

Zakład Napędów Wieloźródłowych
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW
Laboratorium Napędów Elektrycznych

Ćwiczenie:

Badanie ogniwa wodorowego.

Instrukcja

Autorzy:

Patryk Jędrasiak
Artur Kaczmarek
Jacek Nowicki
Karol Serowiec

Cel ćwiczenia:

Głównym celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z zasadą działania ogniwa paliwowych, na przykładzie ogniwa wodorowego PEM. Przedmiotem szczegółowej analizy będą charakterystyki tego ogniwa wraz z wpływ najistotniejszych czynników na ich przebieg a także sprawność – zarówno samego ogniwa, jak i układu ogniwo – elektrolizer.

Ogniwa paliwowe (ang. Fuel cell)

są jedną z wielu technologii alternatywnych źródeł energii, których gwałtowny rozwój obserwuje się w ostatnich latach. Działają one niezależnie od wiatru bądź światła słonecznego i generują więcej elektryczności w przeliczeniu na jednostkę paliwa niż dowolne inne źródło energii. Czyni to z nich źródło energii dla bardzo wielu zastosowań, takich jak:

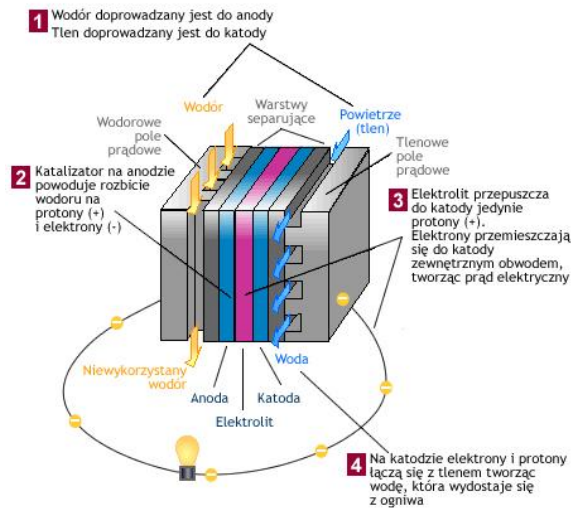
- Urządzenia przenośne, baterie małej mocy.
- Systemy stacjonarne - generatory energii elektrycznej, elektrownie małej mocy.
- Środki transportu, komunikacja.
- Robotyka

Ogniwa paliwowe są coraz częściej stosowane w samochodach osobowych. Przykłady takich modeli to: Honda FCX Clarity, Nissan X-Trail FCV (Fuel Cell Vehicle), Toyota FCHV (Fuel Cell Hybrid Vehicle). Nad autami z ogniwami paliwowymi pracuje też Ford, General Motors, Mercedes, Mitsubishi i wiele innych koncernów. Nie należy z autami wyposażonymi w ogniwa paliwowe (a więc elektrycznymi) mylić tych, w których paliwem jest wodór, ale spalany w klasycznym silniku cieplnym (np. BMW hydrogen 7).

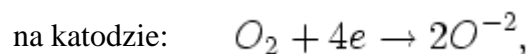
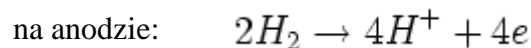
Ogniwa charakteryzują się dużą czystością, sprawnością i gęstością energetyczną. Technologia ogniw paliwowych jest intensywnie rozwijana w krajach UE, Japonii, USA. Powstanie infrastruktury wodorowej i wdrożenie technologii ogniw paliwowych w urządzeniach codziennego użytku szacuje się na lata 2015-2030.

Zasad działania ogniw wodorowych

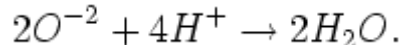
Ogniwa paliwowe są urządzeniami elektrochemicznymi, które wytwarzają energię użyteczną (elektryczność, ciepło) w wyniku reakcji chemicznej wodoru z tlenem. Produktem ubocznym jest woda. Ogniwo paliwowe zbudowane jest z dwóch elektrod: anody i katody. Elektrody odseparowane są poprzez elektrolit występujący w formie płynnej lub jako ciało stałe. Elektrolit umożliwia przepływ kationów, natomiast uniemożliwia przepływ elektronów. Reakcja chemiczna zachodząca w ogniwie polega na rozbiciu wodoru na proton i elektron na anodzie, a następnie na połączeniu substratów reakcji na katodzie. Procesom elektrochemicznym towarzyszy przepływ elektronu od anody do katody z pominięciem nieprzepuszczalnej membrany. W wyniku elektrochemicznej reakcji wodoru i tlenu powstaje prąd elektryczny, woda i ciepło. Paliwo - wodór w stanie czystym lub w mieszaninie z innymi gazami - jest doprowadzany w sposób ciągły do anody, a utleniacz - tlen w stanie czystym lub mieszaninie (powietrze) - podawany jest w sposób ciągły do katody.



Oto jakie reakcje chemiczne zachodzą w ogniwie paliwowym:



Następnie jony wodorowe H^+ są zobojętniane zjonizowanym tlenem:



Końcowy produktu to H_2O czyli woda w postaci ciekłej lub para.

Podział ogniw paliwowych bazuje na zastosowanym w ogniwie elektrolicie. Zastosowany elektrolit determinuje temperaturę reakcji zachodzącej w ogniwie oraz rodzaj paliwa zasilającego ogniwo. Każde z ogniw posiada zalety i wady, które określają pola zastosowań dla każdego typu ogniw. W ćwiczeniu będziemy mieć do czynienia z ogniwem typu **PEM (Proton Exchange Membrane lub Polimer Electrolyte Membrane)**. Ogniwa paliwowe PEM zasilane są czystym wodorem. Membraną ogniwa PEM jest materiał polimerowy np. nafion. Charakterystyczną cechą ogniw PEM jest duża sprawność w produkcji energii elektrycznej - do 65% oraz mała ilość wydzielanego ciepła. Niewątpliwą zaletą ogniwa PEM jest dobra nadążność ogniwa w systemach poddawanych zmiennym obciążeniom oraz krótki czas rozruchu. Cechy te wynikają z niskiej temperatury reakcji zachodzącej w ogniwie - 60 do 100 stopni Celsjusza. Ogniwa PEM są stosowane jako, baterie przenośne, elektrownie małej mocy i generatory energii i ciepła, są wykorzystywane w przemyśle motoryzacyjnym.

Podział ogniw paliwowych

Istnieje wiele różnych typów ogniw paliwowych różniących się między sobą konstrukcją, materiałem elektrod, rodzajem elektrolitu i stosowanych katalizatorów. Każde z nich ma swoje unikatowe właściwości, swoje wady i zalety, jak i swoją historię. Podstawowym kryterium podziału ogniw paliwowych są dwa parametry: rodzaj użytego elektrolitu i temperatura pracy.

Ze względu na temperaturę pracy ogniwa paliwowe dzielimy na:

- niskotemperaturowe (25-100 °C),
- średniotemperaturowe (100-500 °C),
- wysokotemperaturowe (500-1000 °C).

PEM (Proton Exchange Membrane lub Polimer Electrolyte Membrane).

Ogniwa paliwowe PEM zasilane są czystym wodorem lub reformatem. Membraną ogniwa PEM jest materiał polimerowy np. nafion. Charakterystyczną cechą ogniw PEM jest duża sprawność w produkcji energii elektrycznej - do 65% oraz mała ilość wydzielanego ciepła. Niewątpliwą zaletą ogniwa PEM jest dobra nadążność ogniwa w systemach poddawanych zmiennym obciążeniom oraz krótki czas rozruchu. Cechy te wynikają z niskiej temperatury reakcji zachodzącej w ogniwie - 60 do 100 stopni Celsjusza. Ogniwa PEM są stosowane głównie do napędzania pojazdów oraz do budowy stacjonarnych i przenośnych generatorów energii.

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

Ogniwa DMFC posiadają polimerową membranę, taką jak ogniwa PEM. Różnica pomiędzy ogniwem DMFC, a ogniwem PEM tkwi w konstrukcji anody, która w ogniwie DMFC pozwala na dokonanie wewnętrznego reformingu metanolu i uzyskanie wodoru do zasilania ogniwa. Ogniwa DMFC eliminują problem składowania paliwa, są atrakcyjne dla aplikacji przenośnych ze względu na niską temperaturę zachodzącej reakcji (około 80 stopni Celsjusza). Ogniwo DMFC charakteryzuje niższa sprawność w porównaniu do ogniwa PEM i wynosi 40%. Ogniwa DMFC używane są do budowy baterii dla urządzeń przenośnych i oferują wydajność nieosiągalną dla standardowych baterii - notebook zasilany 250 ml zbiornikiem metanolu, pracuje przez 12 godzin co jest nieosiągalne dla zwykłych baterii o podobnej masie/objętości.

AFC (Alkaline Fuel Cell)

Są to pierwsze ogniwa paliwowe, po raz pierwszy używane w kosmonautyce. Elektrolitem jest wodny roztwór zasady, najczęściej wodorotlenek potasu (KOH). Ogniwo, w którym zastosowano 85% roztwór KOH pracuje w temperaturze 250°C, jeżeli natomiast stężenie roztworu KOH wynosi 35-50% to temperatura pracy ogniwa jest niższa i wynosi 120°C. Ogniwa AFC są wrażliwe na wszelkie zanieczyszczenia i wymagają paliwa o dużej

czystości, co stanowi przeszkodę w ich komercjalizacji. Zaletą jest duża sprawność, która wynosi 50% przy temperaturze otoczenia 20°C.

Ogniwa PEM i DMFC charakteryzują się niską temperaturą reakcji i stosowane są do budowy zarówno małych jak i dużych źródeł energii. Różnica pomiędzy ogniwem PEM i DMFC to rodzaj stosowanego paliwa. Ogniwko DMFC jest zasilane metanolem. Metanol jest paliwem łatwym w składowaniu, co w połączeniu z niską temperaturą reakcji czyni ogniwko DMFC idealnym do zastosowań jako bateria małej mocy.

Paliwem dla ogniwa PEM jest wodór lub reformat. W przypadku stosowania reformatu, układ należy wyposażyć w tzw. procesor paliwowy, wytwarzający wodór z zastosowanego paliwa. Podnosi to koszt układu, jednak w wielu przypadkach jest to opłacalne np. w stacjonarnych jednostkach generacji energii gdzie jest łatwy dostęp do gazu ziemnego.

Sprawność termodynamiczna

Silniki cieplne pracujące w oparciu o paliwo chemiczne spalają paliwo zamieniając jego energię na energię termiczną, energia termiczna jest zamieniana na pracę. Ogniwka paliwowe przetwarzają energię chemiczną na elektryczną w zupełnie inny sposób, bez zamiany na energię termiczną, przez co mogą osiągnąć większą sprawność teoretyczną niż silnik pracujący według idealnego cyklu Carnota. Sprawność przetwarzania energii zawartej w paliwie przez ogniwa, także podlega ograniczeniom wynikającym z zasad termodynamiki, ale są to całkiem inne ograniczenia niż dla silników cieplnych.

Z pierwszej zasady termodynamiki wynika, że zmiana energii wewnętrznej podczas reakcji następuje w wyniku przepływu ciepła do układu i wykonania pracy przez układ, co określa wzór:

$$\Delta U = Q - L$$

Praca wykonana przez układ składa się z pracy wykonanej na przenoszenie ładunków elektrycznych L_e jak i pracy objętościowej $L_v = p\Delta V$. Po dodaniu do obu stron równości wyrażenia $p\Delta V$, otrzymujemy wzór na zmianę entalpii w reakcji:

$$\Delta U + p\Delta V = Q - (L - p\Delta V)$$

oraz

$$L = L_e + L_v = L_e + p\Delta V$$

stąd

$$\Delta H = Q - L_e$$

Entalpia jest równa energii jaką można uzyskać z danego procesu przebiegającego przy stałym ciśnieniu.

Przyjmując, że proces jest odwracalny, z II zasady termodynamiki otrzymujemy:

$$Q = T\Delta S$$

$$\Delta H = T\Delta S - L_e$$

lub

$$L_e = \Delta H - T\Delta S = \Delta G$$

Prawa strona tego wzoru to entalpia swobodna zwana funkcją Gibbsa. Wykonana praca zwiększa energię elektryczną przenoszonych elektronów co jest równoważne wytwarzaniu siły elektromotorycznej.

Entalpia jak i funkcja Gibbsa procesu termodynamicznego jest możliwa do obliczenia teoretycznego, znane są też ich zależności od temperatury, ciśnienia itp. Zależność funkcji Gibbsa, a tym samym i siły elektromotorycznej ogniwa, od aktywności molowej reagentów opisuje Równanie Nernsta.

Sprawność ogniwa określa się jako stosunek energii elektrycznej do całkowitej energii możliwej do uzyskania w wyniku tej reakcji. Reakcja przebiega przy stałym ciśnieniu, dlatego uzyskiwaną energię, czyli energię swobodną odnosi się do entalpii.

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T \cdot \Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T \cdot \Delta S}{\Delta H}$$

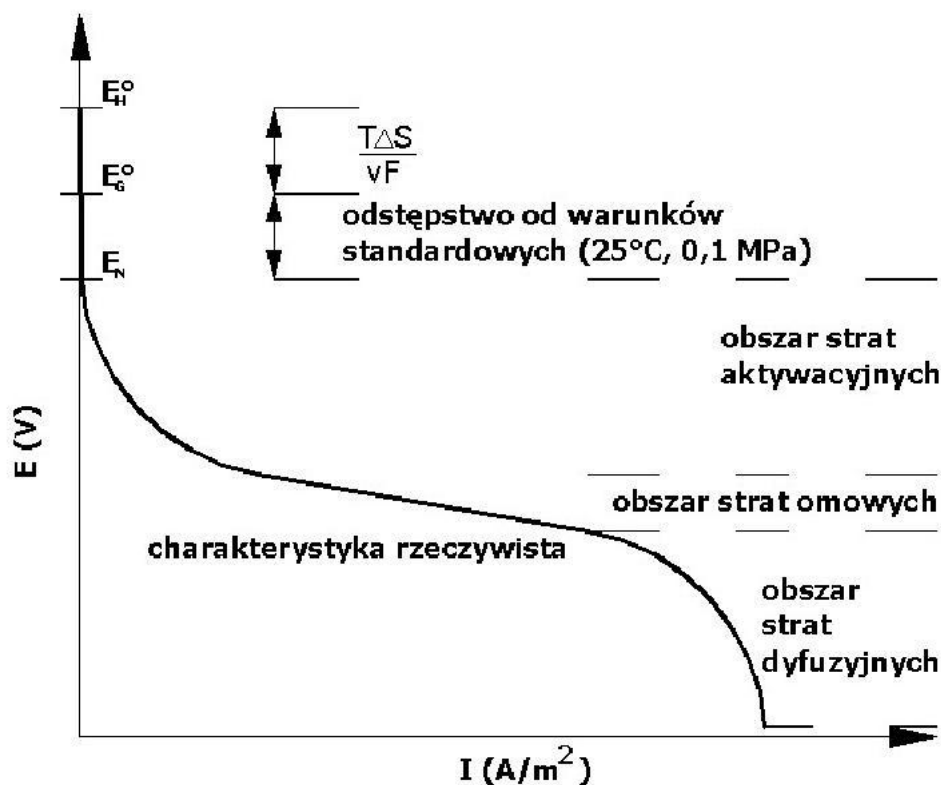
gdzie:

- ΔG - zmiana entalpii swobodnej (funkcji Gibbsa)
- ΔH - zmiana entalpii całkowitej paliwa
- ΔS - przyrost entropii układu
- T - temperatura bezwzględna pracy ogniwa

Dla przemian egzotermicznych ($\Delta H < 0$), w których zmiana entropii (ΔS) jest większa od zera, sprawność taka jest nawet większa od jedności. (T jest temperaturą absolutną ogniwa paliwowego, czyli liczbą zawsze dodatnią.) Oznacza to że, teoretycznie, mogą istnieć reakcje chemiczne w wyniku których ogniwo wytwarza więcej energii elektrycznej niż zawarta w paliwie, pobiera wówczas energię cieplną z otoczenia i zamienia ją na energię elektryczną, taką reakcją jest reakcja utleniania węgla do tlenku węgla, której sprawność teoretyczna wynosi 124,2%.

Charakterystyka prądowo – napięciowa ogniwa polimerowego

Przykładowy kształt charakterystyki prądowo-napięciowej polimerowego paliwa przedstawiony został na rysunku poniżej:



Gdzie:

E_H^0 – Napięcie teoretyczne, odpowiadające entalpii

$\frac{T\Delta S}{vF}$ – Spadek napięcia, odpowiadający ciepłu absorbowanemu w układzie

E_G^0 – Napięcie odpowiadające entalpii swobodnej (energii swobodnej Gibbsa)

E_N^0 – Napięcie nominalne, odpowiadające pracy generowanej przez ogniwo

Jak widać rzeczywiste napięcie mierzone w stanie bezprądowym nazywane napięciem przy rozwartym obwodzie jest niższe od wartości teoretycznej. W polimerowym ogniwie paliwowym wartość napięcia pojedynczej celi wynosi ok. 1V. Dla małej gęstości prądu charakterystyka jest nieliniowa i występuje spadek napięcia nazywany nadnapięciem aktywnym, który spowodowany jest wolną kinetyką reakcji zachodzących na powierzchni elektrod. W miarę zwiększania gęstości prądu następuje dalszy spadek napięcia i charakterystyka staje się liniowa. W tej części

charakterystyki dużą rolę odgrywa bowiem rezystancja elektronowa warstw gazów dyfuzyjnych oraz rezystancja elektrolitu, która utrudnia przepływ protonów. Ze względu na związek strat z rezystancją, straty nazywane są stratami omowymi. Dla dużych gęstości prądu dochodzących do ok. 10000A/m^2 występuje nagły spadek napięcia. W tej części charakterystyka zdeterminowana jest przez nierównomierną koncentrację reagentów na powierzchni elektrod spowodowaną zużyciem wodoru i tlenu oraz ograniczoną prędkością dyfuzji gazów. Dlatego też spadek napięcia wywołany tymi procesami nazywany jest nadnapięciem dyfuzyjnym. Na charakterystykę prądowo napięciową i parametry elektryczne ogniwa wpływa również przepuszczalność wodoru przez membranę polimerową oraz występowanie przewodnictwa elektronowego w elektrolicie.

Wpływ ciśnienia gazów na parametry elektryczne ogniwa paliwowego:

Układy niskociśnieniowe charakteryzują się wprawdzie dużą sprawnością jednak stosując wysokie ciśnienie gazów można uzyskać większe moce przy takich samych rozmiarach ogniwa. Poprzez zwiększanie ciśnienia pracy ogniwa możliwe jest osiągnięcie większych wartości prądu, ponieważ zmniejszają się straty koncentracyjne (powodowane transportem masy) występujące w obszarze dużych prądów na charakterystyce prądowo-napięciowej.

Wpływ temperatury pracy na parametry elektryczne ogniwa PEMFC

Polimerowe ogniwo paliwowe osiąga najlepsze parametry elektryczne pracując w temperaturze 60-80 °C. Podniesienie temperatury ogniwa oraz temperatury gazów reakcyjnych do tego poziomu wpływa na zmniejszenie energii aktywacji procesów zachodzących na elektrodach i wynikających z tego strat aktywacyjnych. Ponadto zwiększa się ruchliwość nośników ładunku. Jednak zbyt wysoka temperatura może powodować wysychanie membrany i zanik przewodnictwa jonowego, które związane jest bezpośrednio z obecnością wody w membranie.

Wpływ wilgotności na parametry elektryczne ogniwa

Stopień zwilżenia membrany ma bezpośrednio wpływ na przewodnictwo jonowe elektrolitu, gdyż mechanizm transportu ładunku jest ściśle związany z obecnością wody w membranie. Zapewnienie odpowiedniego nawilżenia polimerowego elektrolitu oraz odpowiednie gospodarowanie wodą w układzie ogniwa jest znaczące dla poprawnej i stabilnej pracy ogniwa.

Podsumowanie

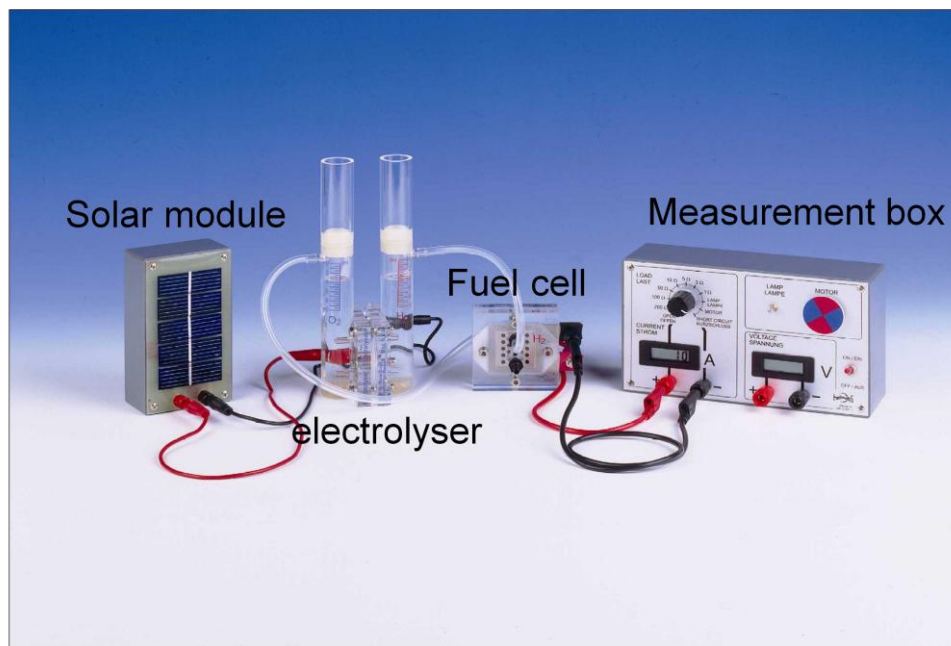
Zalety ogniów wodorowych:

- Sprawność bezpośredniej konwersji energii chemicznej paliwa w energię elektryczną nie podlega ograniczeniu wynikającemu z teorii silników cieplnych
- Wysoka sprawność produkcji energii elektrycznej
- Niski poziom hałasu
- Możliwość stosowania różnych rodzajów paliw
- Technologia bezpieczna dla środowiska naturalnego ponieważ podstawowym produktem ubocznym jest woda, a emisja CO₂ zachodzi tylko w przypadku wykorzystywania paliw węglowodorowych (CO₂ jest produktem ubocznym reformingu)
- Nie istnieje problem emisji tlenków siarki i azotu (występują w śladowych ilościach)
- Brak ruchomych części pracujących w trudnych warunkach
- Możliwość pracy przy szerokim zakresie obciążeń
- Możliwość ciągłej pracy (o ile jest dostęp do paliwa i utleniacza)

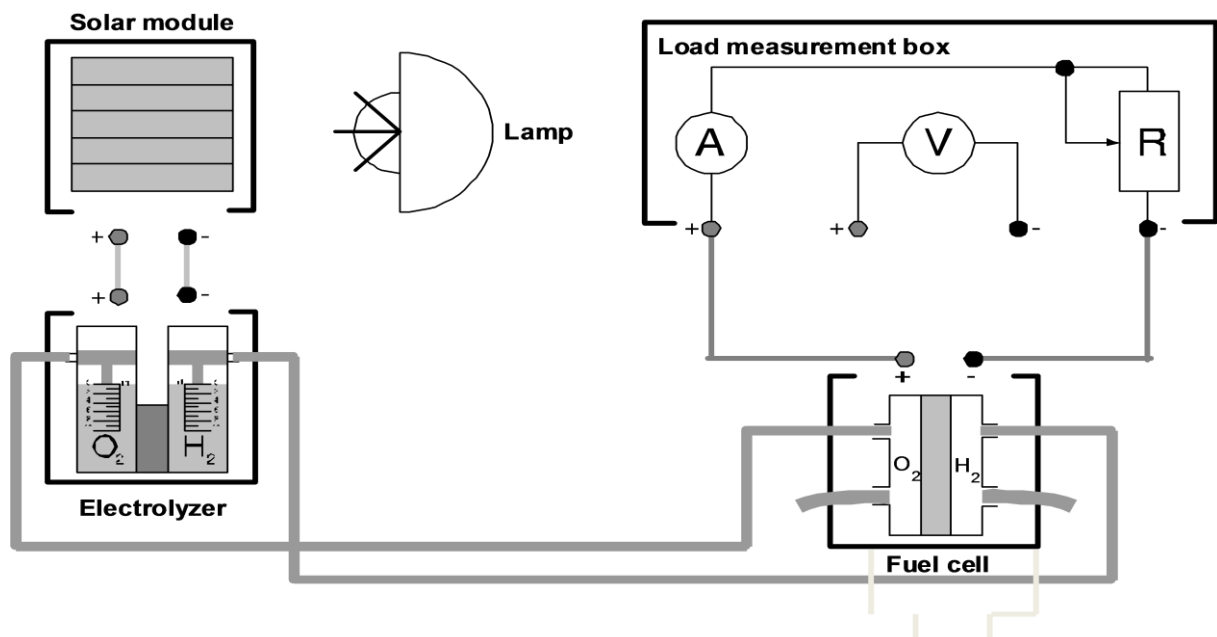
Wady ogniów wodorowych :

- Niskie napięcie prądu uzyskiwane z pojedynczego ogniwa (<1V)
- Drogie materiały na katalizatory
- Stosunkowo niewielkie moce uzyskiwane z modułu
- Produkcja jedynie prądu stałego (czasami jest to zaletą)
- Podatność na wpływ zanieczyszczeń zawartych w paliwie (zanieczyszczenia zmniejszają żywotność ogniów zatykając porowate elektrody przez co zmniejszają ich wydajność prądową)
- Trudności z produkcją, magazynowaniem i dystrybucją paliwa (wodoru)

Układ pomiarowy



Schemat układu pomiarowego:



Elementy układu pomiarowego:

- Ogniwo paliwowe (Fuel cell), typu PEM (Z membraną do wymiany protonów)
Napięcie (na zaciskach): 0.4 -1.0 V
Natężenie prądu: max 1000 mA
Zużycie wodoru: max 7 ml/min (przy prądzie 1000 mA)
- Elektrolizer (Electrolyser)
Napięcie operacyjne (normalne): 1.4 -1.8 V

- Natężenie prądu: 0-500 mA
Produkcja wodoru: max 3.5 ml/min
- Układ pomiaru obciążenia ogniwa:
Woltomierz – zakres pomiarowy do 9V
Amperomierz – zakres pomiarowy do 1A
Rezystancja nastawna w zakresie 1-200 Ω (z możliwością przzerwania obwodu)
 - Źródło prądu – zasilacz lub bateria słoneczna i lampa (o mocy 100W)
 - Przewody elektryczne
 - Elastyczne przewody hydrauliczne
 - Zatyczki do przewodów

Oczekiwane wyniki badań:

Sprawozdanie powinno zawierać:

- Obliczony stosunek liczby moli gazów zużytych przez ogniwo paliwowe podczas badania
- Charakterystykę zewnętrzną ogniwa paliwowego (wykres)
- Wizualizację wpływ rezystancji wewnętrznej ogniwa wodorowego na charakterystykę prądowo-napięciową (wykres)
- Sprawność układu elektrolizer – ogniwo paliwowe
- Sprawność ogniwa paliwowego
- Tok obliczeń
- Wnioski

Opcjonalnie:

- Narysować charakterystykę moc – natężenie prądu dla badanego ogniwa
- Wpływ rezystancji wewnętrznej ogniwa na charakterystykę moc – natężenie prądu
- Wykres sprawności układu w funkcji natężenia prądu płynącego przez ogniwo

Procedura pomiarowa

Procedura wstępna:

1. Złożyć układ (wg schematu).
2. Nastawić obciążenie ogniwa na „open”.
3. Dostarczyć prąd 200-300mA o napięciu 1.6V do elektrolizera
4. Przeprowadzać elektrolizę przez 5 minut
5. Włączyć obciążenie 3 Ω na 3 minuty
6. Włączyć obciążenie „open” na 3 minuty
7. wyłączyć prąd elektrolizera
8. Zatkać wylot gazów ogniwa

Procedura właściwa:

1. Dostarczyć prąd 200-300mA o napięciu 1.6V do elektrolizera aż do wytworzenia 10ml H₂, następnie odłączyć źródło zasilania.
2. Dokonać pomiaru objętości gazów.
3. Zaczynając od położenia obciążenia „open” zmieniać stopniowo opór w układzie(zaczynając od największego) notując napięcie i natężenie na ogniwie wodorowym. Zachować przerwy 30s między pomiarami.
4. Przełączyć obciążenie na „open”.
5. Dokonać pomiaru objętości gazów.
6. Usunąć stopery ogniwa.
7. Powtórzyć procedurę wstępną.
8. Podłączyć dodatkową rezystancję 0,47Ω.
9. Zaczynając od położenia obciążenia „open” zmieniać stopniowo opór w układzie(zaczynając od największego) notując napięcie i natężenie na ogniwie wodorowym. Zachować przerwy 30s między pomiarami.
10. Dostarczyć prąd 200-300mA o napięciu 1,6V do elektrolizera do wytworzenia 10 ml H₂, następnie odłączyć źródło zasilania. Zanotować nastawione wartości prądu i napięcia. Zmierzyć czas wytworzenia określonej wcześniej ilości wodoru.
11. Ustawić opór układu na 3Ω, zmierzyć czas zużycia wodoru o ustalonej objętości H₂, następnie ustawić pokrętkę w pozycji „OPEN”
12. Zmienić obciążenia na „open”

Opracowanie wyników

1. Stosunek molowy gazów

Do wyznaczenia tego stosunku korzystamy ze zmierzonych objętości gazów – wodoru:

$$\Delta V_{H_2} = V_{H_2} - V'_{H_2}$$

gdzie:

ΔV_{H_2} - objętość zużytego wodoru

V_{H_2} - początkowa objętość wodoru w zbiorniczku

V'_{H_2} - końcowa objętość wodoru w zbiorniczku

oraz tlenu:

$$\Delta V_{O_2} = V_{O_2} - V'_{O_2}$$

gdzie:

ΔV_{O_2} - objętość zużytego tlenu

V_{O_2} - początkowa objętość tlenu w zbiorniczku

V'_{O_2} - końcowa objętość tlenu w zbiorniczku

Zgodnie z równaniem Clapeyrona dla gazów doskonałych:

$$pV = nRT$$

Przy założeniu, że: $T = \text{const}$; $p = \text{const}$; $R = \text{const}$, otrzymujemy:

$$\frac{V}{n} = \frac{RT}{P} = \text{const} \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta V_{O_2}}{n_{O_2}} = \frac{\Delta V_{H_2}}{n_{H_2}}$$

stąd stosunek molowy wodoru i tlenu:

$$\frac{n_H}{n_O} = \frac{n_{H_2}}{n_{O_2}} = \frac{\Delta V_{H_2}}{\Delta V_{O_2}}$$

2. *Charakterystyka zewnętrzna:*

Jest to krzywa przedstawiająca zależność napięcia na zaciskach i prądu ogniwa $E(I)$. Obydwie wielkości zostały zmierzone bezpośrednio.

3. *Wpływ rezystancji wewnętrznej ogniwa wodorowego na charakterystykę prądowo-napięciową:*

Podobnie jak w poprzednim przypadku, należy narysować wykres zależności napięcia na zaciskach i prądu ogniwa $E(I)$, przy dołączonej rezystancji. Obydwie wielkości zostały zmierzone bezpośrednio.

4. *Sprawność układu elektrolizer - ogniwo paliwowe.*

W przypadku ogólnym sprawność definiowana jest jako:

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}}$$

Z definicji mocy chwilowej wynika:

$$N = \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} \quad \Rightarrow \quad \Delta E = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} N_{wy} dt$$

dla naszego przypadku dostarczana chwilowa moc elektryczna:

$$N_{wy} = I_{El} U_{El}$$

otrzymana moc elektryczna:

$$N_{wy} = I_{Og} U_{Og}$$

gdzie: Og –dotyczy ogniwa; El –dotyczy elektrolizera;

Ponieważ zarówno prądy jak i napięcie są stałe, możemy zapisać

$$E = \Delta E = IU\Delta t$$

stąd sprawność układu:

$$\eta_U = \frac{E_{wy}}{E_{we}} = \frac{I_{Og} U_{Og} \Delta t_{Og}}{I_{El} U_{El} \Delta t_{El}}$$

5. Sprawność ogniwa paliwowego

Podobnie jak w poprzednim punkcie, sprawność definiowana jest jako:

$$\eta = \frac{E_{wy}}{E_{we}}$$

onieważ entalpia określona jest jako:

$$H = U + pV$$

zmiana energii wewnętrznej jest równa:

$$\Delta U = \Delta H - p\Delta V$$

Zmianie energii wewnętrznej musi towarzyszyć kompresja zużywanych gazów, jednak jej wpływ w przypadku naszych obliczeń jest pomijalnie mały.

stąd

$$\Delta U = \Delta H = \frac{V_H \Delta H_r}{V_{mH}}$$

gdzie:

V_H - objętość zużytego wodoru [cm^3]

V_{mH} - objętość molowa wodoru, równa w warunkach normalnych (dla gazów doskonałych):

$$V_{mH} = 24,8 \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{mol}} \right]$$

ΔH_r - zmiana entalpii standardowej. Ponieważ entalpie standardowe tworzenia (substratów i produktów reakcji) są równe:

wódór $\text{H}_2 - 0$; tlen $\text{O}_2 - 0$; woda (ciecz) $- (-285,83) \text{ kJ/mol}$;

entalpia standardowa reakcji jest równa

$$\Delta H_r = \sum_i (n_i H_i)_{\text{prod}} - \sum_i (n_i H_i)_{\text{reac}} = -285,83 \approx -286 \text{ [kJ/mol]}$$

energia dostarczona do ogniwa jest równa spadkowi energii wewnętrznej:

$$E_{we} = -\Delta U$$

energia elektryczna otrzymana z ogniwa jest równa

$$E_{wy} = N_{wy} t = I_{og} U_{og} t$$

ostatecznie:

$$\eta = \frac{I_{og} U_{og} \Delta t_{og}}{\frac{V_H \Delta H_r}{V_{mH}}} = - \frac{I_{og} U_{og} \Delta t_{og} V_{mH}}{V_H \Delta H_r}$$

gdzie:

I_{og} - prąd ogniwa

U_{og} - napięcie na zaciskach ogniwa

t – czas przeprowadzania pomiaru (więc również zużycia wodoru)

V_H - objętość zużytego wodoru

$V_{mH} = 24,8 [dm^3/mol]$

$\Delta H_r = - 286 [kJ/mol]$

Źródła:

- Wikipedia, *Ogniwo Paliwowe* http://pl.wikipedia.org/Wiki/Ogniwo_paliwowe
- Wikipedia, *Fuel Cell* http://en.wikipedia.org/Wiki/Fuell_cell
- www.ogniwa-paliwowe.com
- Piotr Bujło, *Polimerowe, superjonowe membrany dla ogniw paliwowych typu PEMFC*
- Tadeusz J. Chmielniak, *Ogniwa paliwowe w układach energetycznych małej mocy*
- Instytut Łączności, *Budowa hybrydowej siłowni telekomunikacyjnej zintegrowanej na napięciu przemiennym 230 VAC wykorzystującej ogniwa paliwowe zasilane wodorem oraz baterie sodowo – niklowe*
- Wojciech Zeńczak, *Model matematyczny ogniwa wodorowego w stanach ustalonych*
- Politechnika Częstochowska, *Badanie ogniwa PEM*
- Politechnika Poznańska, *Badanie szeregowych i równoległych połączeń ogniw paliwowych*
- Martyn Berry & Averil Macdonald, *Chemistry through Hydrogen*
- Averil Macdonald, *Physics through Hydrogen*