

54/2003

**Raport Badawczy**  
**Research Report**

**RB/36/2003**

**Ogniwa paliwowe**

**W. Ciechanowicz**

**Instytut Badań Systemowych**  
**Polska Akademia Nauk**

**Systems Research Institute**  
**Polish Academy of Sciences**



# **POLSKA AKADEMIA NAUK**

## **Instytut Badań Systemowych**

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 8373578

fax: (+48) (22) 8372772

Kierownik Pracowni zgłaszający pracę:  
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Nahorski

Warszawa 2003

# Ogniwa Paliwowe

Wiesław Ciechanowicz

Instytut Badań Systemowych, PAN

**Co czynią ogniwa paliwowe, aby zapoczątkować powstanie pożądanego przełomu w skali świata ?**

Wiadomo, że generator prądu elektrycznego wytwarza elektrony, tworzące prąd elektryczny. Ten generator jest ostatnim ogniwem w procesie wytwarzania energii elektrycznej w konwencjonalnych elektrowniach opalanych węglem lub węglowodorami jak ropa lub gaz. Pierwszym ogniwem w tym procesie są siły wiązań elektronów w atomach węgla lub węglowodorów. Manifestują się one, poprzez zasadę, że masa jest równoważna energii, w postaci energii wiązań elektronów. Energia ta, w reakcji chemicznej spalania, wydziela się w postaci ciepła. Dalszymi ogniwami tworzącymi elektrownie jest kocioł i turbina parowa napędzająca generator.

Jak widać proces wytwarzania prądu w konwencjonalnej elektrowni jest bardzo złożony. Zaczyna się od sił wiązań elektronów w atomach a kończy się na wytwarzaniu elektronów.

Najprościej byłoby brać bezpośrednio z atomów elektrony i tworzyć prąd. **To czynią ogniwa paliwowe.** Wykorzystują najprostszy pierwiastek, jakim jest atom wodoru, zbudowany z jednego elektronu jako ładunku ujemnego i jednego protonu jako ładunku dodatniego. Na anodzie ogniwa dokonuje się dekompozycji atomu wodoru na elektrony i protony. Elektrony płyną przez obwód zewnętrzny, stanowiący odbiornik prądu elektrycznego, protony, płynąc poprzez elektrolit do katody, łącząc się z elektronami w atmosferze powietrza tworzą wodę.

Sposobem na dostarczanie wodoru do ogniw paliwowych wykorzystywanych w środkach transportu jest metanol. Sposobem na dostarczanie wodoru w ceramicznych ogniwach

paliwowych, mających zastosowania w stacjonarnych układach energetycznych, może być metan lub tlenek węgla. Metanol, metan i tlenek węgla uzyskiwane w wyniku przetwarzania biomasy są biopaliwami przyszłości.

Z przedstawionych informacji wynika, że ogniwa paliwowe „są prostym rozwiązaniem w skomplikowanym świecie”. Tak brzmiał tytuł artykułu Rity Bajur, Dyrektora National Energy Technology Laboratory, USA, wygłaszany jako pierwszy na pierwszym w Stanach Zjednoczonych sympozjum poświęconym zagadnieniom ogniw paliwowych w październiku 1999 roku.

Zastępują więc w elektrowniach konwencjonalnych bardzo złożony proces wytwarzania prądu elektrycznego, oraz w silnikach wewnętrznego spalania proces zamiany ciepła na pracę.

Eliminują zasadę, podaną przez Andre Carnot w 1824 roku, która mówi, że silnik ciepłny nie może pracować nie pobierając ciepła ze „źródła ciepła” i nie oddając go do „źródła zimna”, a więc do atmosfery. Elektrownie, a także silniki wewnętrznego spalania oddają odpowiednio około 65 % i 80 % ciepła do atmosfery. Oznacza to, że ogniwa paliwowe przynajmniej dwukrotnie efektywniej pozwalają wykorzystywać surowce energetyczne.

Także eliminują zasadę, że koszty inwestycyjne generatora prądu elektrycznego maleją wraz ze wzrostem mocy tego generatora, co obowiązuje elektrownie. Oznacza to, że:

- ogniwa paliwowe jako źródła energii będą przyczyniać się do dekoncentracji instalowanej mocy źródeł energii,
- będzie skracany okres wprowadzania technologii do gospodarek narodowych do miesiąca, który w przypadku elektrowni dużych mocy wynosił kilka lat,
- moce nominalne ogniw paliwowych będą wyznaczać bezpośredni poszczególni odbiorcy jak:
  - przenośne urządzenia elektroniczne,
  - pojedyncze gospodarstwa domowe,
  - samochody osobowe,

- obiekty użyteczności publicznej, osiedla mieszkaniowe, autobusy i samochody ciężarowe.

Mają więc znaleźć zastosowanie w każdym urządzeniu wymagającym zasilania w elektryczność bądź z baterii lub z sieci energetycznej, oraz w środkach transportu zastępując silniki wewnętrznego spalania. Obejmują więc końcowych użytkowników energii poczynając od wszelkich podręcznych urządzeń elektronicznych, poprzez generatory energii elektrycznej i ciepła w gospodarstwach domowych i obiektach użyteczności publicznej do środków transportu samochodowego, osobowego i ciężarowego, transportu szynowego i lotniczego.

### **„Ekonomia Wodorowa”**

Bezpośrednim paliwem we wszelkiego typu ogniach paliwowych jest wodór. Stąd powstał termin „Ekonomii Wodorowej”. Określa ona gospodarkę, w której końcowi użytkownicy energii wykorzystują jedynie źródła energii powstałe w wyniku bezpośredniego rozkładu wodoru na elektrony i protony.

Wodór dostarczany w postaci gazowej lub ciekłej winien być przedtem magazynowany, co jest procesem energochłonnym. Oznacza to, że użytkowanie wodoru w postaci gazowej lub ciekłej czyniłoby ogniwa paliwowe mało efektywne. Rozwiązaniem stają się związki wodoru z węglem, a więc węglowodory takie jak metanol. Bardziej realną staje się więc **„Ekonomia Metanolu”**. Aby mogłaby być akceptowalną z punktu widzenia zrównoważonej przyszłości winna być neutralna względem efektu cieplarnianego. To mogłoby nastąpić, gdyby pozyskiwanie surowce były pochodzenia biologicznego, stanowiąc biomasę lignocelulozową, tę najbardziej obfitą na kuli ziemskiej. Przetwarzając ją uzyskiwano by biometanol, będący podstawowym nośnikiem energii **„Ekonomii Biometanolu”**.

### **Ogniwa paliwowe jako bezprzewodowe źródła energii**

Możliwość magazynowania paliwa w postaci ciekłej jest ważną zaletą metanolu w relacji do wodoru w zastosowaniu do jakichkolwiek urządzeń energetycznych. Ze względu na łatwość

transportu metanolu ogniwa paliwowe zasilane bezpośrednio metanolem mogą czynić wszelkie źródła energii jako **bezczeprowodowe**.

Oznacza to, że cywilizacja „Ekonomii Biometanolu” dysponowałaby beczprowodowymi źródłami energii o uniwersalnym zastosowaniu, przyczyniającymi się równocześnie do dekoncentracji instalowanej mocy źródeł energii. Wyeliminowało by to regionalne i państwowe systemy energetyczne oraz systemy wysokiego napięcia przesyłu energii elektrycznej. W konsekwencji przyczyniłoby się do eliminowania strat przesyłu energii, zmniejszania kosztów u finalnego odbiorcy energii. **Stanowiłoby to kolejny przełom w rozwoju technologicznym źródeł energii.**

### **Rodzaje ogniw paliwowych w przyszłej „Ekonomii Wodoru”**

W grudniu 1999 roku podano do wiadomości, że przekroczyły próg opanowania technologicznego dwa rodzaje ogniw paliwowych. Są to:

1. polimerowe ogniwo paliwowe **bezczeprowodnie zasilane metanolem**, jako przenośne lub stacjonarne źródło energii, opracowane przez firmę amerykańsko-kanadyjską Ballard, mające zastosowanie:

- *poczynając od wszelkich podręcznych urządzeń elektronicznych,*
- *poprzez generatory energii elektrycznej i ciepła w gospodarstwach domowych i obiektach użyteczności publicznej,*
- *do środków transportu samochodowego, osobowego i ciężarowego, transportu szynowego i lotniczego,*

2. ceramiczne ogniwo paliwowe, jako stacjonarne źródło energii, **zasilane węglowodorowymi paliwami gazowymi** jak metan, propan oraz tlenek węgla, które może stanowić tylko jako:

- *lokalne stacjonarne generatory energii elektrycznej i ciepła w gospodarstwach domowych i obiektach użyteczności publicznej.*

Ponadto w określonych okolicznościach mogą znaleźć zastosowanie:

3. polimerowe ogniwa paliwowe **bezpośrednio zasilane wodorem**, jako przenośne lub stacjonarne źródło energii, szczególnie w krótkim horyzontie czasu w testowanych samochodach napędzanych ogniwami paliwowymi. Mogą obejmować takich końcowych użytkowników energii jak:

*- autobusy komunikacji miejskiej,*

4. biologiczne ogniwa paliwowe dokonujące mikrobiologicznej konwersji glukozy do wodoru, będące na etapie rozwoju. Mają mieć zastosowanie:

*- jako implantowany do żyty żywego organizmu systemu podawania leków bezpośrednio do chorego organu, używając glukozy obecnej w krwiobiegu jako sposobu na dostarczanie wodoru, co ma mieć szczególne znaczenie dla chorych, wymagających regularnego dozowania leków w odpowiedniej dawce,*

*- w utylizacji śmieci poprzez uprzednie upłynianie ich do glukozy stanowiącej sposób na dostarczanie wodoru w lokalnych generatorach energii elektrycznej w gospodarstwach domowych.*

A więc cztery rodzaje ogniw paliwowych mają stanowić źródła energii w przyszłej „Ekonomii Wodoru”. Są to bezpośrednio zasilane wodorem, bezpośrednio zasilane metanolem, zasilane tlenkiem węgla lub metanem oraz wykorzystujące glukozę jako źródło wodoru.

Należy jednak przypomnieć ze względów chronologicznych jakie inne ogniwa paliwowe były rozwijane przed przełomowym rokiem 1999 roku.

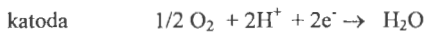
Oprócz wyżej wymienionych rodzajów ogniw paliwowych były rozwijane następujące trzy rodzaje ogniw paliwowych:

- ogniwo paliwowe zasadowe, Alkaline Fuel Cell (AFC),
- ogniwo paliwowe fosforowe, Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)
- ogniwo paliwowe węglanowe Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC).

## Zasady działania ogniw paliwowych

### Ogniwo polimerowe bezpośrednio zasilane wodorem – PEFC

Pierwsze ogniwo paliwowe polimerowe, wykonane przez firmę General Electric, USA, było zastosowane na statku kosmicznym Gemini. Ten typ ogniwa, określane mianem Polymer Electrolyte Fuel Cell, dokonuje bezpośredniego rozkładu atomu wodoru na elektrony i protony. Elektrony płyną przez obwód zewnętrzny, stanowiący odbiornik prądu elektrycznego, protony, płynąc poprzez elektrolit do katody, łącząc się z elektronami w atmosferze powietrza tworzą wodę. Reakcje zachodzące w ogniwie są następujące:



W wyniku rozkładu jednego atomu wodoru tworzy się na katodzie jedna molekula wody. Temperatura pracy ogniwa nie przekracza 100 °C.

Polimerowe ogniwo paliwowe charakteryzuje się dużą gęstością mocy przy niskim ciężarze właściwym, niskich kosztach i niedużej objętości. Pracuje przy niskiej temperaturze, umożliwiając szybki rozruch i natychmiastową odpowiedź na żadaną zmianę mocy. Wadą ogniwa jest to, że wykorzystuje wodór.

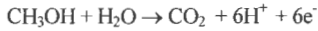
### **Ogniwo paliwowe bezpośrednio zasilane metanolem – DMFC**

Prace nad bezpośrednio zasilanym metanolem ogniwem paliwowym, w którym katalizator anody wydzielalby wodór z metanolu, eliminując konieczność stosowania układu reformowania paliw węglowodorowych, zostały zapoczątkowane przez Shell Research w Anglii i przez Esso-Alstom we Francji odpowiednio w latach 1960 i 1970. Rozwiązaniem stało się zastosowanie do ogniw polimerowych przez firmę Ballard membran przewodzących protony.

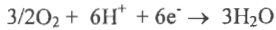
W 1999 roku firma Ballard, pracująca od szeregu lat nad wyżej wymienionym zagadnieniem, powiadomiła o opracowaniu ogniwa typu PEFC bezpośrednio zasilanego metanolem. Określono go



mianem DMFC - Direct Methanol Fuel Cell. W tym typie ogniwa nie utlenia się wodoru. Na anodzie bezpośrednio utlenia się metanol zgodnie z reakcją



a następnie na katodzie



Rozwiązanie problemu bezpośredniego reformingu metanolu było wielkim przełomem w rozwoju ogniw paliwowych, pozwalającym reformować węglowodory do wodoru wewnątrz ogniwa, podobnie jak udoskonalenie ogniwa typu SCFC (Solid Oxide Fuel Cell), podanym do publicznej wiadomości także w 1999 roku. Jednakże, pozostaje konieczność stosowania katalizatora w postaci platyny, palladu i rodu dla dokonania na anodzie rozkładu atomów wodoru na elektrony i protony. Temperatura pracy ogniwa nie przekracza 100 °C.

Ogniwo paliwowe DMFC, wykorzystywane w środkach transportu jako ogniwo polimerowe zasilane bezpośrednio metanolem, będącym produktem przetwarzania biomasy, staje się atrakcyjnym środkiem napędu pojazdów w XXI wieku. Nie produkuje ono zanieczyszczeń powietrza, może przyczynić się do osłabiania efektu cieplarnianego. Działa pomiędzy uzupełnianiem w metanol, gdy pojazd mechaniczny pokonuje w tym czasie 600 - 700 km, wykorzystując do tego celu istniejącą strukturę stacji paliwowych.

### **Ogniwo paliwowe wykorzystujące tlenki metali - SOFC**

Rozwój ogniw paliwowych wykorzystujących tlenki metali, określanych także mianem ogniw paliwowych ceramicznych, zapoczątkowała firma Siemens - Westinghouse.

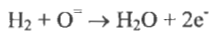
Ogniwa ceramiczne stanowią technologie wysokotemperaturowych ogniw paliwowych. Zamiast elektrolitu ciekłego jest elektrolit ceramiczny w postaci tlenków itru i cyrkonu. Przy temperaturze pracy ogniwa 1000 °C:

- następuje współpraca ogniwa z wewnętrznym reformingiem,
- rośnie szybkość zachodzenia reakcji, a także
- wytwarza się ciepło wysokotemperaturowe.

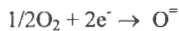
Ciepło to jest wykorzystywane bezpośrednio do celów grzewczych w gospodarstwach domowych, obiektach użyteczności publicznej lub w obiegu podwyższającym cykl termodynamiczny systemu energetycznego, którego jednym z elementów jest ogniwo paliwowe ceramiczne.

Reakcje zachodzące w ogniwie są następujące:

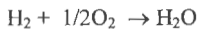
na anodzie



na katodzie.

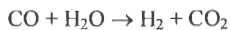


reakcja łączna

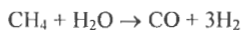


gdzie  $\ominus$  oznacza podwójny ujemny ładunek.

W ogniwie typu SOFC paliwem zasilającym bezpośrednio ogniwo może być tlenek węgla CO lub metan  $\text{CH}_4$ . Reakcja zwrotna gazu wodnego dotycząca reformowania CO przebiega następująco:



a parowy reforming metanu  $\text{CH}_4$  ma postać



Reakcje te zachodzą przy wysokiej temperaturze wytwarzając wodór, który utlenia się na anodzie.

### **Biologiczne ogniwa paliwowe.**

Biologiczne ogniwa paliwowe jest zasilane wodorem, uzyskiwanym w wyniku przetwarzania glukozy przez mikroorganizmy w postaci odpowiednich drożdży.

Jedno z takich ogniw opracowuje się na wydziale mechanicznym **Uniwersytetu Berkeley, USA**. Ma ono zrewolucjonizować system podawania lekarstwa bezpośrednio do chorego organu. Jest to szczególnie ważne dla chorych, którzy wymagają regularnego dozowania lekarstwa w odpowiedniej dawce. Ogniwo wytwarza wystarczającą energię, aby w ciągu dwóch godzin za pomocą zaprogramowanego dozownika doprowadzić mikroskopijną dawkę lekarstwa do chorego organu. System zużywa glukozę obecną w krwioobiegu jako sposobu na dostarczenie wodoru do „organicznych baterii”. Ubocznym produktem jest dwutlenek węgla i woda, substancje, które organizm może w sposób naturalny wydalać. Metoda ta będzie miała szczególne zastosowanie w leczeniu chorych na cukrzycę.

**The Kyoto Research Institute, Japonia**, opracowuje dla firmy Sharp Corp. technologie utylizacji śmieci poprzez upłynnianie ich, mikrobiologiczną konwersję glukozy zawartej w upłynnionych śmieciach do wodoru wykorzystywanego w ogniwach paliwowych jako lokalnych generatorów energii elektrycznej w gospodarstwach domowych. Ogniwo o pojemności dwóch litrów ma stanowić źródło energii w pojedynczych gospodarstwach domowych.

### **Ogniwo paliwowe zasadowe - AFC**

Ogniwo zasadowe jest zasilane czystym wodorem i czystym tlenem, względnie powietrzem pozbawionym dwutlenku węgla, o elektrolicie zasadowym w postaci roztworu wodnego KOH. Przy koncentracji 85 % KOH temperatura pracy wynosi około 250 °C, przy koncentracji 35 - 50 % KOH temperatura pracy nie przekracza 120 °C. Elektrody są wykonane z metalu lub węgla.

Reakcje zachodzące w ogniwie są następujące:



Zasadowe ogniwa paliwowe działają zadowalająco przy niskich temperaturach (60-80 °C) uzyskują sprawność 50 % przy temperaturze otoczenia 20 °C, charakteryzują się wysoką gęstością prądu rzędu 8 A/cm<sup>2</sup>. Maksymalna sprawność, jaką można uzyskać stosując czysty wodór, wynosi 62,5 %. Stosowanie katalizatorów platynowych umożliwia uzyskiwanie wysokich gęstości mocy, co jest wymagane w zastosowaniu ogniw do celów badań kosmicznych i militarnych. Woda, jako produkt uboczny działania ogniw, była i jest ciągle jedynym źródłem dostępnej wody dla załóg pojazdów i promów kosmicznych.

Najbardziej zaawansowanym dostawcą tych ogniw to Appolo Energy Systems, Floryda, i kanadyjska firma Astris Energy. Ostatnio utworzyły one wspólne przedsiębiorstwo pod nazwą Astris Transportation Systems. Produkowane ogniwa AFC mają zastosowanie w małych pojazdach o napędzie elektrycznym [1].

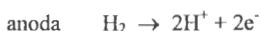
### Ogniwo paliwowe fosforowe - PAFC

Ogniwo składa się z następujących trzech głównych elementów:

1. procesora paliwa, obejmującego reforming i reakcję zwrotną gazu wodnego, przetwarzającego paliwo w gaz bogaty w wodór, gdzie ciepło reakcji endotermicznej jest dostarczane w postaci pary i w wyniku spalania gazów odpadowych ogniwa,
2. zestawu ogniw, w których paliwo przemieszcza się przez ogniwa, gdzie jest wykorzystywane około 80 % wodoru, a gaz odpadowy powraca do procesora paliwa,
3. alternatora prądu zmiennego, przetwarzającego prąd stały wytwarzany przez ogniwo paliwowe w prąd zmienny.

Kwas fosforowy, jako elektrolit w ogniwie paliwowym, był zastosowany po raz pierwszy przez firmę Pratt and Whitney w końcu lat 60-tych do zastosowań niekosmicznych. Ten typ elektrolitu umożliwia pracę ogniwa paliwowego z paliwem typu gaz ziemny lub paliwo węglowodorowe.

Reakcje zachodzące w ogniwie są następujące:



Stosując jako paliwo gaz naturalny można uzyskać sprawność rzędu 40 - 45 %. Gas Research Institute i United Technologies Corporation (U.T.C.), firmy z USA, wspólnie opracowały serię 46 elektrowni o mocy 40 kW. Elektrownie te powstały w wyniku programu badawczego rozpoczętego w 1967 roku. Sprawność przetwarzania gazu ziemnego w energię elektryczną i ciepło wynosiła 40 %. Firma International Fuel Cell (I.F.C.) z USA, wspólnie z firmą Toshiba z Japonii, opracowała serię fosforowych ogniw paliwowych o mocy 200 kW. Program badawczy w tej dziedzinie rozpoczęła w 1971 roku firma United Technologies Corporation wspólnie z Electric Power Research Institute (E.P.R.I), USA, i Departamentem Energii USA. W 1976 roku przedstawiono pilotowe siłownie o mocy 1 MW i 4,5 MW.

Fosforowe ogniwa paliwowe były także przedmiotem badań prowadzonych przez firmy: Energy Research Corporation i Westinghouse Electric. Planowano budowę siłowni o mocy 7,5 MW [2]. W Japonii zorganizowano program, sponsorowany przez "Ministerstwo Handlu Zagranicznego i Przemysłu", mający na celu ulepszyć sprawność wykorzystywania paliw kopalnych. Jednym z elementów tego programu była budowa dwóch siłowni, każda o mocy 1 MW, przez konsorcjum następujących firm: Hitachi, Toshiba, Mitsubishi i Fuji Electric. Następnie wspólnie z firmą Sanyo realizowano oddzielne programy, których celem było zbudowanie siłowni o mocy 5 MW.

Moc większości ogniw PAFC zawiera się w granicach 50 - 200 kW. Największa jednostka działająca jako generator prądu stałego posiada moc 11 MW. Mają one zastosowanie jako skojarzone źródła energii wytwarzając energię elektryczną i ciepło. Głównymi producentami tych ogniw są: International Fuel Cell Corporation, USA, Fuji Electric Corporation, Toshiba Corporation i Mitsubishi Electric Corporation, Japonia [3, 4, 5, 6]. Dla poprawy konkurencyjności ekonomicznej ogniw fosforowych w porównaniu z innymi ogniwami, konieczny jest dalszy wzrost gęstości mocy oraz redukcja kosztów ponieważ ciągle wymagają platyny jako katalizatora aby podtrzymywać reakcję na elektrodach.

### **Ogniwo paliwowe węglanowe - MCFC**

Pionierskie prace dotyczące rozwoju ogniw paliwowych wykorzystujących węglany wykonali w latach 1950-tych Broers i Ketelaar w Centralnym Technicznym Instytucie w Holandii. Ogniwo to stwarzało duże możliwości zastosowania w energetyce przy wykorzystywaniu paliw węglowodorowych. Mogą one stanowić tak zwany obieg podwyższający w obiegu Rankine'a turbiny parowej, podnosząc sprawność ogólną systemu. Względnie mogą być stosowane bezpośrednio jako siłownie, co jest istotną zaletą, osiągając sprawność do 60-65 %. Wiele firm prowadziło prace badawcze nad opanowaniem produkcji tego typu ogniwa. W USA prace prowadziły firmy: U.T.C., Energy Research Corporation i Institut of Gas Technology, w Japonii - Hitachi, Mitsubishi, Toshiba i Ishikawajima Harima, także firmy w Holandii i we Włoszech [7]. Najbardziej zawansowane prace były prowadzone przez Energy Research Corporation. Ich celem było opanowanie produkcji na skalę przemysłową tak zwanego bezpośrednio działającego ogniwa paliwowego (Direct Fuel Cell - DFC), z temperaturą pracy ogniwa 650 °C. Eliminuje ono procesor paliwa i związany z nim obieg wymiany ciepła. Moc pojedynczego modułu takiego ogniwa wynosiła 2 MW. Miał być on dostępny w sprzedaży w 1996 roku. Energy Research Corporation opracowało również projekt siłowni o mocy 200 MW, wykorzystującej ogniwa paliwowe węglanowe MCFC, w której paliwem miał być niskokalorycznie zgazowywany węgiel.

W latach 60-tych materiałem elektrod w wielu przypadkach były drogie metale. Również w latach 70-tych materiał elektrod i elektrolitu (węglanu w stanie ciekłym) nie ulegał zmianie. W latach 80-tych nastąpiła ewolucja w technologii produkcji struktur elektrolitu. W ciągu ostatnich 20 lat gęstość mocy, liczona na jednostkę powierzchni, wzrosła z  $10 \text{ mW/cm}^2$  do ponad  $150 \text{ mW/cm}^2$ .

Obecnie dominuje na rynku Fuel Cell Energy (FCE) wspólnie z niemieckim partnerem MTU Friedrichshafen GmbH, które w sumie zrealizowało względnie realizuje 40 zamówień na systemy demonstracyjne. FCE zmierza do opanowania produkcji technologii bezpośrednio działającego ogniwa paliwowego MCFC o mocy 300 kW, 1.5 MW i 3 MW z przeznaczeniem dla szpitali, szkół i innych obiektów handlowych i przemysłowych. MTU opracowało swój własny system MCFC o mocy 250 kW, wykorzystując zastaw ogniw wytwarzanych przez FCE.

Jednakże barierą dalszego rozwoju tych systemów staje się wzrastająca moc systemów energetycznych, deregulacja dostawy energii elektrycznej do odbiorców przemysłowych w wyniku awarii tych systemów, oraz wchodzenie na rynek nowych technologii źródeł energii lokalizowanych w pobliżu odbiorców [1].

### **Wodór jako „paliwo” ogniw paliwowych.**

Wodór „gazowy” bezpośrednio zasilający anodę polimerowego ogniwa paliwowego może znaleźć zastosowanie nie tylko w krótkim horyzoncie czasu w testowanych samochodach napędzanych ogniwami paliwowymi. Może obejmować takich końcowych użytkowników energii jak autobusy komunikacji miejskiej.

Wynika to z faktu, że autobusy miejskie krążące wokół bazy mogą stosunkowo często uzupełniać gazowy wodór w zbiornikach. Wobec tego mogą być instalowane w nich polimerowe ogniwa paliwowe zasilane wodorem, nie wymagające katalizatora. Ze względu na możliwość częstego „tankowania” wodoru w zajezdni nie ma potrzeby sprężania wodoru do wysokiego ciśnienia, co normalnie wymagałoby do 70 atmosfer, ale do 30 atmosfer. To wszystko czyni

stosowanie bezpośrednio wodoru tańszym rozwiązaniem. Nie można wykluczyć, że to rozwiązanie będzie stosowane przez dłuższy czas.

**Wodór** można by pozyskiwać:

1. poprzez rozkład elektrolityczny wody, gdzie energię elektryczną wytwarzałyby farmy silników wiatrowych lokalizowanych w pobliżu brzegów morskich, (a to ze względu na to, że prędkość wiatrów w pobliżu wybrzeża jest dwukrotnie większa aniżeli na lądzie, a w konsekwencji silniki wiatrowe mogą produkować 8-krotnie więcej energii w porównaniu z silnikiem wiatrowym zlokalizowanym na lądzie),
2. z metanu uzyskiwanego w wyniku beztlenowej fermentacji odpadów i ścieków komunalnych,
3. w wyniku zgazowywania węgla w połączeniu z osadami ściekowymi lub z biomasą, nad czym obecnie się pracuje,

Rozwiązanie 1-sze jest rozważane w Północnych Niemczech, w Kalifornii, USA, w Japonii, gdzie planuje się budowę farm silników wiatrowych na ogromnych sztucznych wyspach betonowych, takich jak sztuczna wyspa, na której zlokalizowano tam lotnisko międzynarodowe. W przypadku Polski trójmiasto Gdańsk – Sopot – Gdynia mogłoby być potencjalną aglomeracją wykorzystującą energię kinetyczną wiatrów do środków transportu miejskiego o zerowej emisji zanieczyszczeń.

Rozwiązanie 2-gie ze względów ekonomicznych, a więc ze względu na wielkość produkcji, może być brane pod uwagę tylko w przypadku dużych miast jak Berlin, Warszawa. W Berlinie obecnie wykorzystuje się odpady komunalne do produkcji metanolu poprzez gazyfikację osuszonych odpadów.

Rozwiązanie 3-cie jest obecnie opracowywane przez jeden z instytutów USA, który współpracuje z Konsorcjum „Bioenergia na Rzecz Rozwoju Wsi”. Produktem końcowym jest wodór i produkt uboczny CO<sub>2</sub>.



Rozważa się dwie możliwości wykorzystywania dwutlenku węgla. Jedną z nich jest równoczesna produkcji metanolu poprzez rozkład radiolityczny  $\text{CO}_2$  i elektrolityczny  $\text{H}_2\text{O}$ , wykorzystując energię syntezy, a więc obejmujący:

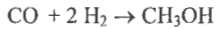
1. rozkład radiolityczny



2. rozkład elektrolityczny



3. syntezę metanolu



gdzie energia syntezy manifestuje się w postaci energii neutronów o bardzo wysokich energiach, 14 MeV.

Zastosowanie energii syntezy w omawianym cyklu energia syntezy - metanol nie wymaga od reaktorów syntezy spełniania przez plazmę kryterium Lawsona, a więc warunku, aby energia wytwarzana przewyższała energię pobieraną do grzania plazmy. Ma to miejsce, ponieważ w wyżej wymienionym cyklu energia syntezy manifestuje się w postaci energii neutronów. Potencjalnym źródłem neutronów jest reaktor syntezy typu mirror, który przeszedł próg opanowania technologicznego.

### **Metanol jako „paliwo” ogniw paliwowych**

*Jaki wpływ na zdrowie ludzkie może mieć stosowanie metanolu jako paliwa*

Metanol jest jednym z najbardziej bezpiecznych i najbardziej nieszkodliwych paliw. W USA każdego roku 180000 samochodów ulega spaleni, powodowanym zapłonem benzyny. Zamieniając benzynę na metanol, liczbę spalonych samochodów można by zredukować do 18000, ocalając 720 istnień ludzkich, zapobiegając 39000 poważnym zranieniom i eliminując straty oceniane na miliony dolarów rocznie.

*Jaki wpływ na środowisko może mieć stosowanie metanolu jako paliwa*

Jeżeli weźmie się pod uwagę, że liczba pojazdów mechanicznych w skali świata podwaja się w okresie 25 lat, staje się oczywiste, że technologie ogniw paliwowych, „czyste ekologicznie” i charakteryzujące się wysoką sprawnością, stają się technologiami XXI wieku.

Eksploatacja pojazdów o napędzie metanol - ogniwa paliwowe może oddziaływać korzystnie na środowisko poprzez:

1. zmniejszenie zanieczyszczenia powietrza w obszarach zurbanizowanych,
2. znaczną redukcję emisji gazów cieplarnianych przez transport (w skali globalnej około 50 %),
3. znaczne zmniejszenie groźby zanieczyszczenia wód lądowych i oceanów.

Głównymi emitowanymi substancjami zanieczyszczającymi powietrze na obszarach zabudowanych, przez silniki wewnętrznego spalania, są: tlenek węgla, tlenki azotu, nie spalone węglowodory i pyły. Dla napędu metanol - ogniwo paliwowe emisja tlenku węgla i tlenków azotu jest minimalna.

Samochody metanol - ogniwo paliwowe ze swej natury nie zanieczyszczają środowiska. Nawet najczystszy silnik samochodowy o wewnętrznym spalaniu nie będzie tak „czysty” jak układ metanol - ogniwo paliwowe. Aby pojazd zasilany benzyną miał stosunkowo niską emisję zanieczyszczeń, musi podlegać odpowiedniej technologicznej kontroli i diagnostyce. Z biegiem czasu przy zmianie właściciela pojazdu mniej uwagi zwraca się na właściwy serwis. W rezultacie będzie zwiększał się poziom emisji zanieczyszczeń. Pojazd napędzany układem metanol ogniwo paliwowe może zmieniać właścicieli a poziom zanieczyszczeń nie ulegnie zmianie.

Produkując metanol z gazu ziemnego przy sprawności przetwarzania 70 %, przy 38.8 % sprawności ogniw paliwowych sprawność wykorzystywania energii metanu wynosiłaby 26.6 %. Dla porównania, obecnie sprawność produkcji benzyny z ropy naftowej wynosi około 90 %. Ale

sprawność silnika wewnętrznego spalania stanowi 19 %. Oznacza to, że sprawność wykorzystywania energii ropy naftowej przez samochody o napędzie konwencjonalnym wynosi 17.1 %. Te dane świadczą o znaczne mniejszym oddziaływaniu na efekt cieplarniany samochodów napędzanych ogniwami paliwowymi w porównaniu do samochodów stosujących silniki wewnętrznego spalania nawet w przypadku stosowania jako surowca do produkcji metanolu gazu ziemnego.

Opracowywana generacja pojazdów o napędzie metanol - ogniwo paliwowe charakteryzuje się zerową emisją. Wyższa sprawność pojazdów napędzanych układem metanol - ogniwo paliwowe, przyczyniająca się do lepszego wykorzystywania paliwa, pozwoli znacznie zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych przez transport. Emisja CO<sub>2</sub> powodowana przez pojazdy napędzane ogniwami paliwowymi zasilanymi metanolem ma stanowić mniej niż 50 % emisji pojazdów benzynowych.

Pojazdy o napędzie metanol - ogniwa paliwowe nie wymagają smarowania tłoków, nie wymagają więc wymiany oleju silnikowego, jak ma to miejsce w przypadku samochodów z silnikami o wewnętrznym spalaniu. Każdy litr zużytego oleju może zanieczyścić do jednego miliona litrów czystej wody. W przypadku ewentualnej awarii pojazdu napędzanego układem metanol - ogniwo paliwowe wyciek metanolu byłby znacznie mniej szkodliwy dla środowiska aniżeli wyciek oleju.

### **Metan pochodzenia biologicznego jako „paliwo” w ceramicznych ogniwach paliwowych**

Pojawia się możliwość wykorzystywania ogniw paliwowych w układy energetycznych integrujących ceramiczne ogniwa paliwowe i beztlenowe zgazowywanie odpadów pochodzenia rolniczego, z przemysłu spożywczego i komunalnego. Mają one być zasilane metanem jako produktem beztlenowej fermentacji. Mogą one nie tylko uczestniczyć na rynku krajowym, ale stanowić przedmiot eksportu.

### **Tlenek węgla pochodzenia biologicznego jako „paliwo” w ceramicznych ogniwach paliwowych**

Źródłem energii odnawialnej, mogącym być bardziej efektywnie wykorzystywanym dzięki kojarzeniu z ogniwami paliwowymi, są suche źródła geotermiczne, a ściślej mówiąc energia wnętrza skorupy ziemskiej. Ocenia się, że źródła te dostępne są na około 80 procent powierzchni kraju. Wykorzystanie ich warunkują względy ekonomiczne. Opłacalność tę można byłoby uzyskać poprzez zastosowanie pompy ciepłej napędzanej energią elektryczną, podnoszącą jakość tego źródła, a więc temperaturę wody w odpowiednim obiegu przejmującym ciepło od wnętrza skorupy ziemskiej. Źródłem energii elektrycznej mogły by być ogniwa paliwowe zasilane tlenkiem węgla uzyskiwanym w wyniku niskokalorycznego zgazowywania biomasy drewnopochodnej uprawianej w określonej gminie. W sumie, przedstawiane urządzenie stanowiłoby integrację uprawy biomasy, zgazowywania jej, ogniw paliwowych, pompy ciepłej i układu wymiany ciepła pomiędzy wnętrzem skorupy ziemskiej i komunalnym użytkownikiem ciepła.

### **Glukoza jako „paliwo” w biologicznych ogniwach paliwowych**

Glukoza ma być uzyskiwana w wyniku upłynniania śmieci jako odpadów komunalnych. Tworzą je głównie niewykorzystywane produkty żywnościowe i opakowania. Ilość odpadów przypadających na jednego mieszkańca w ciągu roku wynosi w zależności od kraju od 800 – 300 kg. Szkło i metale stanowią tylko 17 %. Znaczący udział stanowi plastik. Staje więc zadanie przed biologią molekularną: zastąpić tworzywa sztuczne materiałami organicznymi, pozwalając zwiększyć udział śmieci w wytwarzaniu energii elektrycznej w naszych domach.

Powyżej określono 4 rodzaje ogniw paliwowych jako podstawowe źródła energii w przyszłej „Ekonomii Wodoru”. Podano także stan rozwoju 3 pozostałych ogniw paliwowych

rozwijanych przed 1999 rokiem. W kolejnym artykule przedstawia się informacje, które z wymienionych technologii ogniw paliwowych uczestniczą i w jakim stopniu uczestniczą na powstających rynkach.

### Literatura

- 1 REFOCUS, The International Renewable Energy Magazine, Supplement 2003, Fuel cells, A status report, 2003.
- 2 Communications with IFC, September 21, 1998. Fuel cells Canaccord T.H. February 2000.
- 3 Hirschenhofer J., Latest Progress in Fuel Cell Technology, IEEE- Aerospace and Electronic Systems Magazine, 7, November, 1992.
- 4 Hirschenhofer J. H., Status of Fuel Cell Commercialization Efforts, American Power Conference, Chicago, IL, April 1993.
- 5 Giordano N., et al, Catalyst and Electrochemistry in PAFC: A Unifying Approach: in The International Fuel Cell Conference Proceedings, NEDO/MITI, Tokyo, Japan, 1992.
- 6 Roland B., Secholta J., Wendt, Phosphoric Acid Fuel Cells-Materials Problems, Process Techniques and Limits of the Technology, in The International Fuel Cell Conference Proceedings, NEDO/MITI, Tokyo, Japan, 1992.
- 7 Cameron D.S., World Developments of Fuel Cells, Int. J. Hydrogen Energy, Vol.15, No 9, str. 669-675, 1990.





