



## *Badanie ogniwa paliwowego typu PEM*

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie charakterystyki prądowo-napięciowej ogniwa paliwowego typu PEM wchodzącego w skład produkowanego przez firmę PHYWE zestawu czystej energii.

### 1. WSTĘP

Ogniwo paliwowe to urządzenie w którym zachodzi bezpośrednia konwersja energii chemicznej w energię elektryczną z reakcji utleniania stale dostarczanego do niego z zewnątrz paliwa i utleniacza. W odróżnieniu od ogniw galwanicznych ogniwa paliwowe nie wymagają ładowania prądem elektrycznym a jedynie uzupełniania paliwa i utleniacza.

#### Trochę historii

1839: Christian Friederich Schönbein (1799-1868) odkrywa zjawisko powstawaniu prądu elektrycznego w reakcji wodoru z tlenem;

1842: Sir William Robert Grove (1811-1896) konstruuje pierwsze ogniwo paliwowe, a 3 lata później pierwszy generator złożony z 10 ogniw paliwowych zasilany wodorem;

1930: Francis Bacon (Cabrige Univ.) rozpoczyna pracę a w 1950 buduje alkaliczne ogniwo paliwowe z elektrolitem w postaci KOH;

Lata 60: Ogniwa paliwowe w amerykańskim programie kosmicznym (problem dostawy energii elektrycznej i wody);

1963: *Pratt and Whitney* dostarcza 3 prototypy ogniwa paliwowego dla statku Apollo;

1965: Gemini 5 – startuje pierwszy statek kosmiczny z ogniwem paliwowym, producent: *General Electric Corp.*

#### Zalety i wady ogniw paliwowych

<p>Zalety:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>◆ konwersja energii chemicznej w elektryczną dokonuje się w sposób bezpośredni (bez spalania paliwa) ze sprawnością do 68 %</li><li>◆ minimalna emisja zanieczyszczeń</li><li>◆ pozyskiwanie ciepła i wody</li><li>◆ stosunkowo prosta budowa</li><li>◆ niski poziom hałasu</li><li>◆ możliwość łączenia ogniw w stopy</li><li>◆ łatwość rozbudowy</li><li>◆ możliwość pracy ciągłej w miarę doprowadzania paliwa i utleniacza</li></ul>	<p>Wady:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>♣ wysoki koszt katalizatora</li><li>♣ stosunkowo nieduże napięcie z pojedynczej celi ogniwa (<math>U &lt; 1 \text{ V}</math>)</li><li>♣ czas pracy <math>&lt; 40\ 000 \text{ h}</math></li></ul>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

**Kryteria podziału ogniw paliwowych***1. Temperatury pracy:*

- a) niskotemperaturowe ( $25\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- b) średnotemperaturowe ( $100\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- c) wysokotemperaturowe ( $500\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
- d) szczególnie wysokotemperaturowe ( $T > 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

*2. Sposób wykorzystania doprowadzonego paliwa*

- a) bezpośredni (np. wodór gazowy lub ciekły)
- b) pośredni (np. wodór po reformingu z metanolu)

*3. Rodzaj elektrolitu*

- a) alkaliczny (np.. KOH)
- b) kwaśny (np..  $\text{H}_3\text{PO}_4$ )

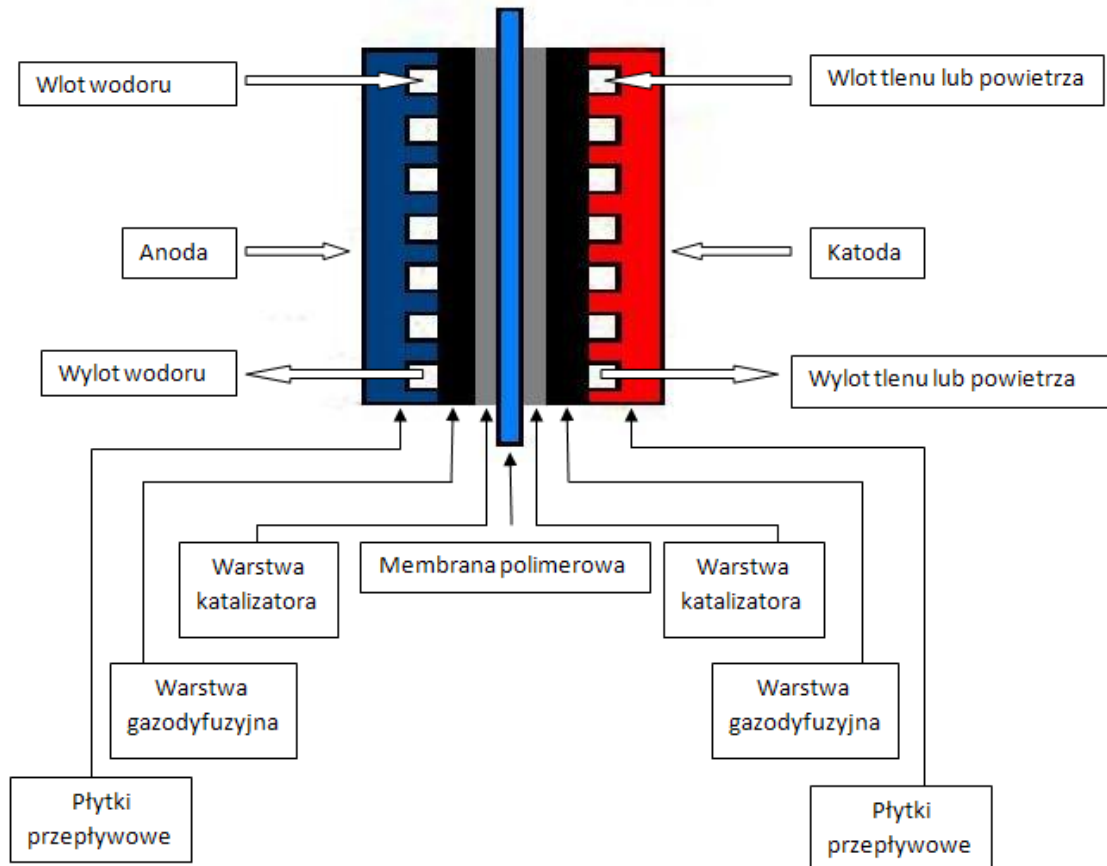
*4. Zakres mocy**5. Zakres uzyskiwanej wydajności/sprawności*

Tabela 1. Zbiorcza charakterystyka ogniw paliwowych

Typ ogniwa	Elektrolit	Paliwo	Temper. zakres pracy [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Zakres mocy]	Sprawność /wydajność	Obszary zastosowań
Alkaliczne <b>AFC</b>	KOH (30 – 50) %	Czysty $\text{H}_2$	60 - 90	Do 12 kW	60 - 70 %	Transport, kosmonautyka łódzie podw.
Polimerowe <b>PEFC</b>	Membrana polimerowa (Nafion – Du Point)	Czysty $\text{H}_2$	50 - 80		40 – 60 %	Transport, kosmonautyka, energetyka
Polimerowe <b>PEMFC</b>	Membrana polimerowa (Nafion – Du Point)	$\text{H}_2$ + reformowany metyl ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	Do 130	Do 250 kW	40 – 45 %	Transport, energetyka
Z kwasem fosforowym <b>PAFC</b>	Stężony $\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2$ , gaz ziemny, biogaz	160 - 220	Do 1 MW	55 %	Małe elektrownie
Ze stopionym węglanem <b>MCFC</b>	Węglany alkaliczne $\text{Li}_2\text{CO}_3$ / $\text{Na}_2\text{CO}_3$	$\text{H}_2$ , gaz ziemny, węglowy biogaz	600 - 800	Do 2 MW	65 %	Elektrownie
Tlenkowo – ceramiczne <b>SOFC</b>	Ceramika tlenkowa $\text{ZrO}_2 / \text{Y}_2\text{O}_3$	$\text{H}_2$ , gaz ziemny, węglowy biogaz	800 - 1000	Do 10 MW	60 – 65 %	Elektrownie

## 2. FIZYCZNE PODSTAWY DZIAŁANIA OGNIWA PALIWOWEGO TYPU PEM

Budowa oraz zasada działania ogniwa z elektrolitem w postaci membrany polimerowej jest przedstawiona na Rys. 1 i 2.



Rys. 1. Schemat budowy ogniwa paliwowego typu PEM (Źródło: P. Bujło „Polimerowe superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC”, Wrocław 2006)

Po obu stronach membrany polimerowej (Rys. 1) umieszczone są elektrody gazodyfuzyjne na które składają się warstwa katalizatora i warstwa gazodyfuzyjna. Membrana i elektrody gazodyfuzyjne nazywane łącznie zestawem elektrodowo-membranowym (MEA) sprasowane są pod ciśnieniem oraz w podwyższonej temperaturze w celu zapewnienia dobrego styku. Zewnętrzną warstwę celi ogniwa stanowią płytki przepływowe w których poprowadzone są kanały umożliwiające doprowadzenie gazów do stref reakcji oraz odprowadzenie powstającej na katodzie wody. Całość układu zamykają elementy uszczelniające konstrukcję i zapobiegające niekontrolowanemu mieszanemu się gazów oraz odprowadzenia elektryczne.

**Membrany polimerowe** mają charakter elektrolitów stałych pracujących w środowisku kwaśnym. Elementami wpływającymi na koszt, budowę i działanie ogniwa są właściwości fizyczne i chemiczne zastosowanego elektrolitu. Aby membrana posiadała właściwości jonowo-przewodzące podstawowym warunkiem jest zwilżanie membrany i utrzymanie odpowiedniego dla niej poziomu wody. Wymóg ten wiąże się z



koniecznością częściowego odprowadzaniem wody, która powstaje nadmiarowo w wyniku łączenia się cząsteczek wodoru z tlenem w czasie pracy ogniwa. Pociąga za sobą również konieczność pracy ogniwa w temperaturze nie przekraczającej temperatury wrzenia wody. Należy przy tym pamiętać, że w temperaturze bliskiej 100 °C może występować stopniowe wysychanie membrany oraz trwałe uszkodzenie mechaniczne polimeru w niej zastosowanego.

**Warstwy gazo-dyfuzyjne** umieszczone po obu stronach membrany polimerowej zapewniają swobodny dostęp gazów wykorzystywanych do reakcji zachodzących w ogniwie paliwowym oraz wpływają na równomierne ich rozprowadzanie po całej powierzchni membrany. Warstwa gazo-dyfuzyjna po stronie katody musi dodatkowo umożliwiać odprowadzenie wody, będącej produktem ubocznym końcowej reakcji. W przypadku zastosowania systemu nawilżania membrany za pośrednictwem gazów redukcyjnych warstwa po stronie anody także powinna dobrze przepuszczać wodę. Brak odprowadzania wody może doprowadzić do jej nadmiernego gromadzenia się i zablokowania dostępu tlenu i wodoru do membrany, wpływając niekorzystnie na pracę ogniwa. Podstawowe wymagania jakie stawiane są warstwom gazo-dyfuzyjnym to:

- łatwa dyfuzja gazów zarówno na powierzchni jak i w objętości
- duża porowatość
- mała rezystancja
- duża wytrzymałość mechaniczna
- dobra przepuszczalność wody

Obecnie najczęściej stosuje się jako materiał gazo-dyfuzyjny włókninę węglową lub papier węglowy. Niekiedy stosuje się jeszcze dodatkowo obróbkę materiałem hydrofobowym, polegającą na impregnacji materiału. Najważniejszymi parametrami świadczącymi o jakości materiału gazo-dyfuzyjnego są: grubość warstwy, zawartość czynnika hydrofobowego, przepuszczalność gazów i rezystancja elektryczna.

**Warstwa katalizatora** umożliwia pracę ogniwa w niskich temperaturach. Najczęściej warstwa katalizatora jest sprasowana bezpośrednio z membraną do której przylega warstwa gazo-dyfuzyjna zapewniająca kontakt elektryczny. Obecnie najczęściej stosowanym katalizatorem w ogniwach paliwowych typu PEM spośród metali szlachetnych jest platyna. We współczesnych ogniwach paliwowych typu PEM zawartość katalizatora jest rzędu (1- 5) kg/m<sup>2</sup>. Ze względu na swą cenę platyna w dużej mierze warunkuje cenę ostateczną ogniwa paliwowego. Cały czas trwają prace nad poszukiwaniem taniego zamiennika platyny, oraz rozwijane są metody zwiększenia wydajności poprzez specjalne nanoszenie metodą sitodruku lub natryskiwania.

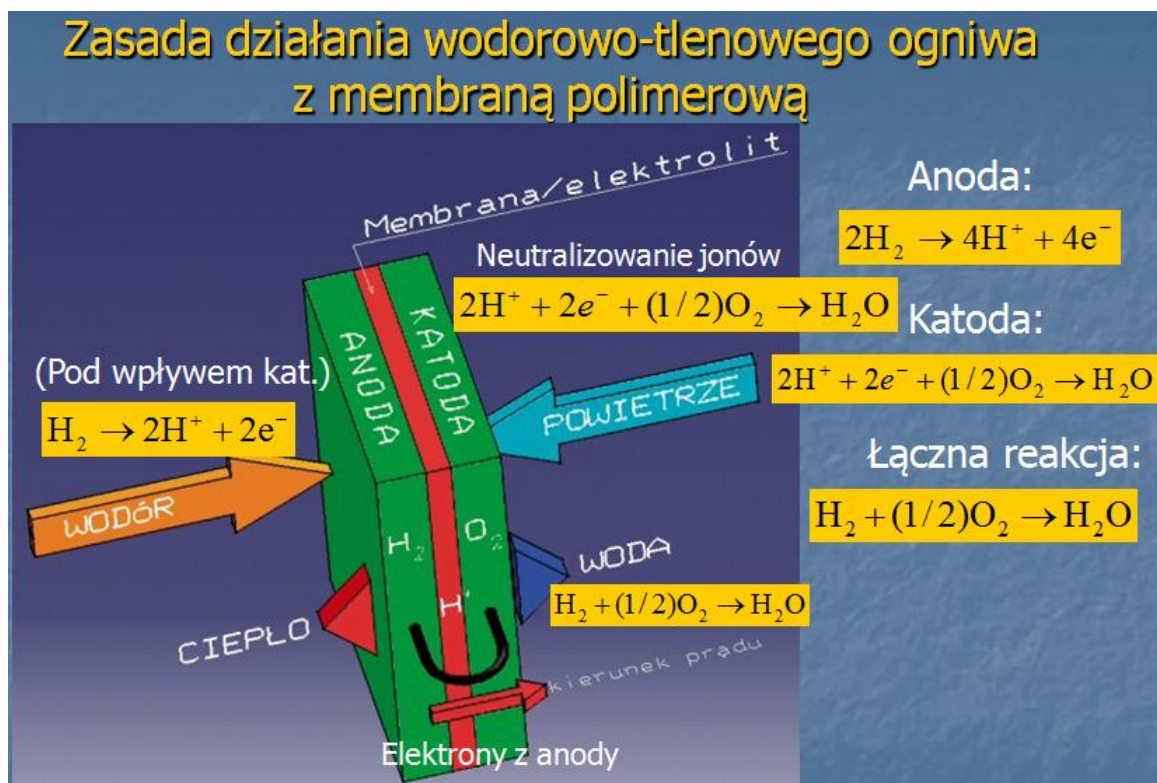
**Płytki bipolarne** są to płytki separacyjne stosowane przy szeregowym łączeniu ogniw paliwowych w stos w celu uzyskania odpowiedniej mocy do praktycznego zastosowania tego stosu. Płytki te montowane są pomiędzy poszczególnymi celami łącząc elektrody pojedynczych cel i zapewniając separację gazów reakcyjnych. W przypadku łączenia ogniw w stos zachodzi konieczność wykonywania kanałów

doprowadzających gazy po obu stronach. Materiał wykorzystywany do produkcji płytek powinien się charakteryzować:

- wysoką przewodnością elektryczną
- wysoką przewodnością cieplną
- brakiem przepuszczalności gazów
- dużą wytrzymałością mechaniczną
- odpornością na korozję w atmosferze redukującej i utleniającej
- łatwością obróbki
- małą masą
- niskimi kosztami produkcji

Pożądanymi właściwościami do produkcji płytek cechuje się grafit. Wymaga on jednak impregnacji w celu zlikwidowania porowatości powierzchniowej. Ze względu na kruchość grafitu jego zamiennikiem może być stal nierdzewna jednak istnieje wówczas konieczność zabezpieczenia jej przed korozją

Zasada działania ogniwa paliwowego typu PEM (Rys. 2) opiera się na jego konstrukcji złożonej z dwóch elektrod - anody i katody - wykonanych jako porowate struktury budowlane z proszku węglowego połączonego za pomocą lepiszcza z katalizatorem np. platyną, palladem czy niklem pomiędzy którymi umieszczony jest elektrolit w postaci membrany.



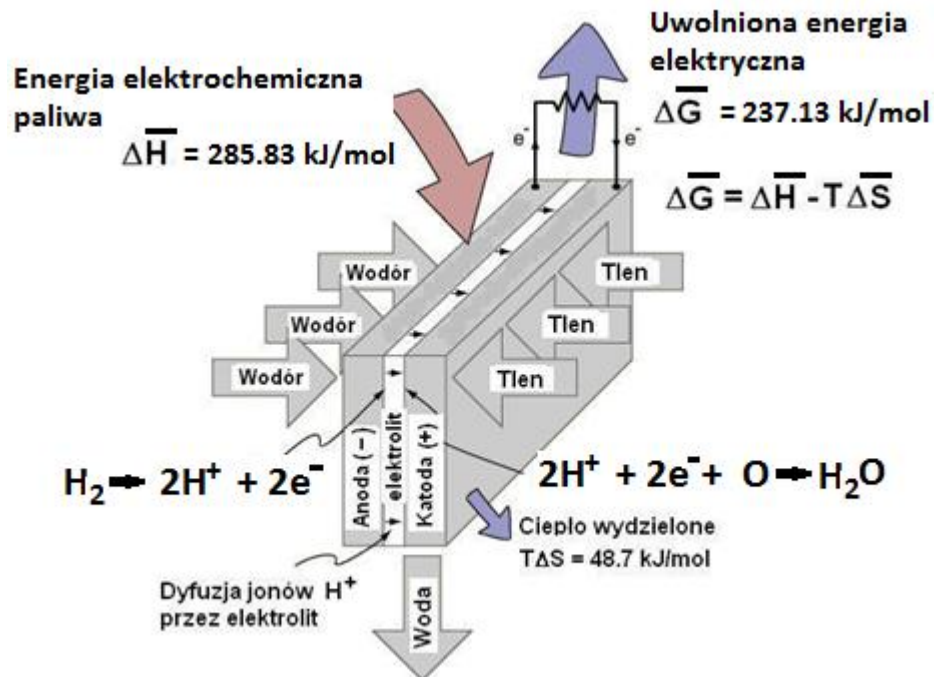
Rys. 2. Zasada działania ogniwa z elektrolitem w postaci membrany polimerowej



Dostarczony gazowy wodór dyfunduje w głąb anody gdzie pod wpływem katalizatora rozpada się zgodnie z reakcją (anoda). Zjonizowane dodatnio jony wodoru (protony  $H^+$ ) przemieszczają się przez membranę do katody. Zadaniem membrany jest przepuszczanie protonów i blokada elektronów. Elektrony zbierane z anody przedostają się przez zewnętrzny obwód do katody gdzie po napotkaniu protonów powodują neutralizację dodatnich jonów wodorowych zgodnie z reakcją (katoda). W wyniku utleniania wodoru powstaje woda co obrazuje reakcja łączna. Dostarczony gazowy wodór dyfunduje w głąb anody gdzie pod wpływem katalizatora rozpada się zgodnie z reakcją (anoda). Zjonizowane dodatnio jony wodoru przemieszczają się przez membranę do katody. Zadaniem membrany jest przepuszczanie protonów i blokada elektronów. Elektrony zbierane z anody przedostają się przez zewnętrzny obwód do katody gdzie po napotkaniu protonów powodują neutralizację dodatnich jonów wodorowych zgodnie z reakcją (katoda). W wyniku utleniania wodoru (reakcja łączna) powstają jako produkty uboczne woda oraz ciepło.

### 3. TERMODYNAMIKA OGNIWA PALIWOWEGO TYPU PEM

Źródłem energii elektrycznej produkowanej przez ogniwo paliwowe jest energia chemiczna substratów zgromadzona w postaci chemicznej w gazach reakcyjnych (tlenie i wodorze) doprowadzanych do anody i katody. Teoretyczny bilans energetyczny sporządzony dla ogniwa paliwowego typu PEM jest przedstawiony na Rys. 3.



Rys. 3. Sposób zasilania ogniwa paliwowego typu PEM wraz z wybranymi elementami bilansu energetycznego

W celu sporządzenia bilansu energetycznego dla ogniwa paliwowego typu PEM należy skorzystać z pierwszej zasady termodynamiki dla układu zamkniętego. W odniesieniu do 1 mola substancji mamy

$$\Delta\bar{U} = \bar{Q} - \bar{L} \quad (1)$$

Po wprowadzeniu entalpii molowej

$$\bar{H} = \bar{U} + p\bar{V} \quad (2)$$

otrzymujemy w warunkach izobarycznych wyrażenie na jej przyrost w postaci:

$$\Delta\bar{H} = \Delta\bar{H}_{prod} - \Delta\bar{H}_{sub} = \Delta\bar{U} + p\Delta\bar{V} = \bar{Q} - \bar{L} + p\Delta\bar{V} \quad (3)$$

gdzie w równaniu (3) został uwzględniony fakt, że przyrost entalpii molowej układu  $\Delta\bar{H}$  jest równy różnicy przyrostów entalpii molowych produktów reakcji  $\Delta\bar{H}_{prod}$  oraz substratów  $\Delta\bar{H}_{sub}$ .

Ponieważ można założyć, że reakcje chemiczne zachodzące w ogniwie podczas jego pracy przebiegają w warunkach izotermiczno – izobarycznych to wygodnie jest wprowadzić potencjał termodynamiczny w postaci swobodnej entalpii molowej  $\bar{G}$  zdefiniowany jako

$$\bar{G} = \bar{H} - T \cdot \bar{S} \quad (4)$$

Posługując się teraz swobodną entalpią molową można wyrazić ilość energii uwalnianej do otoczenia w wyniku zachodzenia reakcji chemicznych w ogniwie w postaci

$$\Delta\bar{G} = \Delta(\bar{H} - T \cdot \bar{S}) = \Delta\bar{H} - T \cdot \Delta\bar{S} = \Delta\bar{G}_{prod} - \Delta\bar{G}_{sub} \quad (5)$$

gdzie dla reakcji zachodzącej w ogniwie po stronie katody zgodnie z (6)



możemy zauważyć, że

$$\Delta\bar{G}_{prod} = (\Delta\bar{G})_{\text{H}_2\text{O}}, \quad \Delta\bar{G}_{sub} = (\Delta\bar{G})_{\text{H}_2} + \frac{1}{2}(\Delta\bar{G})_{\text{O}_2} \quad (7)$$

Podstawiając we wzorze (5) za  $\Delta\bar{H}$  wyrażenie (3) dostajemy

$$\Delta\bar{G} = \Delta\bar{H} - T \cdot \Delta\bar{S} = \bar{Q} - \bar{L} + p\Delta\bar{V} - T \cdot \Delta\bar{S} \quad (8)$$

Na pracę ogniwa  $\bar{L} = \bar{L}_{el} + \bar{L}_{ex}$  składają się:

- praca prądu elektrycznego  $\bar{L}_{el}$  pozyskiwanego z ogniwa :

$$\bar{L}_{el} = n \cdot N_A \cdot e \cdot (V_K - V_A) = n \cdot F \cdot E \quad (9a)$$

- praca ekspansji  $\bar{L}_{ex}$  ładunków elektrycznych wytwarzających różnicę potencjałów elektrod ogniwa :



## LABORATORIUM TERMODYNAMIKI

Ogniwo paliwowe (opracował J. Zmywaczyk, D. Jeżewski)

$$\bar{L}_{ex} = p\Delta\bar{V} \quad (9b)$$

Stąd po podstawieniu (9a) i (9b) do (8) otrzymujemy

$$\Delta\bar{G} = \bar{Q} - n \cdot F \cdot E - p\Delta\bar{V} + p\Delta\bar{V} - T \cdot \Delta\bar{S} = \bar{Q} - n \cdot F \cdot E - T \cdot \Delta\bar{S} \quad (10)$$

gdzie:

$n$  – liczba elektronów powstających w pojedynczej reakcji (u nas  $n = 2$ , (6))

$F$  – stała Faradaya, ładunek jednego mola elektronów ( $F=96485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

$N_A$  – stała Avogadra ( $N_A = 6,02214 \cdot 10^{23}$ )

$V_K$  – potencjał katody

$V_A$  – potencjał anody

$E = (V_K - V_A)$  – napięcie na elektrodach pojedynczej celi ogniwa

$\bar{S}$  – entropia molowa

Jeżeli w równaniu (10) założymy odwracalność procesów, czyli  $\bar{Q} = T \cdot \Delta\bar{S}$ , to przybierze ono postać

$$\Delta\bar{G} = -n \cdot F \cdot E^0 \quad (11)$$

z którego wynika wzór na odwracalny potencjał ogniwa

$$E^0 = -\frac{\Delta\bar{G}}{n \cdot F} \quad (12)$$

Potencjał odwracalny ogniwa paliwowego  $E^0$  jest zależny od temperatury. Zależność tę dla reakcji chemicznej przebiegającej zgodnie z równaniem (6) przedstawia tabela 2.

Tabela 2. Zależność odwracalnego potencjału ogniwa paliwowego  $E^0$  od temperatury i stanu skupienia produktów reakcji (wody) powstających w reakcji (6).

Potencjał odwracalny $E^0$ , [V]	Zmiana swobodnej entalpii molowej $(\Delta\bar{G})_{\text{H}_2\text{O}}$ , [kJ/mol]	Temperatura [K]	Stan skupienia wody
1,23	-237,2	298,15	ciecz
1,18	-228,2	353,15	ciecz
1,17	-226,1	353,15	gaz
1,17	-225,2	373,15	gaz

Przykładowo, dla wody w stanie ciekłym w warunkach standardowych ( $T = 298,15 \text{ K}$ ,  $p^0 = 101325 \text{ Pa}$ ) można odczytać z tabeli 2 wartość zmiany swobodnej entalpii



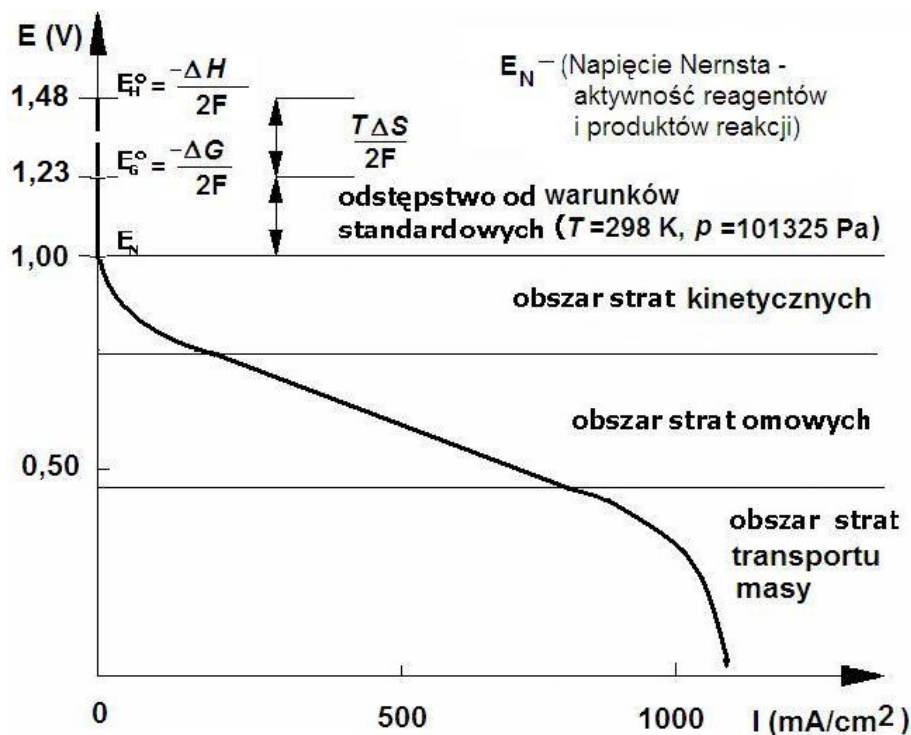
molowej wody równą  $(\Delta\bar{G})_{\text{H}_2\text{O}} = -237,2 \text{ kJ/mol}$  (znak „-” oznacza, że układ oddaje ciepło do otoczenia). Zatem, ze wzoru (12) otrzymujemy

$$E^0 = -\frac{-237200 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol}} = 1,2292 \text{ V} \approx 1,23 \text{ V} \quad (13)$$

### 3.1. Warunki pracy ogniwa paliwowego typu PEM

Napięcie  $U$  jakie można uzyskać z pojedynczej celi ogniwa paliwowego typu PEM jest mniejsze od odwracalnego potencjału ogniwa wynoszącego w warunkach standardowych  $E^0 = 1,23 \text{ V}$ . Zmniejszenie wartości napięcia w ogniwie pracującym w warunkach rzeczywistych do wartości  $U < 1\text{V}$  jest związane z określonymi stratami występującymi w układzie. Straty te związane są z :

- nadnapięciem aktywacyjnym
- stratami omowymi
- nadnapięciem dyfuzyjnym



Rys. 4. Charakterystyka prądowo – napięciowa ogniwa paliwowego z uwzględnieniem strat

Analizując rzeczywistą charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa paliwowego typu PEM (Rys. 4) można wyróżnić na niej trzy obszary:

- obszar I zwany obszarem strat kinetycznych, w którym występuje dość gwałtowny spadek napięcia. Obszar ten związany jest ze stratami

aktywacyjnymi, polegających na powolności procesów zachodzących na elektrodach ogniwa:  $U \sim \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ ;

- obszar II zwany obszarem strat omowych, w którym wzrost gęstości prądu generowanego przez ogniwo jest proporcjonalny do spadku napięcia (zakres liniowy charakterystyki). Na straty omowe w tym obszarze ma wpływ rezystancja elementów ogniwa oraz użytego w nim elektrolitu (membrany):  $U \sim I$ ;

- obszar III zwany obszarem strat transportu masy charakteryzuje się dość dużym spadkiem napięcia na elektrodach ogniwa. Jest to związane z spowolnieniem szybkości dyfuzji reagentów i produktów reakcji przez warstwy gazo-dyfuzyjne:

$$U \sim T \cdot \ln\left(1 - \frac{I}{I_{\max}}\right).$$

Minimalizację strat pracy ogniwa przeprowadza się poprzez optymalizację warunków jego pracy oraz przez odpowiedni dobór materiałów, co wpływa także na zmniejszenie kosztów wytwarzania energii za pomocą ogniwa paliwowego. Do najważniejszych czynników wpływających na warunki pracy ogniwa należą:

- temperatura pracy ogniwa
- temperatura gazów reakcyjnych
- wilgotność gazów reakcyjnych
- prędkość przepływu

### 3.2. Sprawność elektrolizera i ogniwa paliwowego

Sprawność elektrolizera oraz ogniwa paliwowego pracującego w zestawie czystej energii firmy PHYWE wiąże się z określeniem ilości energii elektrycznej  $L_{el} = U \cdot I \cdot t$  (praca prądu elektrycznego) oraz energii  $E_{H_2}$  zawartej w wytwarzanym lub zużywanym wodorze, równej entalpii wynoszącej (w odniesieniu do 1 mola wodoru)  $E_{H_2} = \Delta\bar{H}_{H_2} = 285840 \text{ J/mol}$ . Tak więc sprawność energetyczna elektrolizera dana jest wzorem

$$\eta_{\text{energ,el}} = \frac{E_{H_2}}{L_{el}} = \frac{n \cdot \Delta\bar{H}_{H_2}}{U \cdot I \cdot t} \quad (14)$$

natomiast sprawność energetyczna ogniwa paliwowego wynosi

$$\eta_{\text{energ,ogn}} = \frac{L_{el}}{E_{H_2}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{n \cdot \Delta\bar{H}_{H_2}} \quad (15)$$

Do określenia jakości pracy elektrolizera wygodnie jest wprowadzić sprawność elektrolityczną  $\eta_{el, el}$  rozumianą jako stosunek objętości wodoru  $V_{H_2}$  rzeczywiście

odebranego z elektrolizera w czasie  $t$  do objętości jaka teoretycznie mogłaby powstać w tym czasie  $V_{H_2,teor}$ , czyli

$$\eta_{el,el} = \frac{V_{H_2}}{V_{H_2,teor}} \quad (16)$$

W celu uzyskania praktycznych zależności opisujących efektywność elektrolizera oraz ogniwa paliwowego należy skorzystać z prawa elektrolizy Faradaya oraz z równania stanu gazów doskonałych.

Zgodnie z prawem elektrolizy Faradaya masa substancji  $m$  wydzielona w elektrolizerze jest proporcjonalna do ładunku  $q$ , który przepłynął przez elektrolit ( $m = k \cdot q$ ). Po wprowadzeniu stałej Faradaya  $F$  prawo to można zapisać w postaci:

$$m = \frac{q \cdot M}{F \cdot z} \quad (17a)$$

gdzie  $q$  jest całkowitym ładunkiem jonów,  $z$  oznacza liczbę elektronów otrzymanych z jednej molekuly (w naszym przypadku  $z = 2$ ),  $M$  jest masą molową substancji wydzielonej w trakcie elektrolizy.

Uwzględniając, że całkowity ładunek jonów przepływający w czasie  $t$  przez elektrolit wynosi  $q = I \cdot t$ , gdzie  $I$  jest natężeniem prądu, oraz definiując liczbę moli  $n$  wydzielonej substancji jako  $n = m/M$  można równanie (3.15) przekształcić do postaci

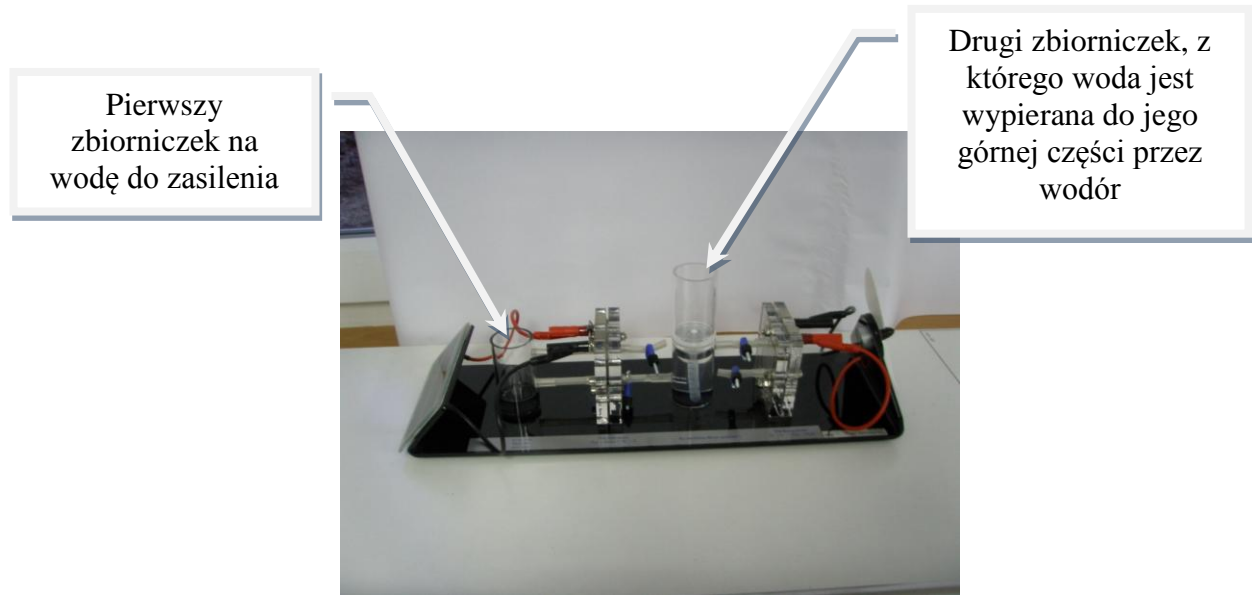
$$n = \frac{I \cdot t}{F \cdot z} \quad (17b)$$

Korzystając teraz z równania stanu Clapeyrona można wyznaczyć objętość  $V$  teoretycznie wydzielonego w czasie  $t$  wodoru jako

$$pV = n\bar{R}T \Rightarrow V = \frac{n\bar{R}T}{p} = \frac{I \cdot t}{F \cdot z} \cdot \frac{\bar{R}T}{p} = \frac{\bar{R} \cdot T \cdot I \cdot t}{z \cdot p \cdot F} \quad (18)$$

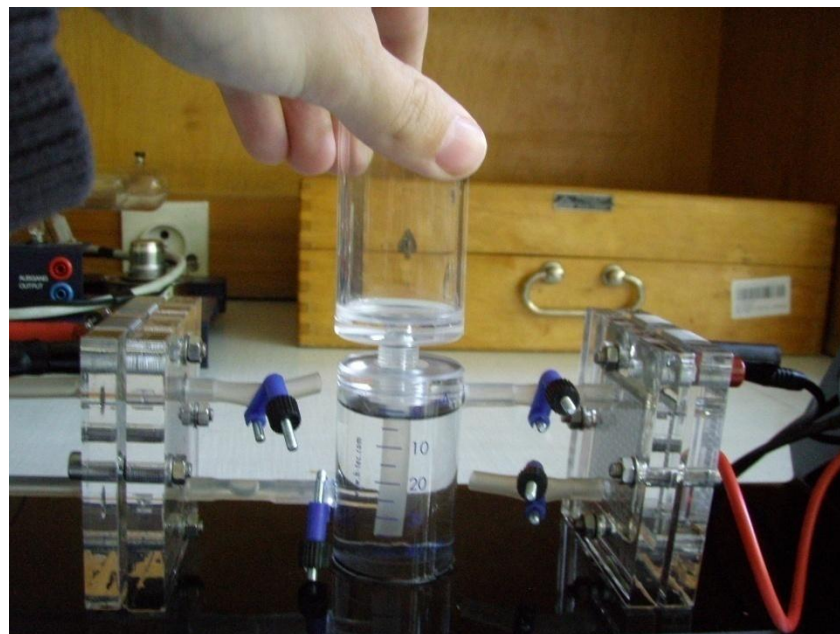
#### 4. PRZYGOTOWANIE ZESTAWU CZYSTEJ ENERGII DO ĆWICZENIA

Przebieg ćwiczenia laboratoryjnego należy rozpocząć od właściwego przygotowania zestawu do pracy i połączenia z aparaturą pomiarową. Pierwszą czynnością wykonywaną podczas przygotowania zestawu jest nalanie do dwóch zbiorniczków wody destylowanej (drugi zbiorniczek napełniamy po odkręceniu jego górnej części), zaznaczonych na Fot. 1:



Fot. 1. Zbiorniczki do napełnianie wodą destylowaną.

Następnie należy dokręcić górną część górnego zbiorniczka drugiego (Fot. 2). Został on tak skonstruowany aby woda destylowana była wypierana przez wodór do jego górnej części (dokręcanej), a tym samym zapobiegała jego ekspansji gazu do otoczenia.

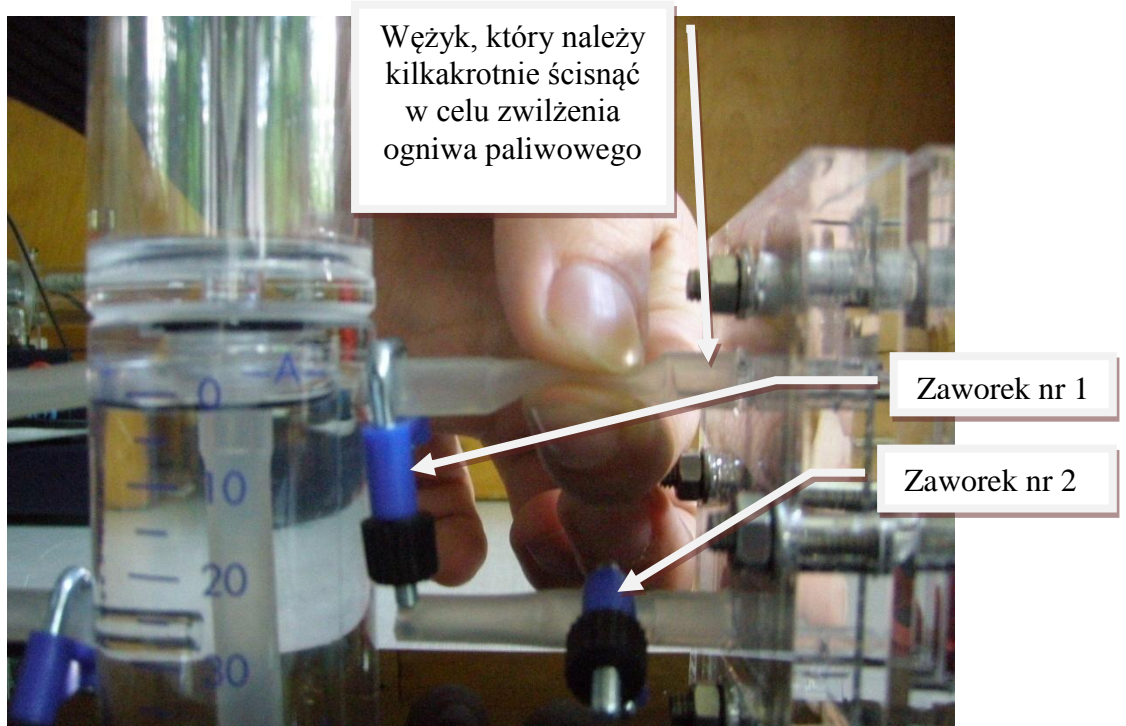


Fot. 2. Dokręcenie górnej części zbiorniczka.

Po napełnieniu odpowiednich elementów zestawu wodą destylowaną należy zwilżyć ogniwo paliwowe. Proces ten można to przeprowadzić na dwa sposoby:

- pierwszy sposób polega na kilkukrotnym naciśnięciu przewodu zainstalowanego pomiędzy łączącego zbiorniczkiem na wodór a ogniwem paliwowym, kilkukrotne naciśnięcie przewodu powinno wymusić przepływ

niewielkiej ilości wody przez ogniwo paliwowe. Należy pamiętać, aby zwilżanie przeprowadzać przy odkręconych zaworkach numer 1 i 2, jak na Fot 3:



**Fot. 3.** Elementy do pozwalające na zwilżenie ogniwa.

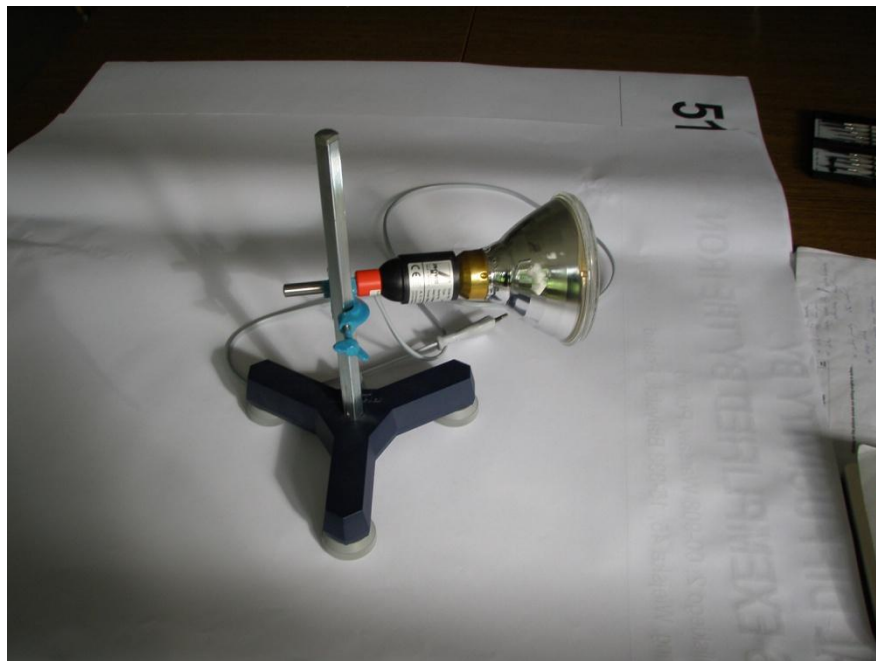
- drugi sposób polega na wprowadzeniu do wężycy na którym jest założony zaworek numer 2 strzykawki napełnionej wodą destylowaną i wstrzyknięciu niewielkiej ilości wody destylowanej, w wyniku czego nastąpi jej przepływ przez ogniwo paliwowe. Zaleca się również aby przytrzymać palcami wężyc na końcówce strzykawki, jak pokazano na Fot. 4. Taki sposób pozwala na zwilżenie całej powierzchni membrany ogniwa paliwowego i jest on uważany za zalecany. Należy pamiętać aby podczas zwilżania ogniwa zaworki numer 1 i 2 były odkręcone.





**Fot. 4.** Zwilżanie ogniwa paliwowego.

Po wykonaniu tych czynności należy wyprodukować ok.  $15 \text{ cm}^3$  wodoru przy zakręconych zaworkach numer 1 i 2. Do tego celu należy wykorzystać lampę halogenową marki PHYWE zamieszczoną na Fot. 5:

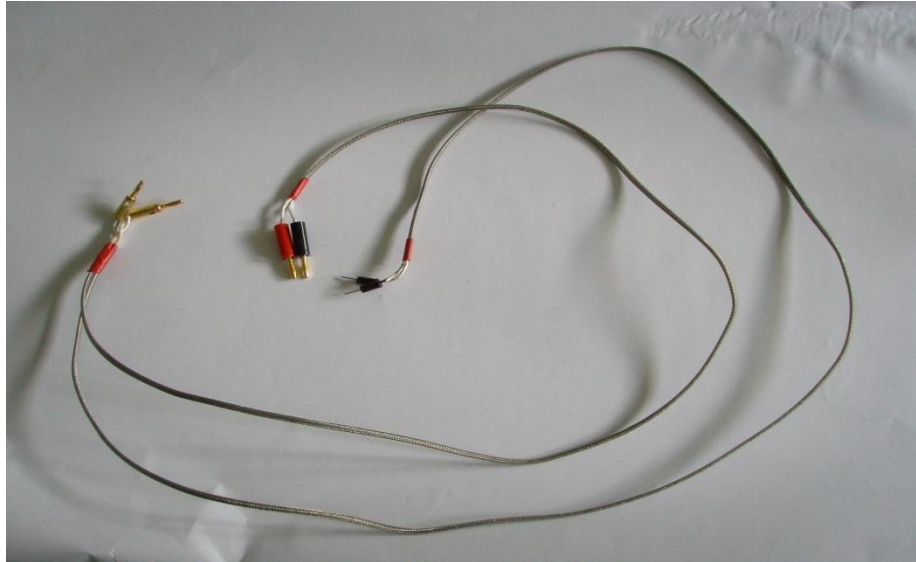


**Fot. 5.** Lampa halogenowa 70 [W] wchodząca w skład zestawu.

Aby ogniwo paliwowe mogło pracować należy usunąć z niego resztę wody wykorzystanej do jego zwilżenia. W tym celu należy kolejno odkręcić zaworek numer 1, a następnie ostrożnie odkręcać zaworek numer 2. Reszta wody z ogniwa paliwowego zostanie usunięta przez przewód, na którym znajduje się zaworek numer 2. Należy zwracać przy tym uwagę aby poziom wody w zbiorniczku na wodór nie podniósł się powyżej podziałki oznaczonej jako  $0 \text{ [cm}^3]$ , w przeciwnym wypadku będzie konieczne

ponowne usunięcie wody z ogniwa paliwowego. Po wypuszczeniu reszty wody zakręcamy zaworki, najpierw numer 2 następnie numer 1.

Po odpowiednim przygotowaniu zestawu należy podpiąć do niego układ pomiarowy. Do tego celu zostały wykonane dwa przewody o oznaczeniu numer 1 i 2 widoczne na Fot. 6-7.

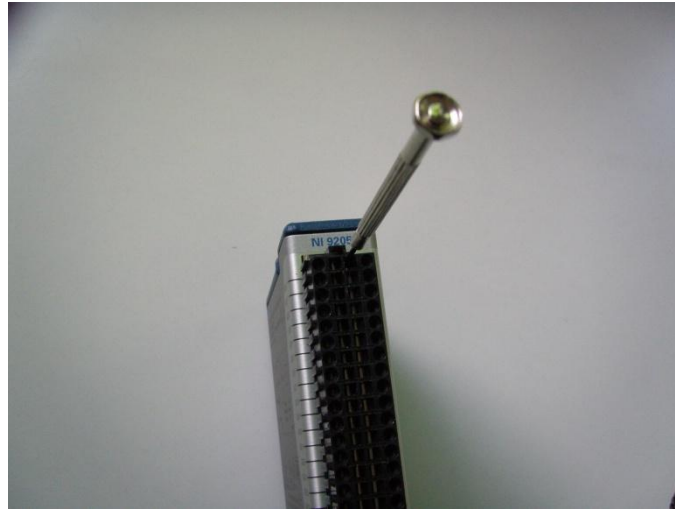


**Fot. 6.** Przewód numer 1.

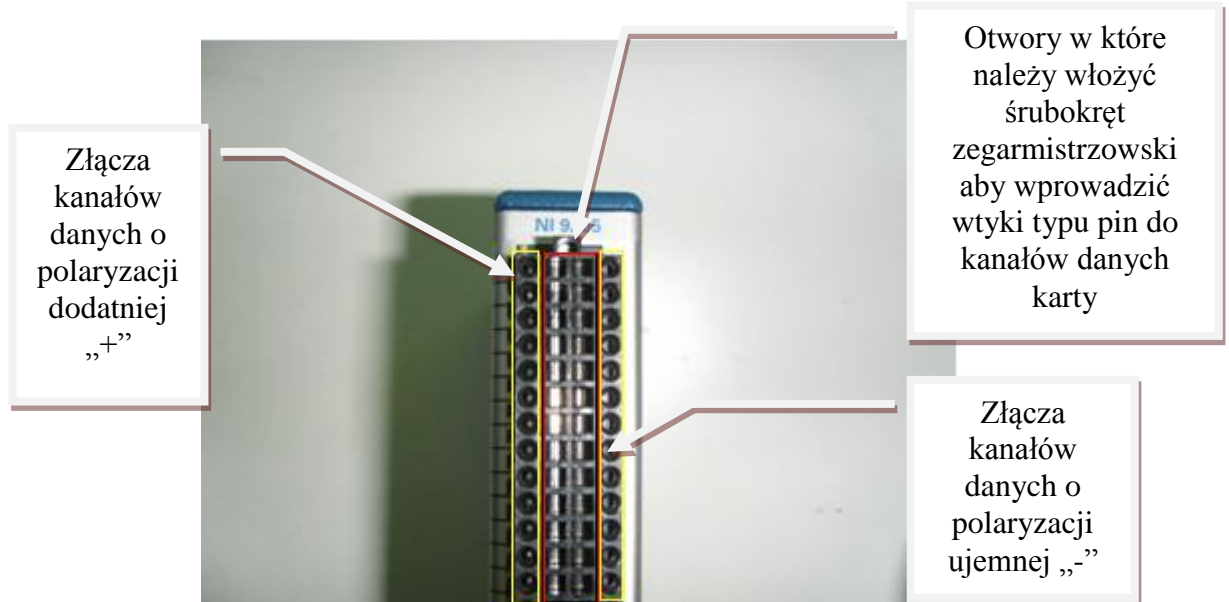


**Fot. 7.** Przewód numer 2.

Pokazane wyżej przewody należy podłączyć do karty pomiarowej NI 9205 za pomocą specjalnego śrubokręta zegarmistrzowskiego, pokazanego na Fot. 7 , który należy wprowadzić w odpowiedni otwór aby spowodować odgięcie dwóch wewnętrznych blaszek zaślepiających gniazda do podpięcia przewodów Fot. 9.

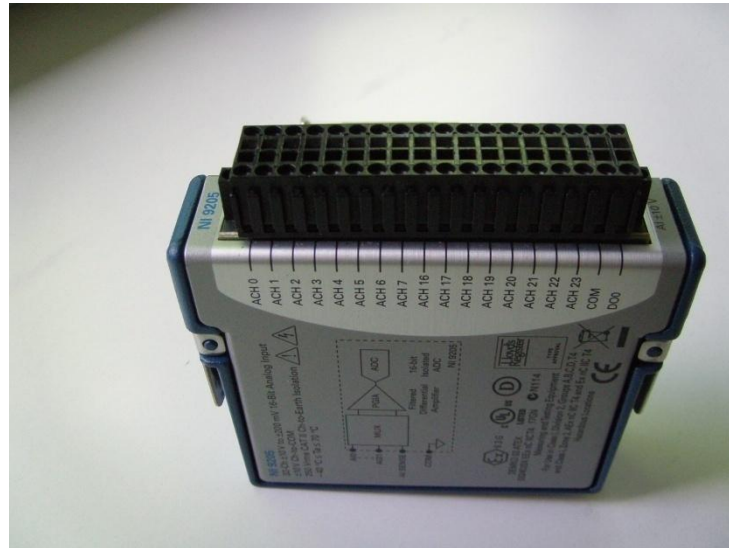


Fot. 8. Śrubokręt zegarmistrzowski do wprowadzenia pinów.



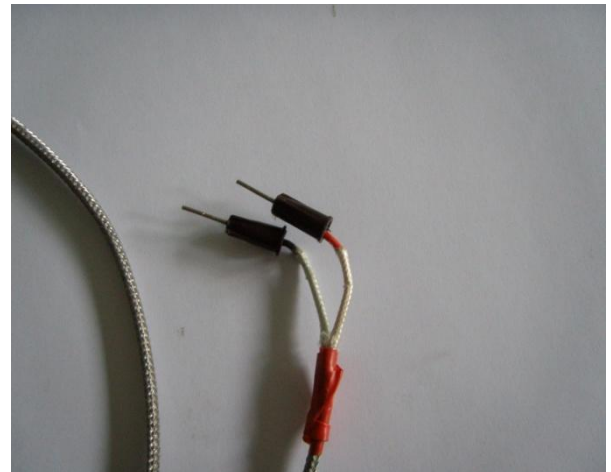
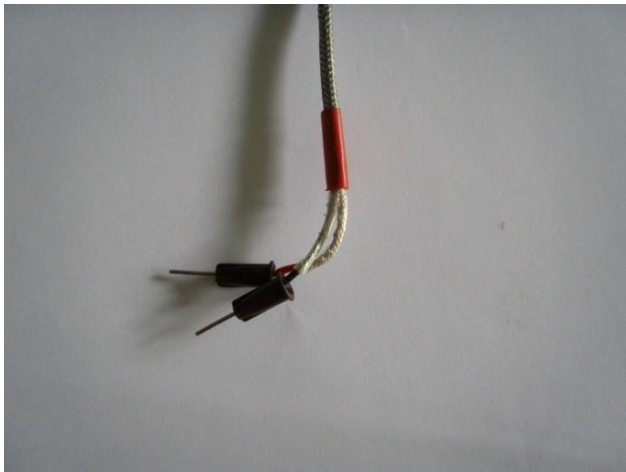
Fot. 9. Widok złącz karty 9205.

Kanały w karcie pomiarowej NI 9205 są numerowane kolejno od 0 do 7 i następnie od 16 do 23 licząc od góry, jak pokazano na Fot. 10:



**Fot. 10.** Oznaczenie kanałów karty 9205.

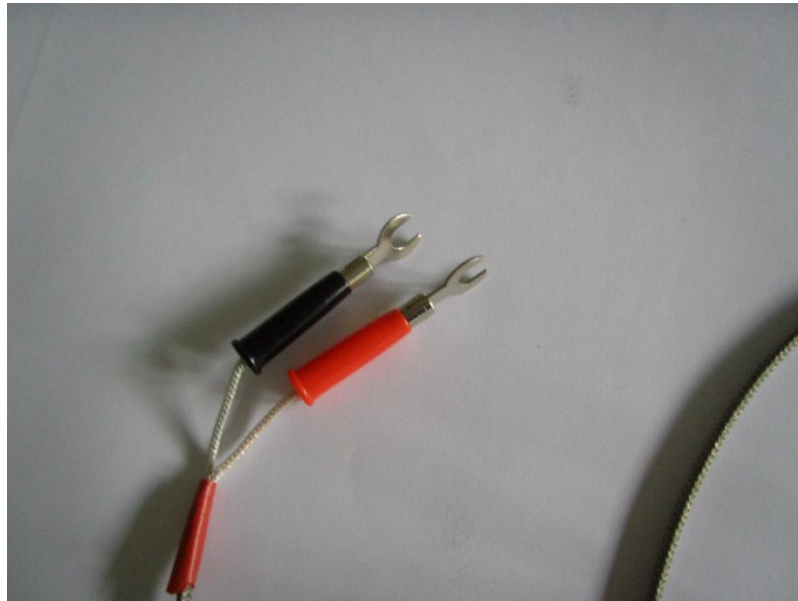
Programy wykorzystywane w ćwiczeniu zostały tak skonstruowane, że przewód 1 musi być wpięty w kanał oznaczony jako ACH 0, natomiast przewód numer 2 do kanału oznaczonego jako ACH 2. Do wpięcia w kartę przewodów 1 i 2 należy wykorzystać końce wyposażone w cienkie wtyczki typu pin pokazane na Fot. 11. Aby nie uszkodzić układu pomiarowego zaleca się aby w celu wpięcia złączy typu PIN do karty pomiarowej wyjmować ją ze stacji dokującej Ni cDAQ – 9172:



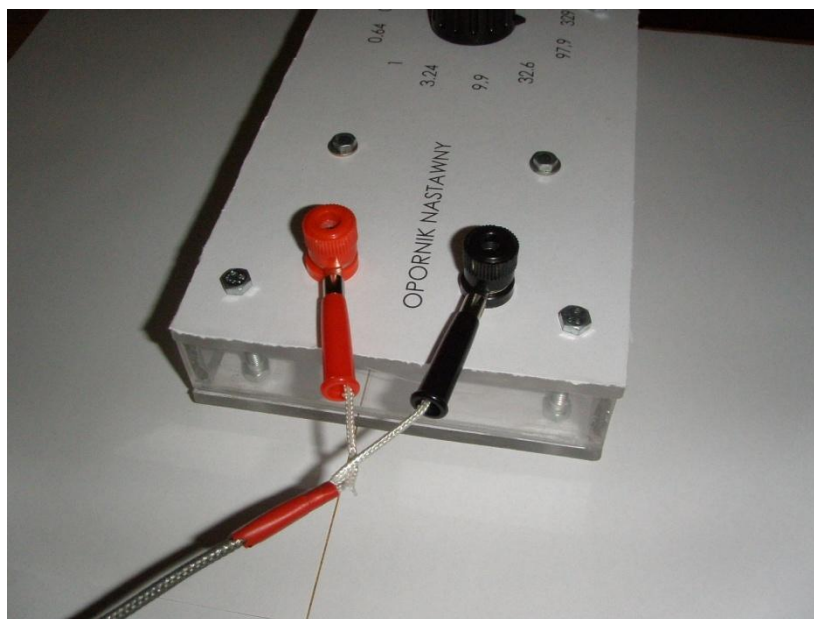
**Fot. 11.** Złącza typu pin z lewej w przewodzie nr 1 i z prawej w przewodzie nr 2.

Następnie przewód numer 2 należy podłączyć do opornika nastawnego za pomocą złączy widelkowych (Fot. 12) dokręcanych za pomocą gwintowanej nakrętki gniazdz laboratoryjnych umieszczonych w obudowie opornika nastawnego (Fot. 13):





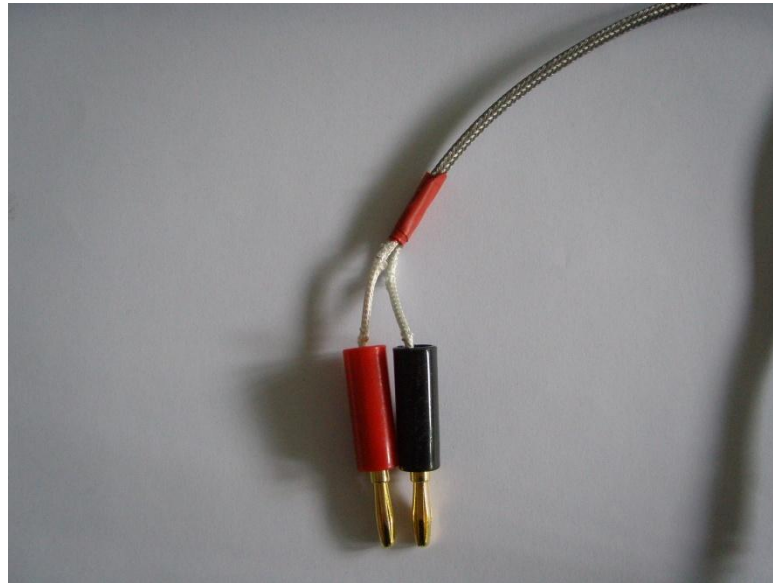
**Fot. 12.** Wtyki laboratoryjne widelkowe podłączane do opornika nastawnego.



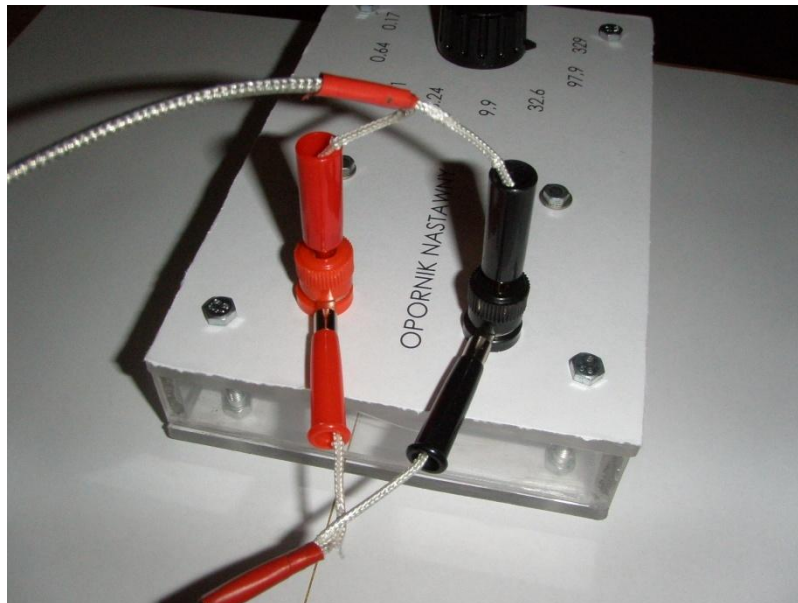
**Fot. 13.** podłączenie przewodu numer 2 do opornika nastawnego.

Od góry do gniazd opornika należy podłączyć końcówki typu banan plastikowymi zabezpieczeniami (Fot. 14), sposób podłączenia pokazano na Fot. 15:





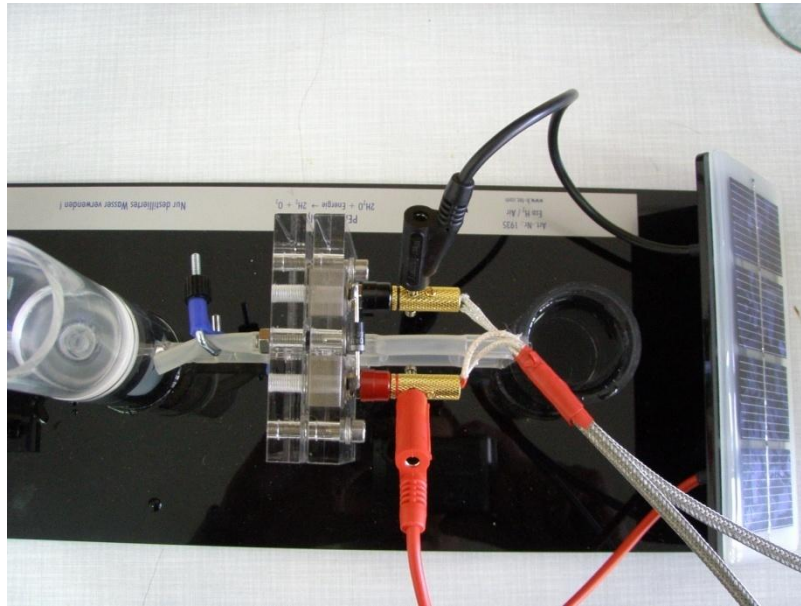
**Fot. 14.** Wtyki laboratoryjne typu banan.



**Fot. 15.** Podłączenie przewodu numer 1 i numer 2 do opornika nastawnego.

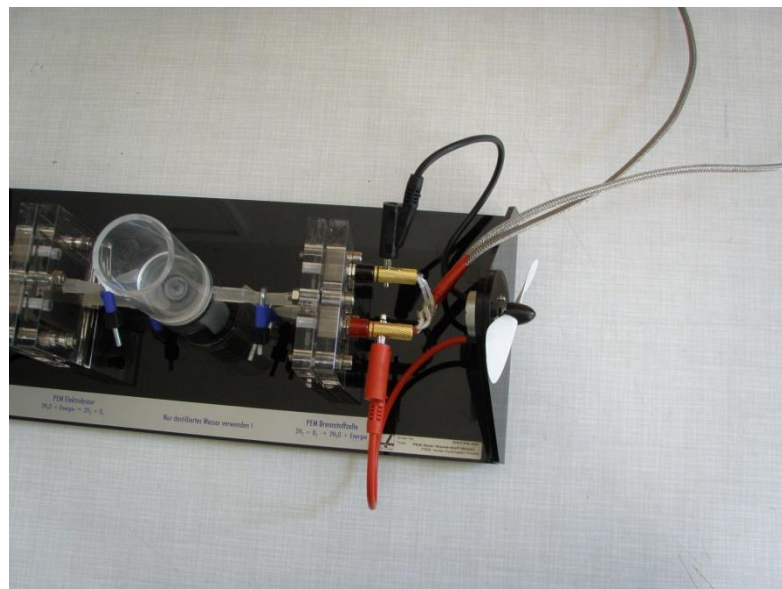
Wtyki połączane przewodu numer 1 podłączamy w dwóch niżej opisanych konfiguracjach:

- konfiguracja pierwsza wykorzystywana do badania ogniwa fotowoltaicznego i elektrolizera polega na tym, że odłączamy przewody zasilające od elektrolizera, podłączając na ich miejsce połączane końcówki przewodu numer 1, a przewody zasilające do tych przewodów w ich boczne otwory, jak pokazano na Fot.16:



**Fot. 16.** Konfiguracja podłączenia numer 1.

- konfiguracji numer 2, polegającej na odłączeniu od ogniwa paliwowego przewodów zasilających silniczek ze śmigłem oraz podłączeniu na ich miejsce końcówek pozłacanych przewodu numer 1, a następnie podłączeniu do nich przewodów zasilających silnik, jak na Fot. 17.



**Fot. 17.** Konfiguracja numer 2.

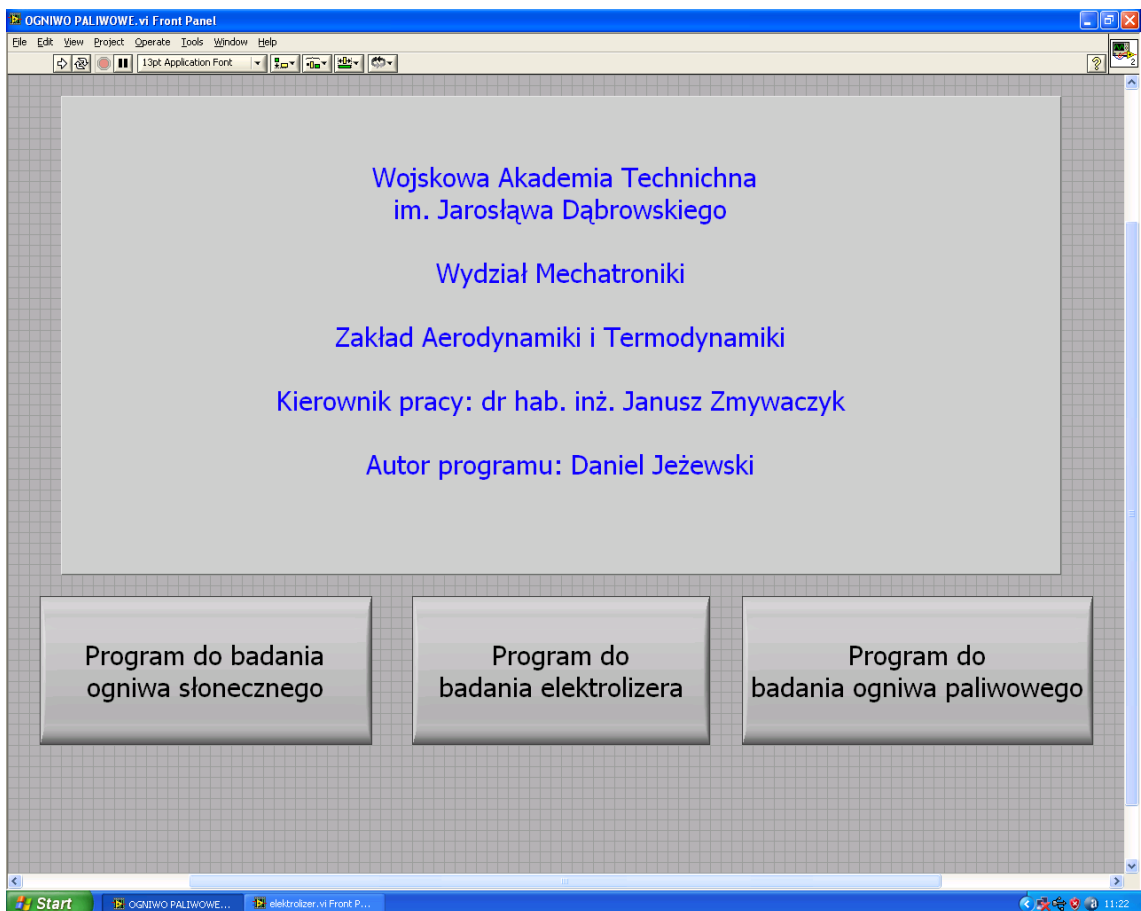
#### 4.1. Przebieg pomiarów

Przebieg pomiarów należy rozpocząć od ogniwa fotowoltaicznego, następnie powinien być zbadany elektrolizer oraz na końcu ogniwo paliwowe. Pomiar przeprowadzane za pomocą programów napisanych w środowisku LabVIEW, użytkownik rozpoczyna pracę z programami przez dwukrotne kliknięcie ikony panelu głównego znajdującej się na pulpicie:



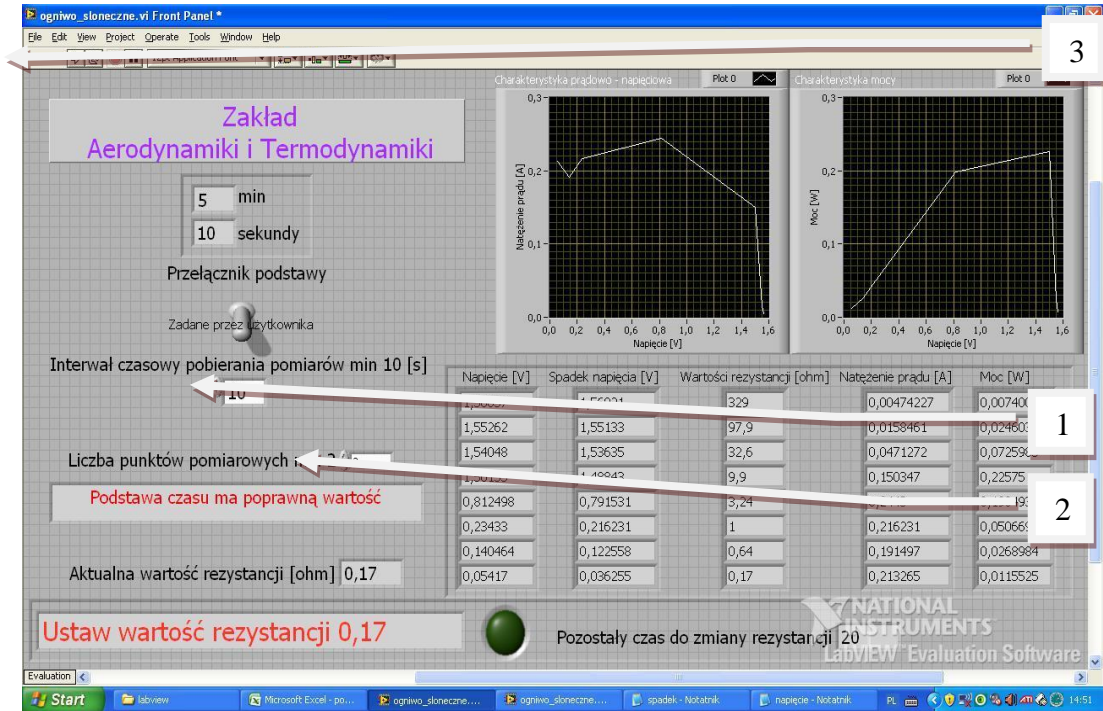
Rys. 5. Ikona panelu głównego.

Po jej wybraniu ukazuje się okno panelu głównego.



Rys. 6. Widok panelu głównego.

Należy je uruchomić przyciskiem RUN i wybrać przycisk podpisany *PROGRAM DO BADANIA OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO*. Otworzy się docelowe okno programu.

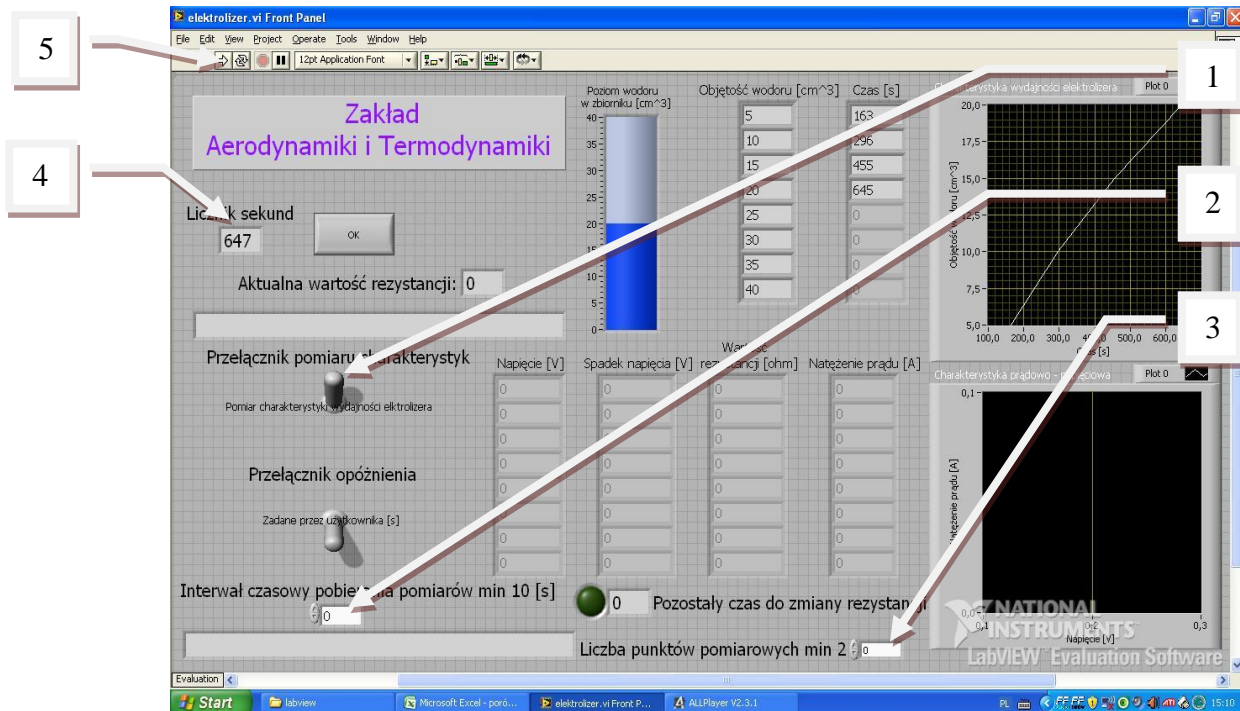


Rys. 7. Widok panelu do badania ogniwa paliwowego

Układ do badania ogniwa fotowoltaicznego należy podłączyć według konfiguracji numer 1 przedstawionej na Fot. 16. Przed jego uruchomieniem należy wprowadzić wartość interwału czasowego (1) i liczby punktów pomiarowych (2) z jakich ma być wyliczona wartość średnia dla pojedynczej wartości rezystancji. Po wprowadzeniu tych danych na oporniku nastawnym trzeba sprawdzić czy pokrętło jest ustawione na wartość 329 [ $\Omega$ ], jeśli jest inaczej wówczas należy je przestawić na tą wartość. Po wykonaniu powyższych czynności można uruchomić program przyciskiem RUN (3). W trakcie pomiarów należy przestawiać na oporniku wartości rezystancji zgodnie z wyświetlaczem komunikatów i licznikiem. Warto zwrócić uwagę, że licznik odliczający w dół nie określa kiedy powinna być zmieniona rezystancja, tylko odlicza czas jaki pozostał do rozpoczęcia pobierania danych dla następnej wartości rezystancji. Oznacza to, że zmiana rezystancji w odniesieniu do licznika powinna nastąpić gdy wyświetla on wartości czasu z przedziału  $0 \leq t \leq 9$ . Program docelowy zostanie wyłączony automatycznie po zbieraniu odpowiedniej liczby danych pomiarowych i zapisze wyniki w następującej lokalizacji na dysku: C:\Documents and Settings\jzmyw\Moje dokumenty\LabVIEW Data\ogniwo\_sloneczne\_student.txt.

W przypadku badania elektrolizera należy wybrać przycisk *PROGRAM DO BADANIA ELEKTROLIZERA*. Zostanie wyświetlone odpowiednie okno programu.





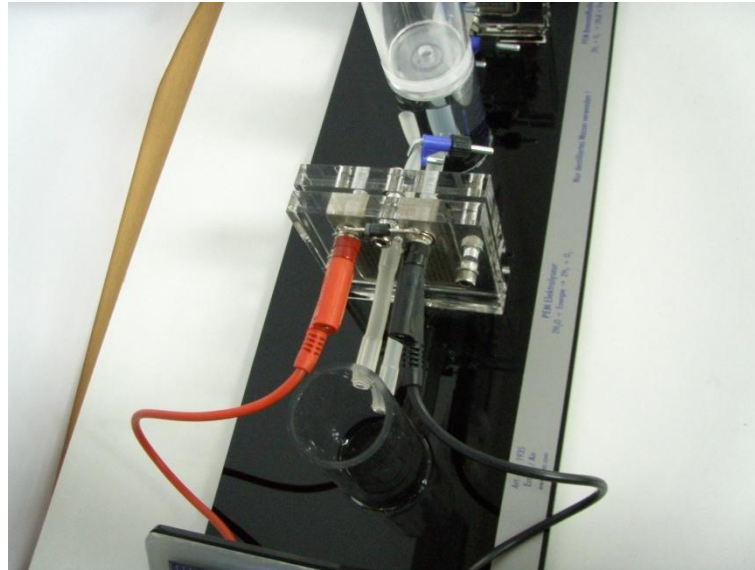
Rys. 8. Widok panelu do badania elektrolizera.

Układ do badania elektrolizera należy podłączyć zgodnie z konfiguracją numer 1 przedstawioną na Fot. 17. Badania należy rozpocząć od charakterystyki prądowo – napięciowej, której wybór jest uwarunkowany odpowiednim ustawieniem przełącznika wyboru charakterystyk (1). Następnie trzeba zadać wartość interwału czasowego (2) i liczby punktów (3) z jakich ma być wyznaczona średnia dla pojedynczej wartości rezystancji. Przed rozpoczęciem pomiarów na oporniku trzeba ustawić wartość 329 [ $\Omega$ ]. Po wykonaniu tych czynności można uruchomić program przyciskiem RUN (5). Podczas pomiarów należy zmieniać wartości rezystancji zgodnie z wskazaniem wyświetlacza jak w wypadku ogniwa fotowoltaicznego. Po zakończeniu pomiarów program zapisze wyniki w komputerze w następującej lokalizacji:

*C:\Documents and Settings\jzmyw\Moje dokumenty\LabVIEW Data \  
 elektrolizer\_student\_u=(i).txt*

W celu zbadania charakterystyki wydajności należy odłączyć przewód numer 1 od zestawu czystej energii i powrócić do standardowego podłączenia przedstawionego na Fot. 18:





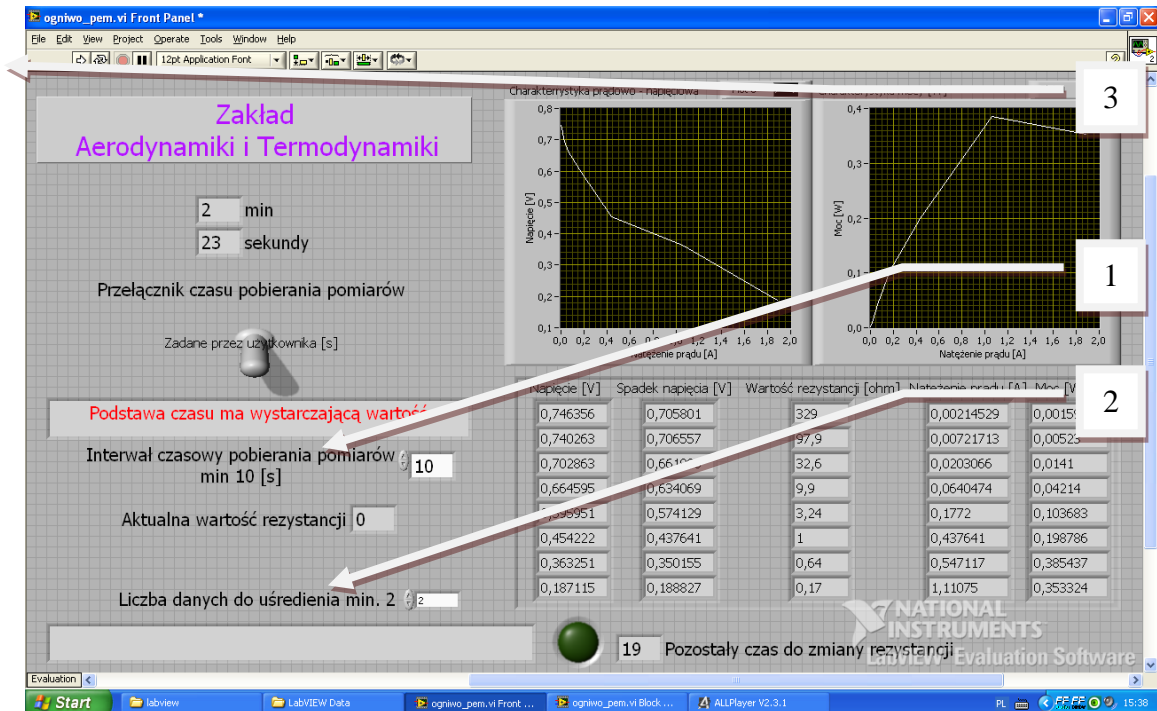
**Fot. 18.** Standardowe podłączenie zasilania do elektrolizera.

Należy ustawić przełącznik pomiaru charakterystyki (1) w odpowiednie położenie. Przed rozpoczęciem pomiarów należy upuścić nadwyżkę wodoru ze zbiorniczka, co można przeprowadzić na dwa sposoby:

- odkręcając górną część zbiorniczka na wodór
- odkręcając zaworek numer 2 przy odkręconym zaworku numer 1.

Przy upuszczaniu nadmiaru wodoru należy uważać aby poziom wody w zbiorniczku na wodór pokrywał się z wskazaniem 0 podziałki objętości. Po wykonaniu tych czynności można uruchomić program przyciskiem RUN (5). Obsługa programu dla tej charakterystyki ogranicza się do klikania myszką na wirtualny przycisk oznaczony jako OK. (4). Kliknięcia powinno następować w momencie gdy poziom wody pokrywa się z odpowiednią wartością objętości w odpowiedniej kolumnie programu. Program po zakończeniu pomiarów wyłączy się automatycznie i zapisze wyniki pomiarów w następującej lokalizacji: *C:\Documents and Settings\jzmyw\Moje dokumenty\LabVIEW Data\elektrolizer\_student\_v=(t).txt*

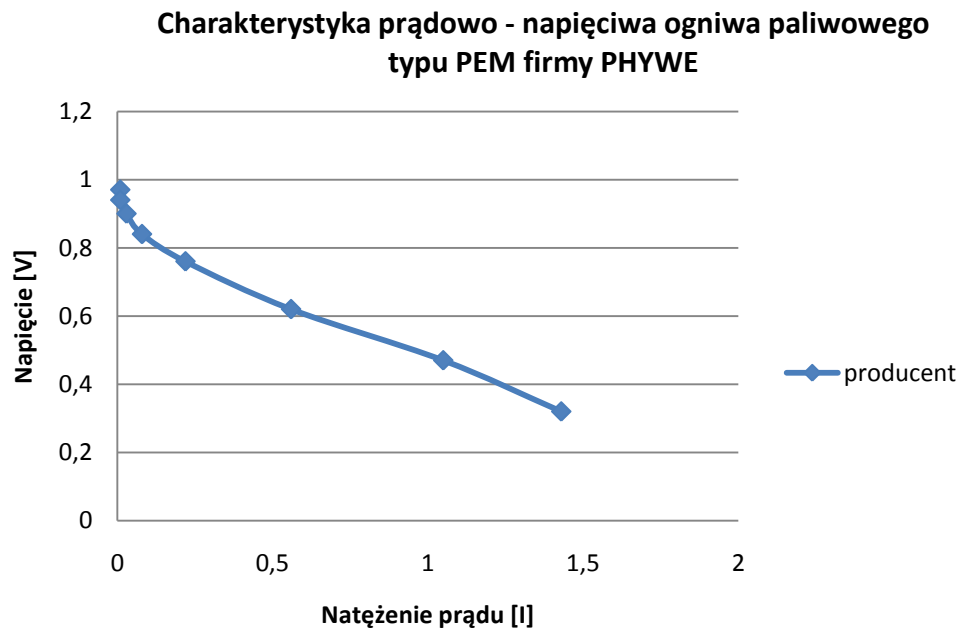
Aby zbadać parametry ogniwa paliwowego, należy z panelu głównego wybrać przycisk oznaczony jako PROGRAM DO BADANIA OGNIWA PALIWOWEGO, oprócz tego układ pomiarowy należy podłączyć zgodnie z konfiguracją numer 2 widoczną na Fot. 17.



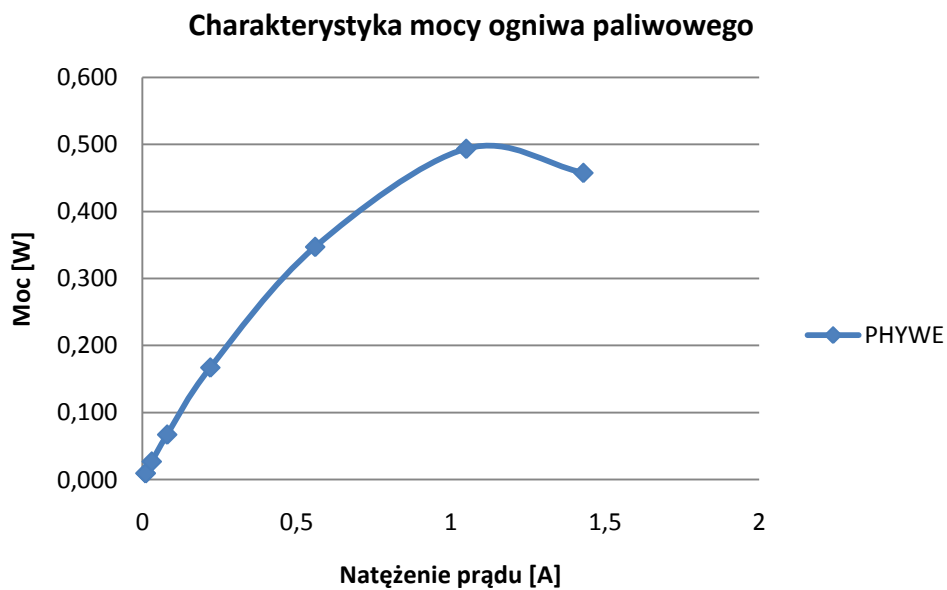
Rys. 2.5. Widok panelu do badania ogniwa słonecznego.

Użytkownik powinien sprawdzić czy pokrętko nastawy rezystancji na oporniku wskazuje wartość 329 [Ω], jeśli jest inaczej wówczas należy pokrętko ustawić na wskazaną wyżej wartość. Po ukazaniu się okna docelowego użytkownik musi wprowadzić wartość interwału czasowego (1) jaki będzie wykorzystywany w pomiarach oraz liczbę punktów pomiarowych (2), z których będzie wyznaczana średnia dla pojedynczej wartości rezystancji ustawianej na oporniku. Po wprowadzeniu niezbędnych danych uruchomienie programu wywołujemy wciskając przycisk RUN (3). W trakcie pomiarów użytkownik będzie musiał zmieniać nastawy rezystancji na oporniku zgodnie z wskazaniem wyświetlacza. Po zakończeniu cyklu pomiarowego program wyłączy się automatycznie i zapisze zebrane wyniki pomiarów w następującej lokalizacji: *C:\Documents and Settings\jzmyw\Moje dokumenty\LabVIEW Data\ogniwo\_pem\_student.txt*

Dane prezentowane są w postaci dwóch kolumn, z których pierwsza przedstawia wartości napięcia natomiast druga wartości spadku napięcia na oporniku. Liczbę danych w jednej kolumnie należy podzielić przez 8 wówczas otrzymamy liczbę punktów pomiarowych, które były zbierane dla pojedynczej wartości rezystancji



Rys. 9. Przykładowa charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa PEM



Rys. 10. Przykładowa charakterystyka mocy ogniwa PEM

## L I T E R A T U R A

- [1] Chmielniak T. „Technologie energetyczne” WNT, Warszawa 2008.
- [2] Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej „Instrukcja konwersji energii” Politechnika Gdańska 2006.
- [3] Instrukcja Phywe, [http://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/3\\_6\\_04.pdf](http://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/3_6_04.pdf)