

Arkadiusz MAŁEK

## WPŁYW CIŚNIENIA I TEMPERATURY PRACY NA OSIĄGI OGNIWA PALIWOWEGO TYPU HTPEM

### Streszczenie

W artykule omówiony został wpływ warunków pracy systemu ogniw paliwowych typu HTPEM na jego osiągi. Przedstawiono krzywe polaryzacji jednokomórkowego ogniwa paliwowego dla zmiennych ciśnień reagentów (powietrza i wodoru). Kolejny eksperyment dotyczył wyboru optymalnej temperatury pracy systemu. Analiza warunków pracy uwzględnia osiągi systemu, bezpieczeństwo pracy a także jego trwałość. Na podstawie wyników zrealizowanych badań określono zalecane warunki pracy systemu ogniw paliwowych typu HTPEM dla zastosowań motoryzacyjnych.

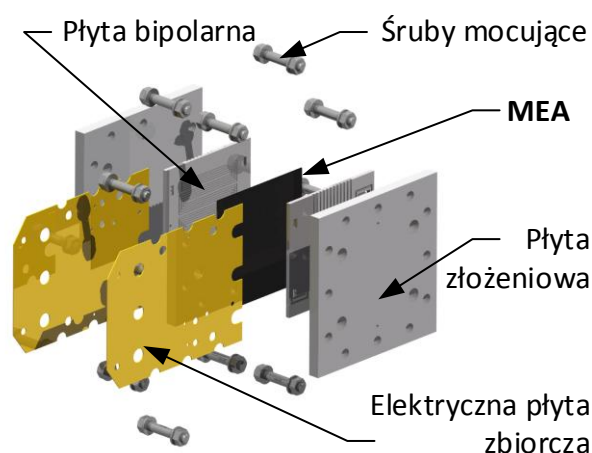
### WSTĘP

Systemy wysokotemperaturowe wodorowych ogniw paliwowych typu HTPEM (High Temperature Proton Exchange Membrane) posiadają liczne zalety w stosunku do systemów LTPEM (Low Temperature Proton Exchange Membrane) [3, 7]. Pierwsza dotyczy braku konieczności nawilżania membrany i stosowania skomplikowanego a zarazem drogiego nawilżacza. Kolejne zalety związane z prostą budową całego systemu HTPEM przekładają się na większą sprawność całego systemu i niwelują 10% mniejsze osiągi napięciowe samego ogniwa. Większa tolerancja CO przez systemy wysokotemperaturowe, przekłada się na możliwość użycia do ich zasilania wodoru pochodzącego z pokładowego reformingu paliw płynnych. Jest to ogromną zaletą rozwiązującą konieczność magazynowania na pokładzie sprężonego lub ciekłego wodoru. Z końcowego zestawienia wynika, że w niedługim czasie systemy wysokotemperaturowe powinny zyskać na znaczeniu i stać się podstawą budowy kolejnych komercyjnych pojazdów zasilanych wodorowymi ogniwami paliwowymi. Jednak najpierw konieczne jest określenie optymalnych warunków pracy systemu generowania mocy. Musi on uwzględniać fizyczne warunki pracy systemu wysokotemperaturowego, które mają wpływ na jego osiągi, bezpieczeństwo a także trwałość.

### 1. OPIS BADANEGO OGNIWA PALIWOWEGO TYPU HTPEM

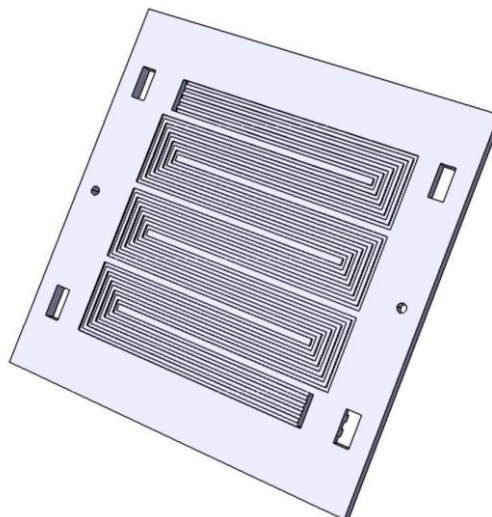
Badaniom zostało poddane jednokomórkowe wysokotemperaturowe ogniwo paliwowe tzw. HTPEM FC (High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cell).

Badane ogniwo paliwowe zawiera komercyjne złożenie membrana-elektrody (MEA) PBI BASF Fuel Cell Celtec P-1000 [8], dwie bipolarne płytki, które oddzielają przestrzeń aktywną reagentów, oraz dwie płyty złożeniowe, które przedstawiono na rysunku 4. MEA posiada powierzchnię aktywną 50 cm<sup>2</sup> i średnią grubość 860 μm. Sama membrana ma 60 μm grubości i 95 % zawartość kwasu fosforowego w matrycy PBI. Zawartość platynowego katalizatora wynosi 0,75 mg/cm<sup>2</sup> na katodzie i 1 mg/cm<sup>2</sup> na anodzie [5]. Płytki bipolarne zostały zaprojektowane i wykonane przez włoskich naukowców [6] z wykorzystaniem proszku grafitowego Sigracet BPP4, który może wytrzymać maksymalną temperaturę działania rzędu 180 °C. Elementy badanego ogniwa paliwowego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Widok rozstrzelony jednokomórkowego ogniwa paliwowego

Każda płytka posiada z jednej strony kanały przepływu reagentów w postaci pięciokrotnej serpentyny (patrz rysunek 2), zaś z drugiej strony równoległe kanały podgrzewania/chłodzenia powietrzem. Kształt kanałów przepływu zarówno powietrza jak i paliwa ma duży wpływ na osiągi ogniwa ze względu na łatwy ich dostęp do trójfazowych rejonów reakcji jak i sprawne usuwanie ich produktów [4].



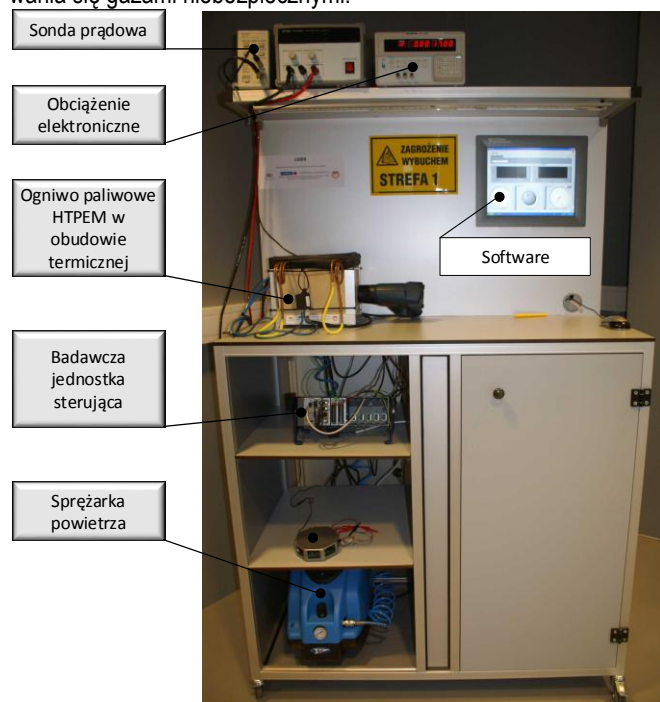
Rys. 2. Widok płyty zasilającej ogniwa paliwowego

Zasilanie powietrzem strony katodowej ma ogromny wpływ na właściwości i eksploatację całego systemu ogni paliwowych. Za odpowiednie doprowadzenie powietrza do trójfazowego obszaru strony katodowej oraz odprowadzenie powstającej wody odpowiadają kanały wykonane w płycie bipolarnej.

Nominalna temperatura pracy wysokotemperaturowego ogniwa wynosi 150 - 170 °C, zatem całość została umieszczona w termicznej obudowie.

## 2. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

W badaniach wykorzystano stanowisko badawcze powstałe w ramach projektu LIDER (fundacja NCBiR). Stanowisko posiada możliwość powtarzalnego i, co najważniejsze, bezpiecznego przeprowadzenia badań. Takie możliwości ma stanowisko przedstawione na rysunku 3. Stanowisko badawcze [1] znajduje się w Lubelskim Parku Naukowo-Technologicznym w Lublinie, w którym zapewnione są odpowiednie warunki do przeprowadzania badań naukowych tego rodzaju. Pomieszczenie posiada profesjonalny system wyciągu powietrza, który jest wymagany podczas posługiwania się gazami niebezpiecznymi.



**Rys. 3.** Widok stanowiska badawczego wysokotemperaturowych ogni paliwowych

Do zmierzenia ciśnienia wlotowego substratów i produktów zostały użyte dwa czujniki MPX4250A firmy Freescale. Temperatura ogniwa paliwowego jest mierzona przez dwie termopary typu termopary PT204 firmy Czaki. Ilość przepływającego wodoru mierzy przepływomierz Bronkhorst EI-Flow F201. Obciążenie elektroniczne dla ogni paliwowych jest realizowane poprzez programowalny moduł PEL-300 firmy Gwlnstek, działający w trybie stałego prądu, napięcia lub rezystancji.

System pomiarowy i sterujący bazujący na urządzeniach National Instruments CompactRIO został użyty do sterowania głównymi parametrami działania systemu generowania wodoru (przepływu reagentów, pomiar i regulacja temperatury) w celu uzyskania danych eksperymentalnych. Urządzenia CompactRIO, składające się ze sterownika czasu rzeczywistego NI cRIO 9022 oraz 8-słotowej obudowy NI cRIO 9104, zostało skonfigurowane z modułami prze-

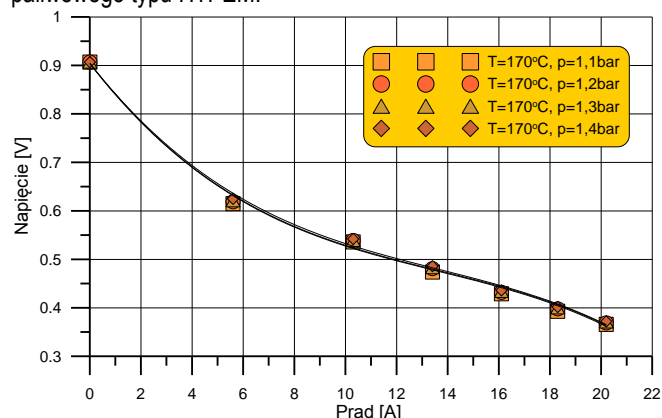
znaczonymi do specyficznych zadań. Napięcie i prąd pojedynczej komórki wysokotemperaturowego ogniwa paliwowego oraz ciśnienia substratów i produktów zostały zmierzone przez analogowy moduł wejściowy NI cRIO 9215, zaś temperatury przez moduł obsługi termopar NI cRIO 9213. Sterowanie dmuchawą powietrza umożliwił przekaźnikowy moduł wyjść NI cRIO 9481. Doskonałym uzupełnieniem całości jest komputer laboratoryjny z 15" ekranem dotykowym i oprogramowaniem LabView w wersji 2013 służącym do wizualizacji, sterowania oraz archiwizacji uzyskanych danych pomiarowych. Kolejnym ważnym elementem pomiarowym układu jest sonda prądowa. W badaniach została wykorzystana sonda Tektronix TCP305 wraz ze wzmacniaczem sygnału TCPA300.

## 3. WPŁYW CIŚNIENIA NA OSIĄGI OGNIWA PALIWOWEGO

Zasilanie powietrzem strony katodowej ogniwa paliwowego typu HTPEM jest jedną z podstawowych funkcji efektywnego sterowania systemem ogni paliwowych [3]. Wynika to z wielu zadań, jakie pełni powietrze w układach tego typu. Podczas działania ogniwa konieczne jest, aby system zasilania w powietrze szybko uzupełniał zużyty tlen. W przeciwnym razie katoda ogniwa ulegnie uszkodzeniu z powodu nadmiernego zubożenia w tlen, a w konsekwencji nastąpi zmniejszenie generowanej przez ogniwo mocy. Wraz z powietrzem zostaje odprowadzona z ogniwa do otoczenia część ciepła wydzielanego w egzotermicznych reakcjach w nim zachodzących. Odpowiednio sterując przepływem powietrza można poprawić osiągi ogniwa. Może to mieć wymiar zwiększenia generowanej mocy, a także przedłużenia trwałości.

Układy zasilania powietrzem systemów ogni paliwowych dzieli się na układy niskociśnieniowe i wysokociśnieniowe. W układach niskociśnieniowych powietrze jest dostarczane do obszarów reakcji pod ciśnieniem bliskim ciśnieniu atmosferycznemu. Umowną granicą występującą w literaturze jest wartość 1,5 bara. W układach wysokociśnieniowych powietrze jest sprężane do wyższych ciśnień (od 1,6 do 8 bar) w celu uzyskiwania dużych gęstości generowanego prądu.

Przedmiotowe badania przeprowadzono w zakresie niskociśnieniowym ze względu na grubość zastosowanej membrany protonowymiennej. W ustalonej temperaturze pracy wynoszącej 170°C dokonywano zmian ciśnienia reagentów (zarówno powietrza jak i wodoru) w zakresie od 1,1 do 1,4 bar. Zastosowanie regulacji ciśnienia obydwu reagentów po obydwu stronach membrany przekłada się na wydłużenie czasu jej pracy. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ ciśnienia na krzywe polaryzacji jednokomórkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM.



**Rys. 4.** Wpływ ciśnienia na krzywe polaryzacji jednokomórkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM

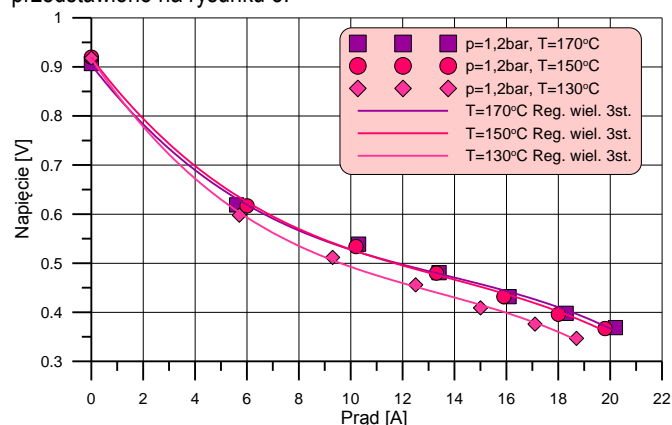
Z badań wynika, że zmiana ciśnienia w badanym zakresie nie ma bezpośredniego wpływu na osiągi ogniwa paliwowego. Wynika z tego, że przy niższych ciśnieniach (1,1 ÷ 1,2) nie dochodzi do zubożenia strony katodowej w powietrze ani nie ma problemów z usuwaniem powstającej po stronie anodowej wody co może skutkować obniżeniem generowanego napięcia. Przy wyższych ciśnieniach (1,3 ÷ 1,4) nie zaobserwowano zaś wzrostu generowanego napięcia ze względu na łatwiejszą dostępność reagentów wynikającą z równania Nernsta.

Ogniwa paliwowe o mocy mniejszej niż 5 kW są wyposażone zazwyczaj w niskociśnieniowy układ zasilania powietrzem. W układach takich do tłoczenia powietrza wykorzystuje się dmuchawy i wentylatory, które mają za zadanie jedynie dostarczyć czynnik do katody przy ciśnieniu bliskim ciśnieniu otoczenia. Przekłada się to oczywiście na wielkość generowanej mocy i ogólną sprawność systemu, które są mniejsze dla niższego ciśnienia zasilania. Do zalet ogniw niskociśnieniowych można zaliczyć cichą pracę wentylatorów oraz ich małą masę, co ma duże znaczenie w przypadku użycia układu do napędu pojazdów. Dmuchawy i wentylatory charakteryzują się małą bezwładnością, a co za tym idzie, zużywają stosunkowo mało energii w stanach nieustalonych.

#### 4. WPŁYW TEMPERATURY PRACY NA OSIĄGI

Oprócz ciśnienia reagentów, drugim podstawowym parametrem mogącym mieć istotny wpływ na osiągi ogniwa może być temperatura pracy. Temperatura może mieć wpływ na wartości generowanego napięcia w różnych rejonach krzywej polaryzacji (aktywacyjnej, rezystancyjnej, koncentracyjnej).

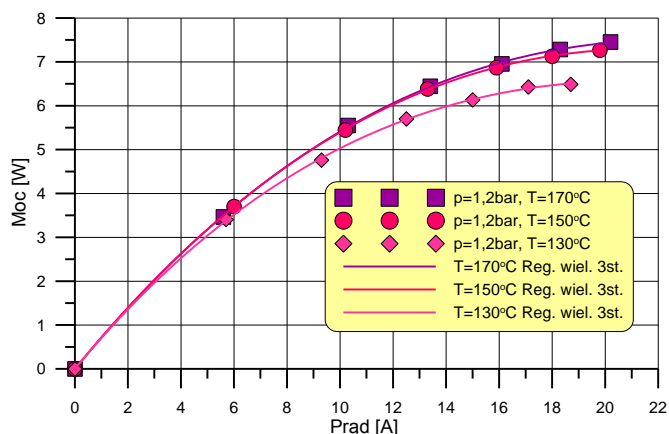
Dla ustalonej wartości ciśnienia reagentów, wynoszącej 1,2 bar, dokonano pomiaru krzywej polaryzacji dla trzech różnych temperatur w zakresie od 130 ÷ 170°C. Wpływ temperatury na krzywe polaryzacji jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Wpływ temperatury na krzywe polaryzacji jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM

Z przedstawionych na rysunku 5 wykresów wynika, że temperatura ma duży wpływ na osiągi jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM we wszystkich regionach krzywej polaryzacji (aktywacyjnej, rezystancyjnej, koncentracyjnej). Widoczny jest duży wzrost generowanego napięcia pomiędzy 130 i 150°C. Dalszy wzrost o kolejne 20°C nie spowodował już tak dużego przyrostu napięcia.

Bardzo wyraźnie widać to na wykresie generowanej przez ogniwo paliwowe mocy, który przedstawiono na rysunku 6. W badanym zakresie temperatur wystąpił ok. 13% wzrost generowanej mocy. Przy czym ok. ponad 10% wzrost uzyskano już w temperaturze 150 °C.



Rys. 6. Wpływ temperatury na moc jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM

#### PODSUMOWANIE

Badania wykazały niewielki wpływ ciśnienia zasilających substratów na osiągi badanego jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM. Wynika z tego, że nieopłacalne jest zwiększanie ciśnienia pracy do wartości większych niż 1,2bar. Wymaga to użycia większej dmuchawy powietrza jak i zwiększa straty bierne powodowane przez takie urządzenie. Wartość 1,2bar wybrano ze względów bezpieczeństwa na wypadek dużych skoków prądowych obciążenia w celu zabezpieczenia przed chwilowym zubożeniem w tlen strony katodowej i uszkodzenia membrany.

Badania wykazały duży wpływ temperatury pracy na osiągi badanego jednoczątkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM. Biorąc pod uwagę wymagania branży motoryzacyjnej właśnie temperatura pracy systemu ogniw paliwowych wynosząca 150 °C jest najbardziej odpowiednia. Do opomiarowania i sterowania takim systemem możliwe będzie użycie wykorzystywanych obecnie w motoryzacji komponentów. Przełoży się to na ewidentne obniżenie kosztów całego systemu i szybsze wprowadzenie na rynek pojazdów zasilanych wodorowymi ogniwami paliwowymi.

#### BIBLIOGRAFIA

- Małek A., Barański G., Sochaczewski R., Wspomagane komputerowo stanowisko laboratoryjne do badania ogniw paliwowych i elektrolizerów typu HTPEM. XVII Międzynarodowa Konferencja Naukowa TRANSCOMP'2013, Zakopane 2 - 5 grudnia 2013 r. Technika Transportu Szynowego nr 10/2013, str. 49 – 56. ISSN 1232-3829.
- Małek A., Kłonica M. Zadania układu zasilającego powietrzem ogniwo paliwowe typu PEM. VII Międzynarodowe Sympozjum Studenckich Kół Naukowych „Inżynierowie Nowej Ery”, Lublin 15-16.05.2006r. Materiały konferencyjne w postaci książkowej: „Inżynierowie nowej ery a zagadnienia konstruowania i badania pojazdów”, str. 119–123.
- Małek A.: Analiza porównawcza parametrów pracy ogniw paliwowych typu LTPEM i HTPEM celem ich użycia do napędu pojazdów. XII Konferencja LOGITRANS'2015, Szczyrk, 20-23.04.2015. Czasopismo Logistyka – nauka 3/2015 (10 pkt. MNiSW) str. 3048 – 3056. ISSN 1231-5478.
- Taccani R., Zuliani N.: Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: Experimental analysis. International Journal of hydrogen energy 36 (2011) 1282-1287
- Zuliani N., Radu R., Taccani R.: Design and experimental characterization of a 350 W high temperature PEM fuel cell

- stack. 9th YSESM, Trieste, Italy, July 7-9, 2010; ISBN 978-88-95940-30-4
6. Taccani R., Radu R., Zuliani N., Damjanovic A.: Design and experimental characterization of a high temperature PEM fuel cell stack. Proceedings of the 3rd European Fuel Cell technology & Applications EFC09 December 15-18, 2009, Rome, Italy
  7. Bose S., Kuila T., Nguyen T.: Polymer membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell: Recent advances and challenges. Progress in Polymer Science 36 (2011) 813–843
  8. Schmidt T., Baurmeister J.: Properties of high-temperature PEFC Celtec®-P1000 MEAs in start/stop operation mode. Journal of Power Sources 176 (2008) 428–434

## INFLUENCE OF OPERATING PRESSURE AND TEMPERATURE ON PERFORMANCE HTPEM FUEL CELLS

### *Abstract*

*The article discussed the impact of operation conditions HTPEM fuel cell system on its performance. Presented the polarization curve of the single fuel cell for changing pressures of the reactants (air and hydrogen). Another experiment concerned the selection of the optimum operating temperature of the system. The analysis takes into account the working conditions system performance, safety and durability. Based on the results realized studies, operating conditions HTPEM fuel cell system for automotive applications were recommended.*

Autorzy:  
dr inż. **Arkadiusz Małek** – Instytut Badawczo-Rozwojowy Lubelskiego Parku Naukowo-Technologicznego