

MAŁEK Arkadiusz, BARAŃSKI Grzegorz, SOCHACZEWSKI Rafał

## WSPOMAGANE KOMPUTEROWO STANOWISKO LABORATORYJNE DO BADANIA OGNIW PALIWOWYCH I ELEKTROLIZERÓW TYPU HTPEM

### *Streszczenie*

*W ramach projektu Lider finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju zostało opracowane nowoczesne stanowisko do badania zarówno ogniw paliwowych jak i elektrolizerów. Zostało ono umieszczone w budynku Lubelskiego Parku Naukowo – Technologicznego, gdzie znajdują się doskonałe warunki do prowadzenia badań naukowych tego typu jak i komercjalizacji uzyskanych wyników. Zbudowane stanowisko badawcze jest typu uniwersalnego, przystosowane do badania membranowych ogniw paliwowych i elektrolizerów niskotemperaturowych (LTPEM) oraz wysokotemperaturowych (HTPEM). Jest to możliwe dzięki uniwersalnej badawczej jednostce sterującej zbudowanej na bazie modułu CompactRIO firmy National Instruments. Uzpełnieniem stanowiska są nowoczesne zasilacze oraz programowalne obciążenie prądowe. W przypadku ogniw/elektrolizerów HTPEM są one umieszczane w obudowie termicznej pozwalającej na pracę w temperaturach do 200 °C. Prezentowane stanowisko zawiera całą niezbędną infrastrukturę dostarczania wodoru jak i system wykrywania nieszczelności. W artykule zostanie wykazane, że obecne badania ogniw paliwowych/elektrolizerów muszą być wspomagane innowacyjnymi technologiami komputerowymi.*

### WSTĘP

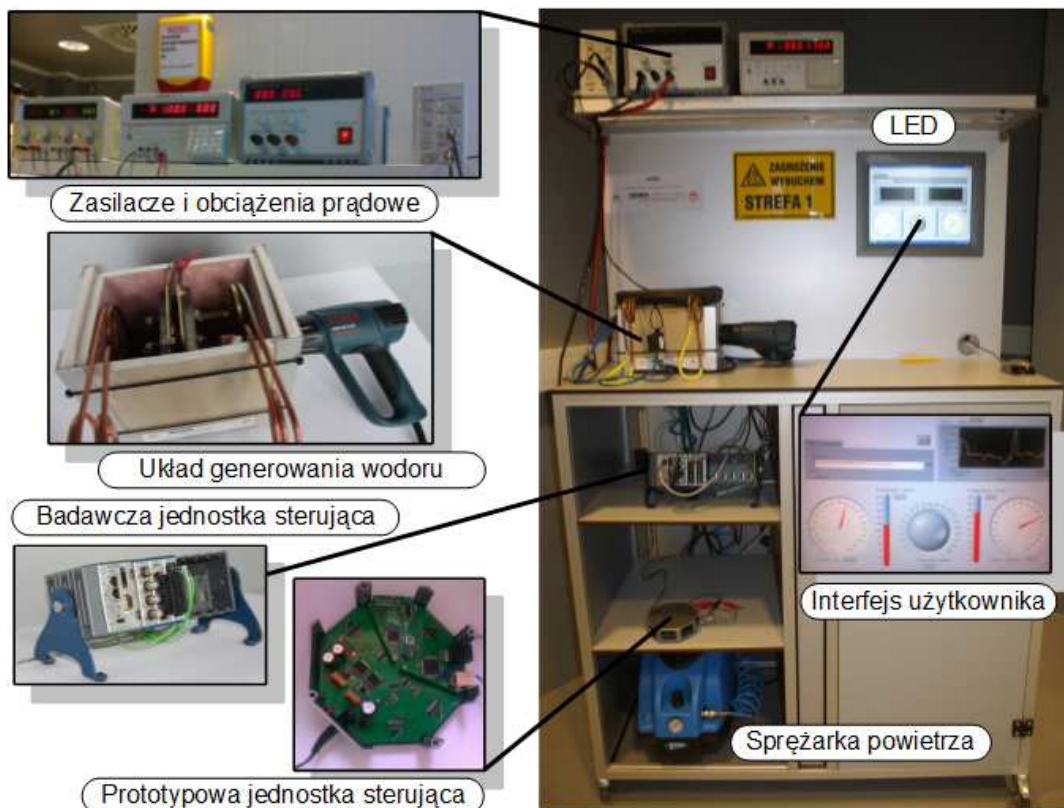
W każdej dziedzinie życia możemy dziś zaobserwować dążenia związane ze zwiększaniem wydajności, sprawności czy lepszym wykorzystaniem substratów do produkcji wszelkiego rodzaju wyrobów. Również systemy ogniw paliwowych, które coraz częściej zastępują mało wydajne i ekologiczne silniki spalinowe, można optymalizować w celu uzyskiwania jak największej sprawności. Można to czynić na wiele sposobów. Odpowiedni dobór komponentów do budowy takiego systemu oraz efektywne sterowanie nimi umożliwiają realizację takich celów [2].

Zarówno sterowanie w czasie rzeczywistym takimi obiektami jak ogniwa paliwowe oraz elektrolizery [3] jak i projektowanie takich systemów może być wspomagane za pomocą specjalnych służących do tego systemów programowych ułatwiających projektowanie (CAD, CACSD, CFD) [1]. Celem artykułu jest uwydatnienie jakie korzyści płyną z komputerowego wspomaganie projektowania różnego typu układów na przykładzie budowy nowoczesnego stanowiska badawczego. Zwrócono także uwagę na ogromną rolę modelowania w dzisiejszej technice, nauce i dydaktyce.

# 1. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO WYSOKOTEMPERATUROWYCH OGNIW PALIOWYCH/ELEKTROLIZERÓW

Widok wspomaganego komputerowo stanowiska badawczego ogniw paliwowych i elektrolizerów został przedstawiony na rysunku 1. Dwa czujniki MPX4250A firmy Freescale zostały użyte do zmierzenia ciśnienia wlotowego reagentów. Temperatura ogniwa/elektrolizera jest mierzona przez dwie termopary typu termopary PT204 firmy Czaki. Ilość przepływu reagentów mierzy przepływomierz Bronkhorst El-Flow F201 dla obwodu wodorowego. Obciążenie elektroniczne dla ogniw paliwowych jest realizowane poprzez programowalny moduł PEL-300 firmy GwInstek, działający w trybie stałego prądu, napięcia lub rezystancji. Dla elektrolizera układ zasilania prądem stanowi zasilacz ATTEN KPS3050DA. Umożliwia on regulację napięcia zasilania w zakresie od 0 do 30V.

System pomiarowy i sterujący bazujący na urządzeniach National Instruments CompactRIO został użyty do sterowania głównymi parametrami działania systemu ogniw paliwowych (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 przeznaczonymi do specyficznych zadań. Napięcie i prąd pojedynczego ogniwa oraz ciśnienia substratów zostały zmierzone przez analogowy moduł wejściowy NI cRIO 9215, zaś temperatury przez moduł obsługi termopar NI cRIO 9213. Sterowanie dmuchawą powietrza umożliwiał 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.



**Rys. 1.** Widok stanowiska badawczego ogniw paliwowych i elektrolizerów typu HTPEM

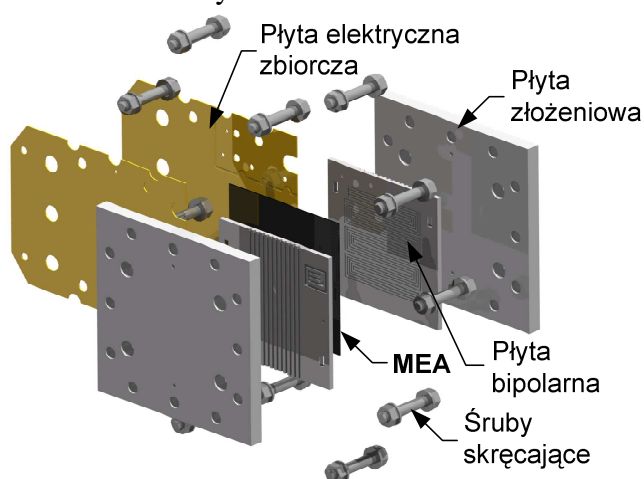
Źródło: Archiwa własne

Kolejnym ważnym elementem pomiarowym układu jest sonda prądowa. W badaniach została wykorzystana sonda Tektronix TCP305 wraz ze wzmacniaczem sygnału TCPA300. Sonda pracuje na zasadzie transformatora. Otwierany rdzeń umożliwia objęcie sondą przewodu z prądem bez potrzeby przerywania go. Wzmacniacz z kolei, zwiększa czułość sondy i umożliwia korekcję pasma.

Do pomiaru rozkładu temperatury w obudowie termicznej została wykorzystywana także kamera podczerwieni RAYCAM C.A. 1884 firmy Chauvin-Arnoux zdolna do dokonywania pomiarów w zakresie temperatur  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  z czułością termiczną  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  przy częstotliwości 50 Hz.

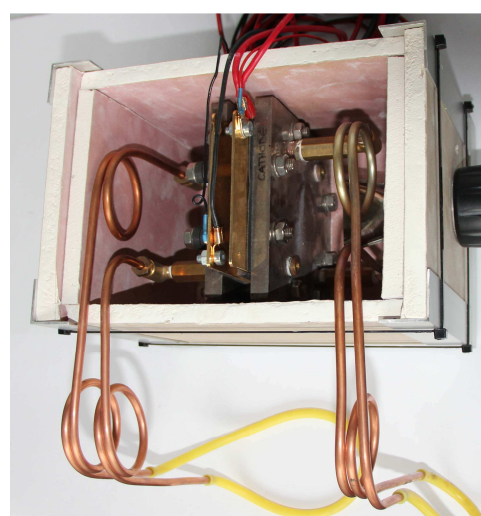
## 2. WYSOKOTEMPERATUROWE OGNIWO/ELEKTROLIZER

Wykonane w ramach projektu badawczego ogniwo/elektrolizer zawiera komercyjne złożenie membrana-elektrody (MEA) PBI BASF Fuel Cell Celtec P-1000, dwie bipolarne płytki, które oddzielają przestrzeń aktywną reagentów, oraz dwie płyty złożeniowe (rysunek 2). MEA posiada powierzchnię aktywną  $50\text{ cm}^2$  i średnią grubość  $860\text{ }\mu\text{m}$ . Sama membrana ma  $60\text{ }\mu\text{m}$  grubości i 95 % zawartość kwasu fosforowego w matrycy PBI. Zawartość platynowego katalizatora wynosi  $0,75\text{ mg/cm}^2$  na katodzie  $1\text{ mg/cm}^2$  na anodzie [5]. Płyty bipolarne zostały zaprojektowane i wykonane przez włoskich naukowców [7] z wykorzystaniem proszku grafitowego Sigracet BPP4, który może wytrzymać maksymalną temperaturę działania rzędu  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Każda płytka posiada z jednej strony kanały przepływu reagentów w postaci pięciokrotnej serpentyny [6], zaś z drugiej strony równoległe kanały podgrzewania/chłodzenia powietrzem. Elementy ogniwa są umieszczone i skręcone pomiędzy dwoma, wykonanymi ze stali nierdzewnej, płytami złożeniowymi i skręcone ośmioma gwintowanymi trzpieniami momentem 7 Nm. Nominalna temperatura pracy wysokotemperaturowego ogniwa wynosi  $150 - 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ , zatem całość została umieszczona w termicznej obudowie przedstawionej na rysunku 3. Zarówno konstrukcja stołu badawczego, jak i samego ogniwa, zostały zaprojektowane z wykorzystaniem softwaru CAD (Computer Aided Design) w postaci Catia v5 umożliwiającego modelowanie 3D poszczególnych elementów, tworzenie złożeń oraz automatyczne generowanie dokumentacji technicznej. Podejście takie przyczyniło się w znacznym stopniu do skrócenia czasu projektowania oraz łatwego wprowadzania zmian wynikających z ewolucji konstrukcji poszczególnych elementów składowych.



**Rys. 2.** Widok rozstrzelony złożenia modelu elektrolizera typu HTPEM

Źródło: Archiwa własne



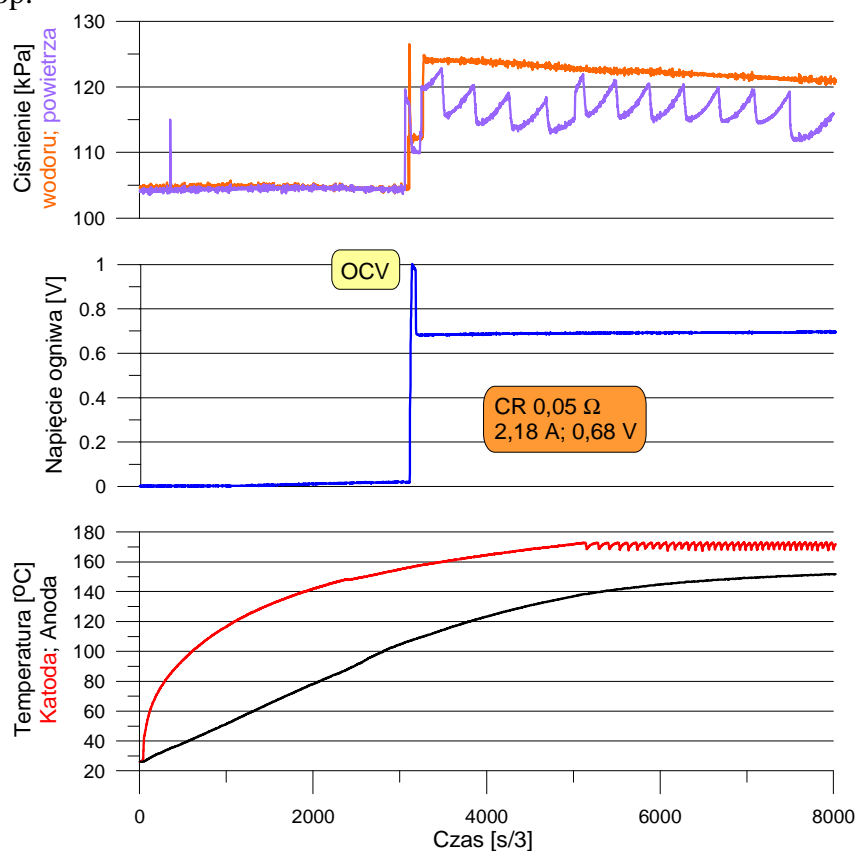
**Rys. 3.** Elektrolizer typu HTPEM w obudowie termicznej

Źródło: Archiwa własne

### 3. BADANIA PROCESU PODGRZEWANIA WYSOKOTEMPERATUROWEGO OGNIAW/ELEKTROLIZERA

W badaniach wysokotemperaturowych ogniw paliwowych oraz elektrolizerów typu PEM (High Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells) bardzo ważne jest utrzymanie właściwej temperatury pracy. Musi być ona wyższa od 100 °C ze względu na wymóg braku wody w stanie ciekłym, która może doprowadzić do zniszczenia membrany HTPEM. Zasada ta dotyczy pracy systemu zarówno w trybie ogniw paliwowego jak i elektrolizera. Podczas pracy ogniw paliwowego po stronie katodowej przez cały czas powinny być sprzyjające warunki generowaniu wody w postaci pary wodnej. Strona anodowa elektrolizera zaś powinna być zasilana jedynie parą wodną. Ilość przepływających substratów i produktów powinna być zatem cały czas monitorowana i kontrolowana. Również sama konstrukcja kolektorów zasilających i wylotowych ogniw/elektrolizera powinna być tak zaprojektowana by nie sprzyjać skraplaniu wody.

Przykład danych pomiarowych, uzyskanych podczas podgrzewania komórki ogniw paliwowego, został przedstawiony na rysunku 4. Do podgrzewania systemu wykorzystywana jest dmuchawa powietrza ustawiona na temperaturę 250 °C skierowana na płytę złożeniową katody ogniw paliwowego (pełniącą rolę anody elektrolizera). W związku z tym strona katodowa, zamkniętego w termicznej obudowie ogniw, nagrzewa się szybciej niż strona anodowa co wyraźnie widać na dolnym wykresie rysunku 4. System zasilono powietrzem i wodorem dopiero po przekroczeniu temperatury 100 °C po stronie anodowej. Do osiągnięcia nominalnej temperatury pracy (160 °C, mierzonej jako temperatura średnia pomiędzy stroną katodową i anodową) system ogniw paliwowych powinien pracować z niewielkimi obciążeniami prądowymi. Po osiągnięciu zadanej temperatury pracy dmuchawa pracuje w trybie start/stop.

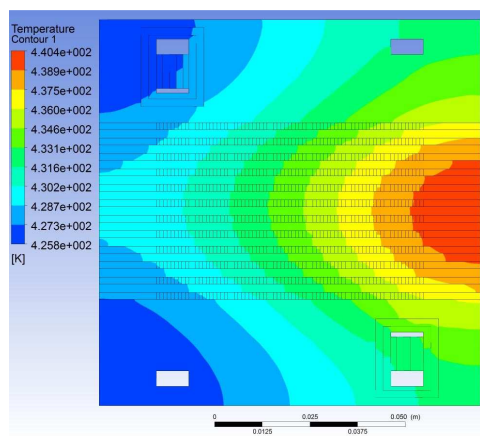


Rys. 4. Proces podgrzewania wysokotemperaturowego ogniw/elektrolizera

Źródło: Archiwa własne

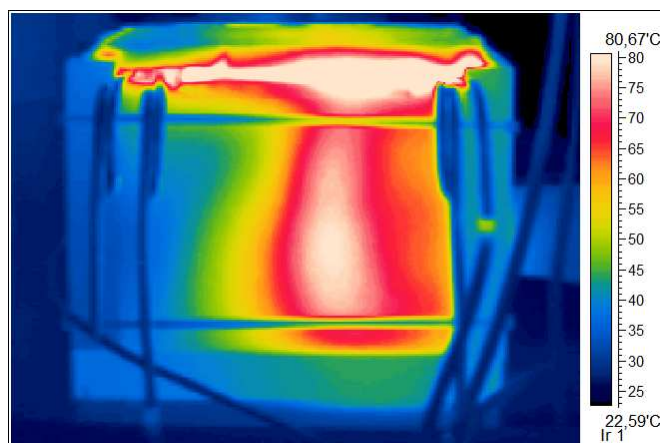


Badania symulacyjne posłużyły do sprawdzenia różnych strategii rozgrzewania elektrolizera do nominalnej temperatury pracy. Rozkład temperatury na płycie katodowej w wyniku grzania zewnętrznym strumieniem powietrza przedstawia rysunek 5, zaś na rysunku 6 przedstawiono weryfikację takiej strategii z użyciem kamery termowizyjnej. Przedstawione przykłady wykazują, że proces opracowywania strategii zasilania reagentami ogniwo/elektrolizerów może być wspomagany komputerowo. Modelowanie bryłowe 3D z programu Catia v5 zostało wykorzystane w programie CFD (Computational Fluid Dynamics) AVL Fire [4] do określenia rozkładu temperatur na płycie bipolarnej w wyniku grzania strumieniem powietrza o określonej temperaturze. Pomimo optymalizacji zarówno temperatury jak i masowego strumienia powietrza grzejącego podczas badań symulacyjnych zdecydowano się na weryfikację strategii grzania z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Jak widzimy nowoczesny sprzęt i oprogramowanie mogą się uzupełniać podczas prowadzenia badań i w ten sposób przyczyniać się do zapewnienia odpowiednich warunków pracy systemu. Te z kolei przekładają się na osiągi i żywotność systemów opartych na ogniwach paliwowych typu HTPEM.



**Rys. 5.** Rozkład temperatury na płycie katody

Źródło: Archiwa własne



**Rys. 6.** Termogram elektrolizera podczas podgrzewania

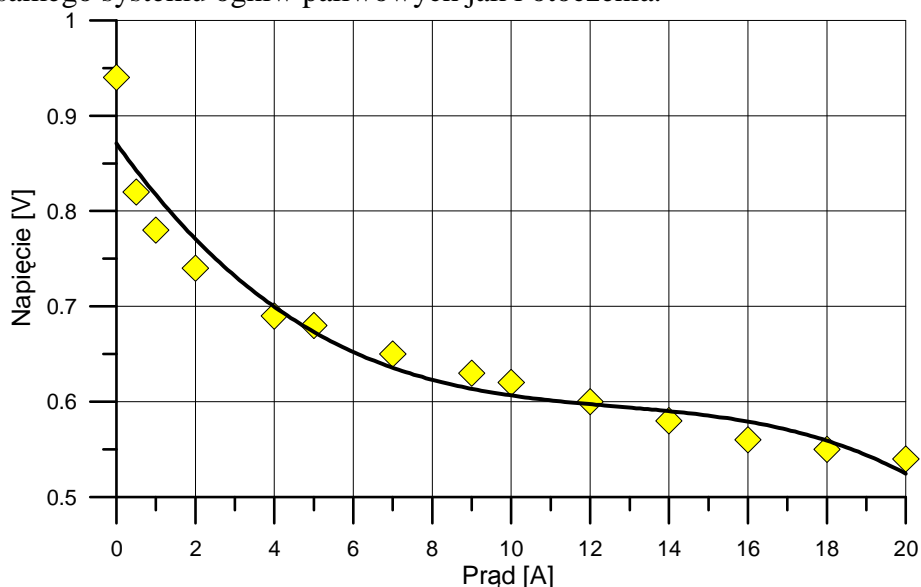
Źródło: Archiwa własne

#### **4. BADANIA CHARAKTERYSTYK WYSOKOTEMPERATUROWEGO OGNIWA PALIWOWEGO/ELEKTROLIZERA**

Najważniejszą charakterystyką wodorowych ogniwo paliwowych jest tzw. krzywa polaryzacji, która została przedstawiona na rysunku 7. Przedstawia zależność wielkości generowanego napięcia od prądu obciążającego ogniwo lub stos ogniwo paliwowych. Na jej podstawie eksperci są w stanie określić osiągi badanego ogniwa oraz monitorować ich spadek podczas długoterminowej pracy systemu. Bardzo wiele mówi również o potencjalnej możliwości użycia danego modułu ogniwo paliwowych do konkretnego zastosowania. Określenie optymalnego punktu pracy systemu (w której części charakterystyki) wpływa na sprawność systemu jak i jego żywotność.

Obciążenie elektroniczne dla ogniwo paliwowych jest realizowane poprzez moduł PEL-300 firmy GwInstek. Moduł posiada możliwość programowania zmiany obciążenia w czasie co jest bardzo często wykorzystywane w badaniach trwałościowych ogniwo paliwowych typu PEM i HTPME. Ilość startów systemu jest, zaraz po czasie pracy, jednym z głównych kryteriów oceny pracy. Obciążenie elektroniczne posiada wiele zalet w porównaniu z tradycyjnym sposobem obciążania systemu. Należy tu wymienić możliwość pracy

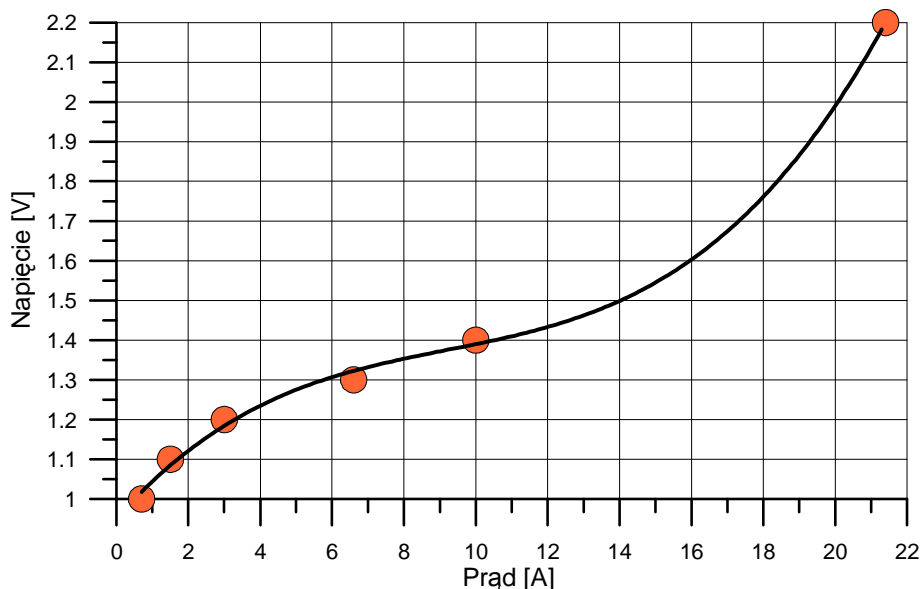
w różnych trybach obciążenia (stałego prądu, napięcia lub rezystancji), dokładność, powtarzalność oraz możliwość jego dokładnego utrzymania bez względu na zmieniające się parametry samego systemu ogniwa paliwowych jak i otoczenia.



**Rys. 7.** Krzywa polaryzacji jednocelkowego ogniwa paliwowego typu HTPEM

Źródło: Archiwa własne

Dla elektrolizera układ zasilania prądem stanowi zasilacz ATEN KPS3050DA. Charakterystykę prądowo-napięciową elektrolizera HTPEM przedstawia rysunek 8. Prawie cały prąd zasilający elektrolizer jest przeznaczony na elektrolizę pary wodnej zasilającej anodę elektrolizera w celu uzyskania czystego wodoru po stronie katodowej. Jest to możliwe dzięki właściwościom membrany HTPEM jak i spowodowane brakiem strat energii elektrycznej na podgrzewanie wody do postaci pary wodnej. W takiej sytuacji naukowcom zależy na maksymalizacji mocy elektrolizerów i czasu ich pracy. Uzyskanie na jednocelkowym elektrolizerze obciążenia prądowego około 22 A jest bardzo dobrym wynikiem.



**Rys. 8.** Charakterystyka prądowo-napięciowa jednocelkowego elektrolizera typu HTPEM

Źródło: Archiwa własne

## PODSUMOWANIE

Artykuł przedstawił konieczność wykorzystywania komputerowych programów wspomagających projektowanie konstrukcji stanowisk badawczych, samych złożeń ogniw paliwowych oraz elektrolizerów oraz systemów sterowania nimi na wszystkich etapach. Zostało także podkreślone, że przy badaniu systemów sterowania dla różnych obiektów bardzo ważną rolę odgrywa ciągle rozwijająca się grupa badań symulacyjnych, które często są jedynym sposobem wiodącym do przeprowadzenia skutecznej analizy porównawczej reguł sterowania obiektami nieliniowymi o stochastycznie zmiennych parametrach i warunkach pracy. Badania takie dodatkowo znacznie zmniejszają koszt eksperymentu i pozwalają na precyzyjną analizę, która nie zależy od czynników zakłócających trudnych do wyeliminowania na stanowisku badawczym.

Oprócz wspomaganego komputerowo projektowania elementów składowych stanowiska badawczego nieodzowne jest stosowanie zaawansowanego softwaru do pomiaru, wizualizacji oraz pomiaru parametrów pracy systemu. Przedstawione w artykule oprogramowanie LabView kompatybilne z hardwarem Compact Rio jest bardzo wygodnym, łatwym i przyjemnym środowiskiem do nawet bardzo zaawansowanych badań naukowych. Dzięki popularności bardzo często stanowi podstawę zajęć laboratoryjnych w ramach różnych kursów prowadzonych na poziomie szkoły średniej, studiów wyższych I, II stopnia oraz doktoranckich.

Autorzy przedstawili jedynie krótki opis kilku obszarów badawczych wysokotemperaturowych ogniw paliwowych i elektrolizerów podlegających wspomaganemu komputerowemu. Konstrukcja różnej wielkości stosów ogniw/elektrolizerów jest nadal rozwijana i weryfikowana z wykorzystaniem zaawansowanego oprogramowania CFD. Autorzy pracują także nad rozwojem adaptacyjnych algorytmów sterujących pracą ogniw/elektrolizerów w celu optymalizacji ich osiągnięć oraz wydłużenia czasu pracy. Celem działań grupy badawczej jest nie tylko prowadzenie badań naukowych ale również projektowanie oraz wykonywanie zaawansowanych demonstratorów technologii wodorowych.

## BIBLIOGRAFIA

1. Małek A., Czarnigowski J., Wendeker M., Komputerowe wspomaganie projektowania systemu sterowania ogniwnem paliwowym. Konferencja „Informatyka w technice i kształceniu”, Lublin 19.05.2006r. „Informatyka w technice – Tom 1 - 2006”, str. 126 – 137, LTN 2006
2. Małek A., Gęca M., The constructional reasons for the non-repeatability of the voltage generation in PEM fuel cells. PTNSS Kongres – 2013, Bielsko-Biała 24-26.06.2013 COMBUSTION ENGINES. 2013, 154(3), str. 449 – 452. ISSN 0138-0346
3. Małek A., Grabowski Ł., Pietrykowski K., Sochaczewski R., Barański G., Szlachetka M., Gęca M., Analiza możliwości pracy ogniwa paliwowego HTPEM w trybie elektrolizera. VI Konferencja Naukowa Ekoenergia'2011, Lublin 3-5.11.2011. AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe 10/2011, str. 305-311.
4. Małek A., Pietrykowski K., Sochaczewski R., Badania modelowe generatora pary wodnej w programie AVL Fire. Badania symulacyjne w technice samochodowej. 15 - 17.10.2012 Kazimierz Dolny. Postępy nauki i techniki 15/2012, str. 93-102.
5. Schmidt T. J., Baurmeister J., Properties of high-temperature PEFC Celtec-P 1000 MEAs in start/stop operation mode. Journal of Power Sources, 176 (2008) 428.
6. Taccani R., Zuliani N., Effect of flow field design on performances of high temperature PEM fuel cells: Experimental analysis. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 36 (10282-10287), Issue 16, August 2011.

7. 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.

## COMPUTER AIDED STAND FOR LABORATORY TESTS OF HTPEM TYPE FUEL CELLS AND ELECTROLYSERS

### *Abstract*

*Within the Project Lider funded by the National Research and Development Centre the modern test stand for both, fuel cells and electrolyzers has been designed. It has been placed at the Lublin Science and Technology Park joint stock co., where there are excellent conditions for conducting this type of research as well as for commercialization of the results. Built test stand is the universal stand, adapted for the study of Proton Exchange Membrane fuel cells and electrolyzers as well as Low Temperature (LTPEM) as High Temperature (HTPEM). It is possible due to universal laboratory control unit based on CompactRIO module of National Instruments. Completion for the stand are modern power suppliers and programmable current load. In case of HTPEM fuel cells/electrolyzers they are placed in thermal casing allowing them to operate at temperatures up to 200°C. Presented stand includes all the necessary infrastructure of hydrogen supply and leak detection system. In the article it is shown that the current fuel cell/electrolyzers research must be supported by innovative computer technologies.*

### **Autorzy:**

dr inż. **Arkadiusz Małek** – Politechnika Lubelska, Lubelski Park Naukowo-Technologiczny  
mgr inż. **Grzegorz Barański** – Politechnika Lubelska  
dr inż. **Rafał Sochaczewski** – Politechnika Lubelska



LIDER/04/45/L-2/10/NCBIR/2011

Badania i rozwój sterowania energooszczędnym elektrolizerem PEM pracującym w podwyższonej temperaturze

