzi ona ze źródeł niskoemisyjnych w postaci elektrowni wodnych, wiatrowych, ogniw fotowoltanicznych czy elektrowni jądrowych, to możemy twierdzić o ekologicznym charakterze tego napędu. Natomiast, gdy mamy do czynienia z energią elektryczną wykorzystywaną do napędu pojazdów, pochodzącą z elektrowni węglowych, to poziom ekologiczności pojazdu zdecydowanie maleje. Takie problemy powodują, że poszukuje się innych źródeł energii do napędu środków transportu, które nie będą generować związków szkodliwych zawartych w spalinach silnikowych. Jedną z koncepcji jest zastosowanie ogniw paliwowych, jako generator energii pochodzącej z paliwa do zasilania układów energetycznych środków transportu [1–4, 6–8, 10, 14–19].

## 2. Ogniwa paliwowe

Jedną z koncepcji układów napędowych z wykorzystaniem paliwa alternatywnego są tzw. układy hybrydowe, w których zamiast silnika spalinowego stosuje się ogniwa paliwowe. Ogniwa paliwowe różnią się od siebie strukturą materiałów wykorzystanych do ich konstrukcji oraz sprawnością wytwarzanej energii w zależności od tego, jakim paliwem są zasilane (tab. 1). Podział ogniw paliwowych bazuje na zastosowanym w ogniwie elektrolicie. Zastosowany elektrolit determinuje temperaturę reakcji zachodzącej w ogniwie oraz rodzaj paliwa zasilającego ogniwo. Każde z ogniw posiada zalety i wady, które określają pola zastosowań dla każdego typu ogniw [1–4, 6–8].

Ogniwa paliwowe PEM (Proton Exchange Membrane lub Polimer Electrolyte Membrane) zasilane są czystym wodorem lub re-formatem. Membraną ogniwa PEM jest materiał polimerowy np. nafion. Charakterystyczną cechą ogniw PEM jest duża sprawność w produkcji energii elektrycznej – do 65% oraz mała ilość wydzielanego ciepła. Niewątpliwą zaletą ogniwa PEM jest

dobra nadążność ogniwa w systemach poddawanych zmiennym obciążeniom oraz krótki czas rozruchu. Cechy te wynikają z niskiej temperatury reakcji zachodzącej w ogniwie – 60–100°C.

Ogniwa AFC (Alkaline Fuel Cell) jako elektrolit wykorzystują roztwór KOH. Reakcja przebiega w temperaturach od 100 do 250°C. Temperatura reakcji zależy od stężenia roztworu KOH, większe temperatury reakcji pozwalają na osiągnięcie większej sprawności ogniwa w generowaniu energii elektrycznej i ciepła. Ogniwa AFC są wrażliwe na wszelkie zanieczyszczenia i wymagają paliwa o dużej czystości.

Ogniwa DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) posiadają polimerową membranę, taką jak ogniwa PEM. Różnią się natomiast konstrukcją anody, która w ogniwie DMFC pozwala na dokonanie wewnętrznego reformingu metanolu i uzyskanie wodoru do zasilania ogniwa. Ogniwa DMFC eliminują problem składowania paliwa, są atrakcyjne dla aplikacji przenośnych ze względu na niską temperaturę zachodzącej reakcji (około 80°C). Ogniwo DMFC charakteryzuje niższa sprawność w porównaniu do ogniwa PEM i wynosi 40%.

Ogniwa PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) są stosowane do budowy systemów kogeneracji energii elektrycznej i ciepła. Sprawność generacji energii elektrycznej wynosi 40%, dodatkowo para wodna produkowana przez ogniwo, może być zamieniana na ciepło. Elektrolitem w ogniwie PAFC jest kwas fosforowy (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>). Zaletą ogniw jest wysoka tolerancja na tlenek węgla, co pozwala na stosowanie wielu paliw (ważne jest jednak odsiarczanie paliwa).

Ogniwa MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) w których elektrolitem jest stopiony węgiel Li/K pracują w wysokich temperaturach i używane są do produkcji energii elektrycznej i ciepłej jako elektrownie małej i średniej mocy. Duża temperatura reakcji zachodzącej w ogniwie pozwala na stosowanie różnych paliw tj. gaz ziemny, benzyna, wodór, propan.

Ogniwa SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) posiadają membranę wykonaną z ceramiki tlenkowej. Pracują w dużych temperaturach 650–1000°C. Dzięki temu uzyskują dużą sprawność w systemach kogeneracji energii elektrycznej i ciepła wynoszącą nawet 85%. Wadą jest czas rozruchu ogniwa i czas jego wyłączenia, co przekłada się na zastosowanie ich w stacjonarnych systemach CHP (Cogeneration Heat and Power). Ogniwa SOFC charakteryzują się wysoką tolerancją na zanieczyszczenia paliwa takich jak tlenek węgla i związki siarki, co pozwala na stosowanie wielu paliw zasilających ogniwo.

Tab.1. Zestawienie cech ogniw paliwowych [6]

Typ ogniwa	Paliwo	Temperatura pracy	Sprawność
PEM (Proton Exchange Membrane)	wodór	60–100°C	35–60%
AFC (Alkaline Fuel Cell)	wodór	100–250°C	50–70%
DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)	metanol, roztwór metanolu	75°C	35–40%
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	wodór	210°C	35–50%
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	wodór, metanol, metan, biogaz, LPG	650°C	40–50%
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	wodór, metanol, metan, biogaz, LPG	650–1000°C	45–60%

Biorąc pod uwagę parametry eksploatacyjne ogniw w aspekcie ich zastosowania, jako układy zasilania systemów napędowych środków transportu za istotne należy przyjąć dużą sprawność w generowaniu energii elektrycznej i krótkie czasy uruchomienia i wyłączenia ogniwa. Z spośród przedstawionych ogniw paliwowych właściwości pozwalające na wykorzystanie ich w przyszłościowych napędach środków transportu mają ogniwa typu PEM i AFC. Ich sprawność w generowaniu energii zawiera się w przedziale od 35 do 70%, a temperatura pracy odpowiednio dla ogniw typu PEM wynosi 60–100°C, a dla ogniw typu AFC wynosi 100–250°C. Ogniwa te zasilane są wodorem w związku z tym w przypadku chęci wykorzystania metanolu, jako paliwa zasilającego ogniwo konieczne jest stosowanie dodatkowych zewnętrznych układów reformingu.

W kwestii parametrów energetycznych i możliwości zasilania różnymi paliwami ciekawym rozwiązaniem są ogniwa typu SOFC. W ich zastosowaniu jest natomiast problem eksploatacyjny związany z wymaganą ciągłością pracy. Uzależniony jest on przede wszystkim od konieczności

pracy ogniwa w dużych temperaturach oraz zapewnieniem długiego czasu eksploatacji, która może się pogarszać podczas procesu wyłączania i uruchamiania ogniwa w wyniku tlenkowania ogniwa.

### 3. Zastosowania w układach napędu środków transportu

Pierwsze próby zastosowania ogniw paliwowych do zasilania układów napędowych środków transportu miało miejsce w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Od tamtego czasu prowadzone prace rozwojowe przyczyniły się do znacznego zwiększenia wydajności energetycznej ogniw, co przyczyniło się do zmniejszenia ich rozmiarów i masy. Skutkiem tego było zastosowanie ogniwa paliwowego w pojazdach seryjnie produkowanych przez Toyotę w 2016 roku jako model Mirai (rys. 1). Zastosowano w nim jako źródło energii do układu naparowego ogniwo polimerowe typu PEM zasilane wodorem gromadzonym w formie sprężonego gazu w zbiornikach wysokociśnieniowych. Ogniwa te jako niskotemperaturowe charakteryzują się względnie krótkim czasem rozruchu.



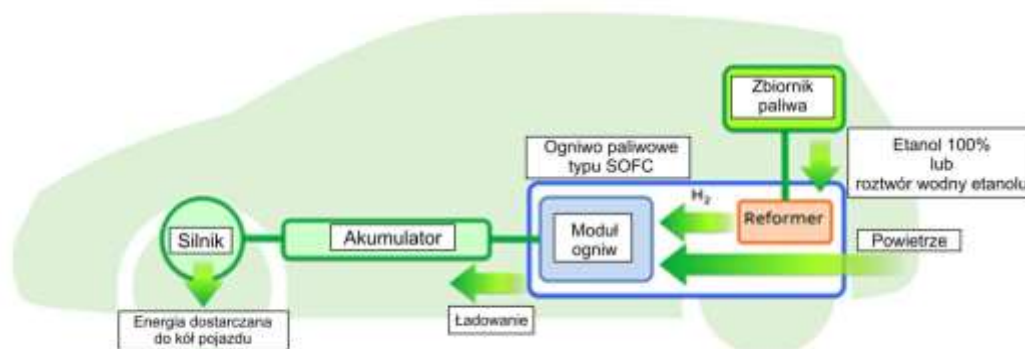
Rys. 1. Stanowisko demonstracyjne układu napędowego Toyoty Mirai [13]

Ogniwa SOFC są wykorzystywane głównie jako dodatkowe źródła energii. Ze względu na zalety ogniw SOFC jakimi są możliwości zasilania różnymi paliwami wiele firm współpracuje nad ich wdrożeniem do zastosowań transportowych. Należą do nich: Delphi (USA), FuelCell Energy (USA), Materials and Systems Research, Inc. (USA), Protonex (USA), Ultra USSI (USA), AVL (Austria), Eberspächer (Germany) oraz Catator (Sweden) [20].

Ogniwa SOFC mają tę zaletę, że mogą wykorzystywać olej napędowy do ich zasilania bez konieczności przetwarzania paliwa w celu uzyskania czystego wodoru. Sprawność elektryczna konwencjonalnego generatora pokładowego w pojeździe wynosi około 10–15% [15]. Sprawność elektryczna ogniwa SOFC wynosi obecnie około 30%, co stanowi dwukrotność standardowego rozwiązania. Emisja związków szkodliwych spalin oraz hałas są mniejsze niż w przypadku eksploatacji układów napędowych zasilanych z wykorzystaniem silników spalinowych, a wykorzystanie ciepła generowanego przez ogniwo zwiększa całkowitą sprawność systemu. Jednym z rozwiązań uzyskanych w ramach prowadzonych prac w tym zakresie jest opracowanie prezentowane wspólnie przez firmy AVL i NISSAN - jako SOFC Auxiliary Power Unit (SOFC APU) (rys. 2). Jest to rozwiązanie polegające na zastosowaniu ogniwa paliwowego SOFC jako układu doładowującego akumulatory (o maksymalnej energii 24 kWh) Li-Ion w pojeździe o masie własnej do 3,5 tony. W modelu e-NV200 zastosowano ogniwo SOFC o mocy 5 kW zasilane etanolem lub mieszaniną etanolu i wody (55% wody, 45% etanol). W wyniku realizacji reformingu wewnętrznego dostarczanego paliwa otrzymuje się wodór, który zasila ogniwo (rys. 3). Zasięg pojazdu wyposażonego w takie rozwiązanie systemu wspomagającego wynosi około 600 km [5, 20].



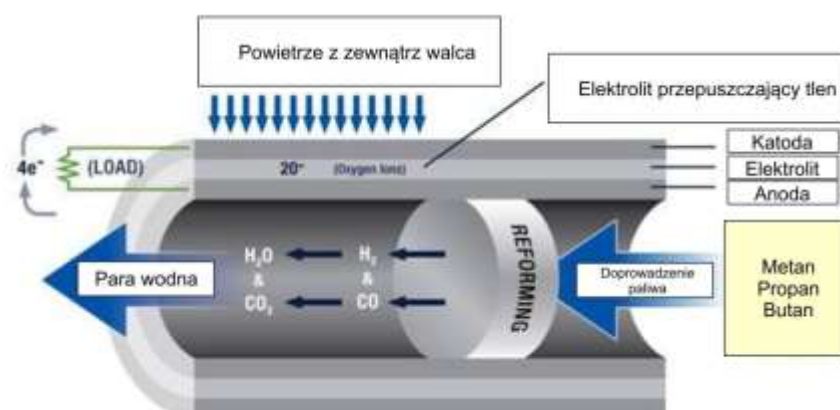
Rys. 2. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego systemu generatora energii elektrycznej z ogniwem paliwowym typu SOFC dedykowanego do pojazdu Nissan e-NV200 [5, 20]



Rys. 3. Schemat układu z ogniwem paliwowym SOFC w pojeździe [5, 20]

Wadą takiego rozwiązania jest wytwarzanie podczas reformingu metanolu - tlenku węgla. Jego obecność jest związana ze sprawnością procesu reformingu parowego metanolu i wynosi około 70–80%. Obecność tlenku węgla jest niekorzystna z powodu oddziaływania na powierzchnię katody, co podczas wyłączenia ogniwa może prowadzić do jej tzw. tlenkowania, co przy wielokrotnym procesie uruchamiania i wyłączenia ogniwa powoduje pogorszenie jego sprawności.

Firma Ascend Energy wraz z producentem ogniw SOFC Atrex Energy proponują tubularne ogniwo paliwowe do samochodów typu ATV (all-terrain vehicle). Ogniwo wykorzystuje konwencjonalne paliwo węglowodorowe jak gaz ziemny, propan, lub LPG bez zewnętrznego układu reformingu. Nie jest więc wymagane magazynowanie wodoru w pojeździe. Ogniwo pracuje w temperaturze 600–800°C generując moc 4,5 kW (rys. 4).



Rys. 4. Ceramiczne ogniwo SOFC [23]

Ze względu na tabularną budowę ogniwa uniknięto niebezpiecznych naprężeń podczas wartości temperatury ogniwa wynikających ze zmian parametrów eksploatacyjnych oraz procedur włączenia i wyłączenia ogniwa. Zastosowanie takiej konstrukcji przyczyniło się do skrócenia

okresu uruchomienie ogniwa do wartości poniżej 1 godziny, oraz spowodowało uproszczenie procedury jego wyłączenia.

Systemy wykorzystujące ogniwa paliwowe do generowania energii przeznaczonej do napędu pojazdów stosuje się również do lokomotyw. Prowadzone analizy eksploatacyjne wskazują, że najkorzystniejsze jest wprowadzenie takiego rozwiązania dla lokomotyw manewrowych. One charakteryzują się największą zmiennością warunków eksploatacyjnych a z powodu wykonywanych zadań eksploatowane są w bliskich odległościach stacji. Mały rejon oddziaływania wiąże się z uproszczonym systemem dystrybucji wodoru i jednej stacji napełniania zbiorników lokomotywy tym paliwem. Próby wdrożenia nowoczesnego napędu dotyczą zastosowania ogniw paliwowych typu PEM zasilanych wodorem magazynowanym w zbiornikach wysokiego ciśnienia umieszczonymi na platformie lokomotywy nad układem akumulatorów (rys. 5). System zasilania składa się zestawu akumulatorów zasilanych energią elektryczną wytwarzaną w ogniwie paliwowym. Silniki napędu lokomotywy zasilane są energią z akumulatorów. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano stabilną pracę ogniwa paliwowego niezależnie od warunków eksploatacyjnych lokomotywy. Parametry eksploatacyjne opracowanego układu przedstawiono w tabeli 2 [21].



Rys. 5. Prototyp lokomotywy manewrowej i schemat układu z ogniwem paliwowym PEM [21]

Tab. 2. Zestawienie parametrów eksploatacyjnych systemu energetycznego lokomotywy manewrowej [21]

Parametr	Wartość
Moc znamionowa [kW]	300–500
Średnie zapotrzebowanie na moc [kW]	85–150
Średnie zużycie paliwa [kg/h]	5,6–8
Pojemność zbiorników paliwa H <sub>2</sub> przy ciśnieniu 350 bar [kg]	60
Średnia wydajność systemu [%]	52

Przedstawiony system energetyczny zastosowany w lokomotywie manewrowej opracowany według technologii firmy Ballard ma konstrukcję modułową. Takie rozwiązanie umożliwia elastyczną integrację komponentów i łatwy dostęp do nich podczas prowadzenia prac kontrolnych i serwisowych. Zapewnia również ułatwiony sposób instalacji poszczególnych modułów systemu i zwiększa jego niezawodność i bezpieczeństwo użytkowania [21].

Producent układu zastosowanego w lokomotywie, firma Ballard we własnych opracowaniach systemów energetycznych FCyeloCity oferowanych na rynku wskazuje na typoszereg urządzeń w zależności od zapotrzebowania na moc (tab. 3). Oferowane rozwiązania o mocy 30–100 kW znalazły zastosowanie w autobusach miejskich w różnych konfiguracjach systemowych z akumulatorami dedykowanymi pojazdom elektrycznym jako urządzenia zwiększające zasięg pojazdu lub w większych autobusach w koncepcji systemu hybrydowego. Urządzenie

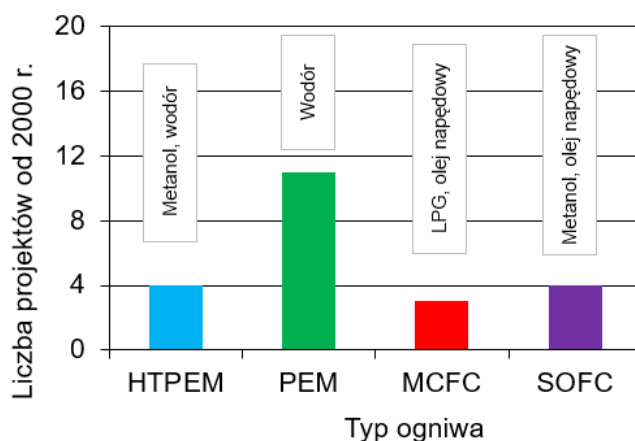
FCveloCity®-XD o mocy 200 kW jest dedykowane do modułowych systemów energetycznych dla rozwiązań napędu lokomotyw oraz statków [21].

Potencjał w wykorzystaniu ogniw paliwowych w zastosowaniach morskich jest znaczący za sprawą ich charakterystyki eksploatacyjnej. Jest ona zbliżona do charakterystyki eksploatacyjnej statku. Dotyczy to w szczególności wymaganego ciągłego procesu działania. Coraz ważniejsze znaczenie nabierają ograniczania negatywnego oddziaływania transportu na środowisko, w tym również transportu morskiego. W związku z tym wiele obecnie prowadzonych prac rozwojowych związanych z generowaniem energii do napędu statków związanych jest z wykorzystaniem ogniw paliwowych.

Tab. 3. Zestawienie urządzeń systemu energetycznego z ogniwem paliwowym oferowanych przez firmę Ballard [21]

System energetyczny z ogniwem paliwowym	 FCveloCity®-MD	 FCveloCity®-HD	 FCveloCity®-XD
Typ ogniwa paliwowego	PEM		
Moc [kW]	30	60 / 85 / 100	200
Przeznaczenie	Autobusy 8–10 metrowe, dodatkowe układy zasilania zwiększające zasięg pojazdów elektrycznych, pokładowe systemy elektryczne APU	Autobusy 10–25 metrowe z systemem napędu hybrydowego z wykorzystaniem ogniw paliwowych	Do zastosowań kolejowych i morskich

W zależności od funkcji przeznaczenia i wielkości statku, generatory energii wykorzystujące ogniwa paliwowe muszą zapewniać wymagane parametry energii. Są to zwykle wymagania dotyczące dużych wartości mocy i natężenia energii elektrycznej. Wymaga to opracowania i zastosowania nowych technologii do budowy zestawów energetycznych ogniw, które umożliwią wydajne pojedyncze ogniwa. Jest to bardzo trudne zadanie, ponieważ obejmuje dostarczanie paliwa, wytwarzanie produktów końcowych, odprowadzanie wytworzonej energii elektrycznej, a przede wszystkim zapewnienie odpowiedniego chłodzenia stosu ogniw. Prace w tym zakresie obejmują wykorzystanie ogniw paliwowych we wszystkich obszarach ich zastosowań, w tym w zastosowaniach morskich. Intensywność prowadzonych działań zależy od wielkości wsparcia przy realizacji projektów badawczo-rozwojowych prowadzonych przez firmy i jednostki badawcze zajmujące się wykorzystaniem ogniw paliwowych w jednostkach pływających (rys. 6) [9–12, 16, 17, 22, 24, 25].

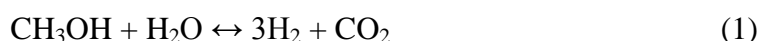


Rys. 6. Liczba projektów związanych aplikacją morską ogniw paliwowych od 2000 roku [25]

Opracowane koncepcje zawarte w prezentowanych przykładach projektów, w zależności od ich przeznaczenia, mieszczą się w zakresie wytwarzania mocy od kilku kW do 2,5 MW. Wszystkie rozwiązania dotyczą zastosowania modułowego systemu zasilania z modułami o mocy 12–60 kW i 120 kW. Liczba używanych modułów generuje potencjał sprzężenia źródła energii zainstalowanego na statku.

Większość projektów skupia się na ogniwach PEM o niskiej temperaturze i zasilanych wodorem. Ciekawym rozwiązaniem jest opracowany projekt układu zasilania w energię elektryczną okrętów podwodnych klasy 212A/214, w których ogniwo PEM zasilane jest wodorem produkowanym na pokładzie za pomocą reformera metanolu [16].

System zasilania ogniwa paliwowego stosowany w napędach łodzi podwodnych HDW typu 216 wyprodukowanych przez ThyssenKrupp Marine Systems, wykorzystuje reformer metanolu (rys. 7) i działa na zasadzie reformingu parowego. Pierwotna reakcja reformowania zachodząca w urządzeniu jest następująca:



Podczas procesu reformingu metanolu występuje także reakcja uboczna może również następować w postaci:



Reakcja ta jest niepożądana z powodu zmniejszonej wydajności procesu otrzymywania wodoru. Powstały tlenek węgla, kiedy dostanie się do ogniwa zmniejsza jego skuteczność i reaguje z katodą ogniwa, przez co pogarsza jego sprawność i może przyczynić się do jego uszkodzenia.



Rys. 7. System reformingu metanolu zainstalowany na okręcie podwodnym typu HWD 216 [16]

Proces reformingu metanolu powinien być realizowany z parametrami zapewniającymi maksymalną wydajność w uzyskiwaniu wodoru. Dlatego decydujące znaczenie ma wybór katalizatora i temperatury procesu, która może wynosić 160-200°C. W procesie reformingu przeprowadzanym poza ogniwem paliwowym ważne jest, aby temperatura procesu była niższa niż temperatura pracy ogniwa.

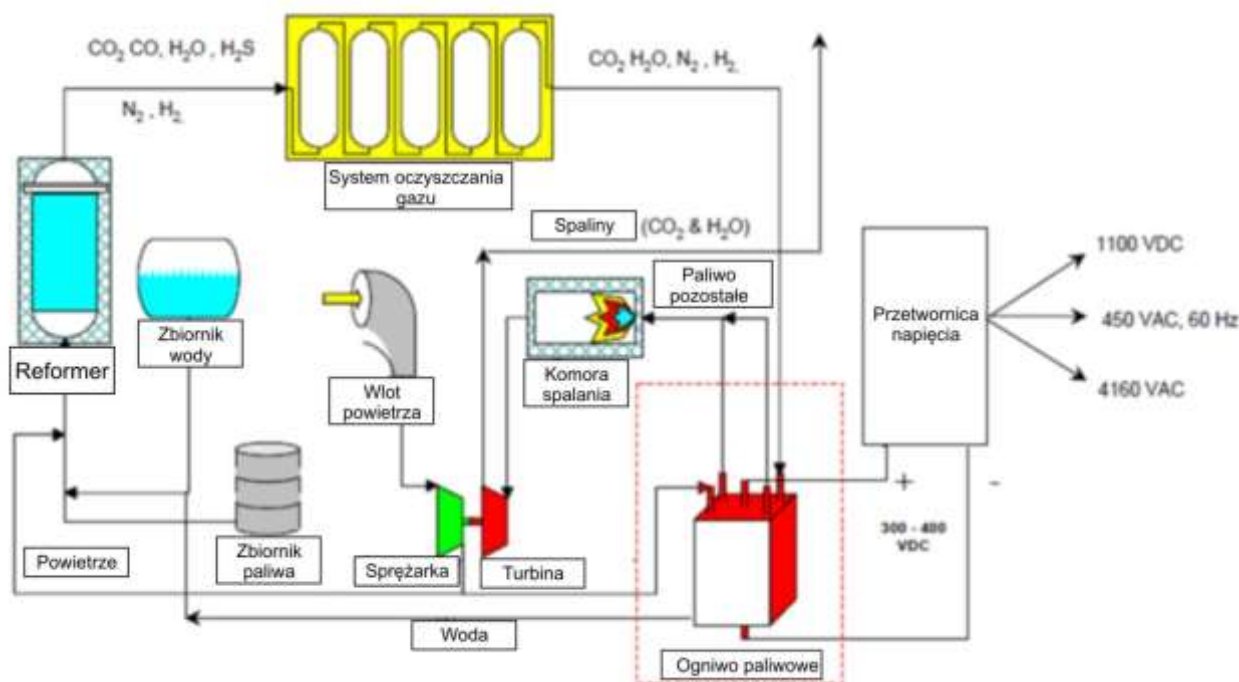
Wtedy ciepło wytworzone w ogniwie paliwowym może być wykorzystane do procesu reformingu.

Podobne problemy z dużą sprawnością ogniwa można zauważyć w ogniwach typu MCFC i SOFC zasilanych innymi paliwami niż czysty wodór. Przykładem stosowanych paliw jest LPG lub olej napędowy. Paliwa te poddane są procesowi reformingu wewnątrz ogniwa, a to zmniejsza sprawność ogniwa w rozumieniu całościowym.



Podsumowanie projektu FellowSHIP [24], w którym ogniwo paliwowe typu MCFC zasilane LPG zostało przedstawione w lutym 2012 roku. Całkowity czas pracy ogniwa wyniósł 18500 godzin, przy zakładanym maksymalnym czasie pracy 24000 godzin. Stos ogniw paliwowych pracował przy stałym obciążeniu, między  $30 \text{ mA/cm}^2$  a  $120 \text{ mA/cm}^2$ . W tym okresie eksploatacji przeprowadzono kilka testów związanych z dynamicznymi zmianami obciążenia ogniwa. Ich celem była ocena reakcji systemu na takie zmiany. Podczas realizacji programu badań ogniwa w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych statku uzyskano maksymalną sprawność elektryczną systemu wynoszącą 52,1% ze stosu ogniw paliwowych przy pełnym obciążeniu 330 kW. Podczas badań przeprowadzono pomiary emisji spalin, które potwierdziły przewidywane małe wartości emisji  $\text{NO}_x$  i  $\text{CO}_2$  [24].

Na uwagę zasługuje projekt US Ship Service Fuel Cell (US SSFC) prowadzony przez Office of Naval Research (ONR, Departament Obrony USA) w latach 2000–2011, koncentrujący się na badaniach podstawowych i stosowanych, których celem jest ocena problematyki zastosowania istniejących ogniw paliwowych i wymagań dla ich zastosowań morskich. Prace realizowane w tym projekcie obejmują ocenę i rozwój układu MCFC o mocy 625 kW i ogniwa paliwowego PEM o mocy 500 kW, wykorzystujących jako paliwo olej napędowy. Te dwa systemy funkcjonują z układami wspomagającymi, w tym reformowaniem oleju napędowego, oczyszczaniem paliwa przed ogniwem paliwowym i złożonymi systemami odzysku ciepła i energii oraz systemami do regeneracji katalizatora. System z ogniwem typu MCFC uzyskuje sprawność 53%, a z ogniwem typu PEM FC ma sprawność 35%. Uzyskane sprawności generowania energii nie są imponujące biorąc pod uwagę wielkość i złożoność systemów (rys. 8) [24].



Rys. 8. System energetyczny z ogniwem paliwowym zasilanym wodorem uzyskiwanym w procesie reformingu oleju napędowego [24]

Aby zapewnić funkcjonowanie ogniwa paliwowego, potrzebne jest przystosowanie paliwa. Do tego celu zastosowano reformer oleju napędowego. Reformer oleju napędowego działa na zasadzie reakcji reformingu parowego. Powstałe podczas reformingu związki są oczyszczane i rozdzielane w systemie oczyszczania gazu, a następnie kierowane do ogniwa paliwowego. Paliwo nieużywane w ogniwie jest spalane w komorze spalania, a powstające gazy napędzają turbosprężarkę, dostarczając do układu powietrze o wymaganych parametrach. Energia elektryczna wytwarzana

przez ogniwo paliwowe jest przetwarzana do wymaganych parametrów odbiorczych. Aktualne projekty obejmują opracowanie i wdrożenie wysokotemperaturowych ogniw paliwowych HTPEM zasilanych metanolem. Przykładem takiego działania są projekty E4Ships-Pa-X-cell – 60kW i RiverCell – 250kW. Reforming metanolu pozwala na uzyskanie około 60–70% sprawności w wytworzeniu wodoru jako paliwa do zasilania ogniwa. Poza wodorem uzyskuje się również tlenek węgla, który należy separować i wykorzystywać ich proces utleniania do wytworzenia ciepła niezbędnego w funkcjonowaniu reformera. W procesie zasilania ogniwa paliwowego wodorem uzyskiwanym w procesie reformingu metanolu wykorzystując wszystkie możliwości pozyskania energii w systemie uzyskuje się sprawność około 60% przy jednoczesnym ograniczeniu emisji związków szkodliwych głównie do emisji CO<sub>2</sub> [9, 11, 24].

#### 4. Wnioski

Biorąc pod uwagę wpływ na środowisko wynikający ze spalania paliw kopalnych, w tym metanolu, charakteryzującego się emisją tlenku węgla, węglowodorów, tlenków azotu i cząstek stałych, a także sprawności procesów wytwarzania energii mechanicznej dla systemów napędowych pojazdów, można stwierdzić, że stosowanie metanolu jako paliwa do ogniw paliwowych może być dobrą alternatywą dla obecnie stosowanych paliw konwencjonalnych. Koncepcja zakładająca metanol jako nośnik wodoru, który można w prosty i łatwy sposób przechowywać jest interesująca z punktu widzenia procesów logistycznych. Decydującą kwestią w tej koncepcji jest opracowanie systemów reformingu metanolu. Dzięki stosunkowo dużej sprawności realizowanych procesów, odpowiedniej wydajności produkcji wodoru i miniaturyzacji systemu, w połączeniu z ogniwami paliwowymi o dużej sprawności, rozwiązania te mogą znaleźć zastosowanie w środkach masowego transportu. Dlatego przy obserwowanym obecnie intensywnym rozwoju ogniw paliwowych należy podjąć działania, aby skoncentrować się na rozwoju systemów reformowania i technologii budowy ogniw wysokotemperaturowych.

#### Literatura

- [1] Andersson M., Sundèn B., Technology Review – Solid Oxide Fuel Cell, Report 2017:359, ENERGIFORSK March 2017, [www.energiforsk.se](http://www.energiforsk.se)
- [2] Aubrey A., Ceres Power Holdings, A fuel cell in every home and business, <http://www.cerespower.com/media/1571/edison-a-fuel-cell-in-every-home.pdf>
- [3] Background On The Ascend Energy/Atrex Energy Ceramic Fuel Cell Vehicle Project, [http://www.atrexenergy.com/assets/uploads/files/Fuel\\_Cell\\_Vehicle\\_-\\_Ascend\\_Energy.pdf](http://www.atrexenergy.com/assets/uploads/files/Fuel_Cell_Vehicle_-_Ascend_Energy.pdf)
- [4] Buonomano A., Calise F., Dentice d'Accadia M., Palombo A., Vicidomini M., Hybrid solid oxide fuel cells–gas turbine systems for combined heat and power: A review, Applied Energy, Volume 156, 2015, Pages 32-85
- [5] Ceres Power to demonstrate SOFC stack technology for EV range extender with Nissan; light commercial vehicle, 28 June 2016, <http://www.greencarcongress.com/2016/06/20160628-ceres-1.html>
- [6] Dudek M., Sitarz M., Tomczyk P., Effect of structural properties of carbon-based fuels on efficiency of direct carbon fuel cells, Journal of Solid State Electrochemistry, Volume 18, Issue 11, pp 3023–3032, 2014
- [7] Dudek M., Skrzyplikiewicz M., Moskala N., Grzywacz P., Sitarz M., Lubarska-Radziejewska I., The impact of physicochemical properties of coal on direct carbon solid oxide fuel cells, INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY, Volume: 41 Issue: 41 Pages: 18872-18883, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.05.232, 2016

- [8] Dudek M., Socha R., Direct Electrochemical Conversion of the Chemical Energy of Raw Waste Wood to Electrical Energy in Tubular Direct Carbon Solid Oxide Fuel Cells, INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTROCHEMICAL SCIENCE, Volume: 9 Issue: 12 Pages: 7414-7430, 2014
- [9] e4ships Fuel Cells In Marine Applications 2009 – 2016 (1.3 MB) <http://www.e4ships.de/press.html>
- [10] Ezgi C, Turhan Çoban MM, Selvi Ö. Design and Thermodynamic Analysis of an SOFC System for Naval Surface Ship Application. ASME. J. Fuel Cell Sci. Technol. 2013;10(3):031006-031006-6. doi:10.1115/1.4024254
- [11] German e4ships project reports on fuel cell maritime demos, Fuel Cells Bulletin, Volume 2016, Issue 10, 2016
- [12] Ghosh P.C., Vasudeva U., Analysis of 3000T class submarines equipped with polymer electrolyte fuel cells, Energy, Volume 36, Issue 5, 2011, Pages 3138-3147
- [13] [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota\\_Mirai\\_PCU\\_and\\_electric\\_motor\\_SAO\\_2016\\_9023.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_Mirai_PCU_and_electric_motor_SAO_2016_9023.jpg)
- [14] [http://www.iphe.net/docs/Events/Japan\\_311/3%20Astrom\\_W%C3%A4rtsil%C3%A4%20FC%20Development%20for%20IPHE%202011.pdf](http://www.iphe.net/docs/Events/Japan_311/3%20Astrom_W%C3%A4rtsil%C3%A4%20FC%20Development%20for%20IPHE%202011.pdf)
- [15] Koirala B. P., Avila J. P. Ch., Gomez T., Hakvoort R. A., Herder P. M., Local Alternative for Energy Supply: Performance Assessment of Integrated Community Energy Systems, ENERGIES, Volume: 9, Issue: 12, Article Number: 981, DOI: 10.3390/en9120981, 2016
- [16] Krummrich S., Fuel Cell Methanol Reformer System for Submarines, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010, Parallel Sessions Book 3: Hydrogen Production Technologies - Part 2, Proceedings of the WHEC, May 16.-21. 2010, Essen
- [17] L. van Biert, M. Godjevac, K. Visser, P.V. Aravind, A review of fuel cell systems for maritime applications, Journal of Power Sources, Volume 327, 2016, Pages 345-364
- [18] McPhail S.J., Leto L., Boigues-Muñoz C., International Status of SOFC deployment 2012-2013, Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development. <http://www.enea.it/it/pubblicazioni/pdf-volumi/the-yellow-pages-of-sofc-technology-2017.pdf>
- [19] Merkisz J, Pielecha I 2015 Electrical systems of hybrid vehicles, Publishing House Poznan University of Technology, p. 198
- [20] Nissan announces development of the world's first SOFC-powered vehicle system that runs on bio-ethanol electric power. [newsroom.nissan-global.com](http://newsroom.nissan-global.com) (2016/06/14)
- [21] Pocard N.: The Next Generation of Shunting Locomotives Uses Fuel Cell Power. Zero Emission Rail Transport. <http://blog.ballard.com/the-next-generation-of-shunting-locomotives-uses-fuel-cell-power>. 6.10.2016
- [22] Sattler G., Fuel cells going on-board, Journal of Power Sources, Volume 86, Issue 1, 2000, Pages 61-67
- [23] Solid oxide fuel cell technology. [www.csiropedia.csiro.au/Ceramic-Fuel-Cells](http://www.csiropedia.csiro.au/Ceramic-Fuel-Cells) (16.06.2017)
- [24] Tronstad T., Hogmoen Astrand H., Haugom G.P.a, Langfeldt L., Maritime - Study on the use of fuel cells in shipping. EMSA European Maritime Safety Agency. DNV-GL. 2017
- [25] Vogler F., Würsig G., New Developments for Maritime Fuel Cell Systems, Proceedings of the WHEC, May 16.-21. 2010, Essen

## **THE POTENTIAL OF FUEL CELLS AS A TRANSPORT DRIVE SOURCE**

Energy derived from fossil fuels is associated with thermal oxidation of fuels. In addition to generating heat, these processes produce carbon monoxide, carbon dioxide, nitrogen oxides, hydrocarbons, and particulate matter. These compounds represent a significant threat to man and the environment in which he lives. Due to the large share of fossil fuel energy in the combustion process, it is necessary to seek other means of obtaining the so-called "Clean energy". High potential in this area may be fuel cells whose development has enabled them to attempt to use them in all types of transport means, and in particular in road vehicles. An important factor in the development of fuel cells is their relatively high efficiency and tightening of emission standards from internal combustion engines used to drive vehicles. The concept of their use is related to many operational problems. For this reason, the article attempts to assess the potential of fuel cells as a source of energy for the propulsion of means of transport. A review of the fuel cell system design and its use.