

ĆWICZENIE 1

„Ogniwa paliwowe”

Instrukcja zawiera:

1. Cel ćwiczenia
2. Wprowadzenie teoretyczne; definicje i wzory
3. Opis wykonania ćwiczenia
4. Sposób przygotowania sprawozdania
5. Lista pytań do kolokwium pisemnego
6. Literatura

1. Cel ćwiczenia

Celem poznawczym ćwiczenia jest przegląd i analiza dostępnych technologii ogniw paliwowych ze szczególnym uwzględnieniem ogniw typu niskotemperaturowych ogniw typu PEM.

W zakresie doświadczalnym celem ćwiczenia jest zbadanie charakterystyk ogniwa paliwowego z membraną protonowo przewodzącą (PEM); sprawdzenie odwracalności ogniwa PEM, czyli analiza procesu wytwarzania wodoru podczas elektrolizy wody dzięki dostarczeniu zewnętrznej energii; zmierzenie sprawności energetycznej i faradajowskiej ogniwa PEM oraz sporządzenie krzywych pracy i wyznaczenie punktu pracy takiego ogniwa.

2. Wprowadzenie teoretyczne; definicje i wzory

Ogniwo paliwowe

Ogniwa paliwowe są to elektrochemiczne układy prądotwórcze, które zasilane są w sposób ciągły substratami reakcji elektrodowych, przy równoczesnym ciągłym odprowadzaniu produktów tych reakcji. Substratami reakcji są przede wszystkim gazy, a w niektórych przypadkach także ciecze.

Ogniwa paliwowe – rys historyczny

Ogniwa paliwowe swoim początkiem sięgają I połowy XIX wieku gdy w 1839 roku Anglik William Grove skonstruował pierwsze ogniwo. Wykazał bowiem, że elektroliza wody, z której otrzymuje się tlen i wodór jest procesem odwracalnym. Ponieważ rozkład wody na wodór i tlen w procesie elektrolizy wymaga

dostarczenia dużej ilości energii elektrycznej, to zapewne tę energię można wytwarzać w procesie odwrotnym. Kilkanaście lat później (ok. 1850 roku) Rosjanin Jacobi Moritz Hermann zademonstrował na jeziorze w Pennlgeraer łódź elektryczną, która była napędzana elektrycznym silnikiem zasilanym wyłącznie ogniwami paliwowymi. W II połowie XX wieku ogniwa paliwowe były wykorzystywane głównie do celów testowych. W 1950 roku NASA rozpoczęła pracę nad zastosowaniem ogniw paliwowych w ramach kilkuset projektów badawczych, a w 1960 roku wystartował wahadłowiec Apollo z ogniwem zasadowym. Dziesięć lat później wahadłowiec Columbia korzystał z pracy takiego samego ogniwa. Jednak w ciągu kolejnych kilku dziesięcioleci, zainteresowanie ogniwami paliwowymi znacznie zmalało, głównie ze względu na ich bardzo wysokie koszty produkcji.

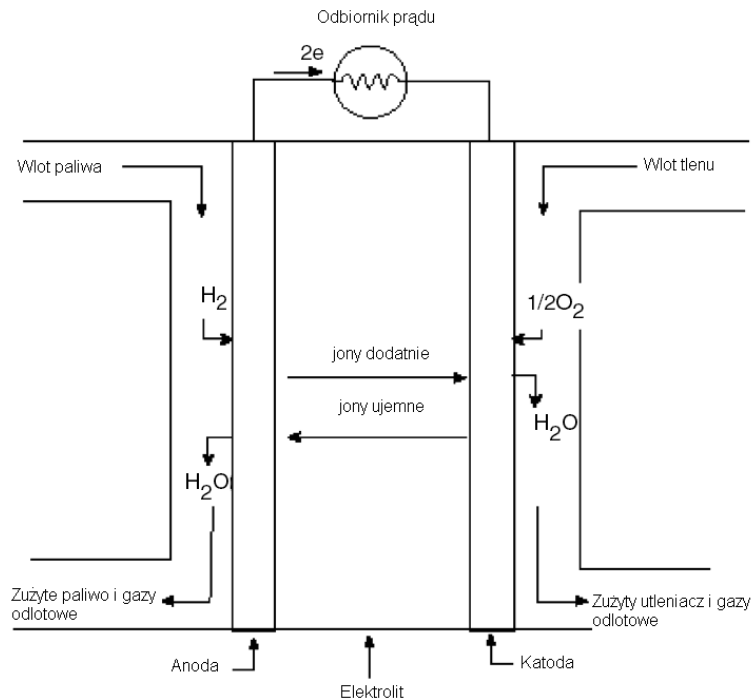
Obecnie wiele ośrodków naukowych zajmuje się badaniami nad ogniwami paliwowymi, które mają na celu wydłużenie czasu pracy ogniwa, redukcję masy oprzyrządowania, czy zmniejszanie kosztów samej produkcji.

W dobie wyczerpujących się źródeł paliw kopalnych, ogniwa paliwowe mogą odegrać kluczową rolę wśród nowatorskich sposobów produkcji energii. Wysoka wydajność i cicha praca, pozwala na wykorzystanie ogniw jako generatorów energii elektrycznej w układach hybrydowych do napędu pojazdów samochodowych, w systemach zasilania awaryjnego, w przenośnych urządzeniach mobilnych itp. Ogniwa paliwowe charakteryzują się dużą sprawnością oraz niską emisją substancji szkodliwych do środowiska. Powszechne zastosowanie ogniw paliwowych napotyka na problemy techniczno-ekonomiczne. Platyna, którą pokryte są elektrody ogniw PEM, stanowi obecnie najlepszy możliwy katalizator. Jednak jest bardzo kosztowna i cechują ją małe zasoby surowcowe. Szacuje się, że światowe zasoby platyny wynoszą tylko 25 tysięcy ton, a zapotrzebowanie jest znacznie wyższe. Poszukuje się alternatywnych katalizatorów opartych na stopach niklu, które byłyby dobrym rozwiązaniem wyżej wymienionych problemów. Wciąż jest jednak nierozwiązany problem tzw. zatrucia katalizatora.

Technologia ogniw paliwowych jest intensywnie rozwijana w krajach UE, Japonii, USA, Kanady i Chinach. Obecnie obserwuje się szybki rozwój infrastruktury wodorowej i wdrażanie technologii ogniw paliwowych w urządzeniach codziennego.

Ogólna charakterystyka ogniw paliwowych

Jak już na wstępie zdefiniowano, ogniwami paliwowymi nazywamy elektrochemiczne układy prądotwórcze, które zasilane są w sposób ciągły substratami reakcji elektrodowych, przy równoczesnym ciągłym odprowadzaniu produktów tych reakcji. Substratami reakcji są przede wszystkim gazy, a w niektórych przypadkach także ciecze. W ogniwach tych zachodzą złożone procesy elektrochemiczne spowodowane katalitycznym utlenianiem paliwa (wodoru lub węglowodorów) na anodzie i redukcja tlenu na katodzie. Produktami procesów elektrochemicznych są: energia elektryczna, ciepło i woda, a w przypadku użycia węglowodorów także dwutlenek węgla. W ogniwach paliwowych zachodzi więc spalanie paliwa i zamiana energii chemicznej na energię elektryczną. Ogniwa paliwowe pracują ze znacznie wyższą efektywnością niż tradycyjne silniki cieplne. Z jednostkowej masy paliwa można w nich uzyskać prawie dwukrotnie więcej energii użytkowej niż w silniku cieplnym. Kolejną zaletą używania ogniw paliwowych jest to, że w wyniku wykorzystywania czystych paliw tj. wodór, gaz ziemny, metanol emitują one do środowiska znacznie mniej zanieczyszczeń niż ma to miejsce w przypadku silników cieplnych.



Rys.1. Ogólny schemat i zasada działania ogniwa paliwowego (paliwem jest wodór; elektrolit zwykle przewodzi albo aniony O^{2-} albo protony - H^+)

Sprawność ogniwa oraz przebieg procesów elektrodowych zależy przede wszystkim od materiałów z jakich wykonane są elektrody, a także od rodzaju użytego elektrolitu. Sprawność ogniw paliwowych określona jest trzema czynnikami:

- szybkością procesów elektrodowych
- oporem wewnętrznym ogniwa
- szybkością transportu reagentów i produktów do i od elektrod zarówno w elektrolicie jak i fazie gazowej.

Prędkość procesów elektrodowych zdeterminowana jest:

- katalitycznymi zdolnościami materiału katodowego (redukcja tlenu) i anodowego (utlenianie paliwa)
- szybkością transportu jonowo-elektronowego w tych materiałach.

Podział ogniw paliwowych ze względu na rodzaj użytego elektrolitu

Ogniwa paliwowe można podzielić według różnych kryteriów – np. w oparciu o rodzaj elektrolitu, zakresu temperatury pracy, rodzaju użytego paliwa lub utleniacza czy zastosowanego proces reformingu paliwa (czyli konwersji danego paliwa do wodoru). Najczęściej stosowanym kryterium do podziału ogniw paliwowych jest rodzaj użytego elektrolitu, w którym jony poruszają się między elektrodami. W związku z tym wyróżniamy 5 głównych typów ogniw:

1. Alkaliczne ogniwa paliwowe (Alkaline fuel cells –AFC)
2. Ogniwa paliwowe z membraną polimerową (Proton exchange membrane fuel cells –PEMFC)
3. Ogniwa paliwowe z kwasem fosforowym (Phosphoric acid fuel cells –PAFC)
4. Wysokotemperaturowe węglanowe ogniwa paliwowe (Molten carbonate fuel cells -MCFC)
5. Wysokotemperaturowe tlenkowe ogniwa paliwowe (Solid oxide fuel cells -SOFC)

Wysokotemperaturowe tlenkowe ogniwa paliwowe można ponadto podzielić na 2 podkategorie :

- ITSOFC (Intermediate temperature solid oxide fuel cells) pracujące w temperaturze poniżej 800°C
- HTSOFC (High temperature solid oxide fuel cells) pracujące w temperaturze powyżej 800°C (zwykle określane jednak po prostu jako SOFC).

Spośród wyżej wymienionych typów ogniw paliwowych największe nadzieje aplikacyjne wiąże się z:

- wysokotemperaturowymi tlenkowymi ogniwami paliwowymi - ITSOFC
- niskotemperaturowymi ogniwami paliwowymi z membrana polimerową - PEMFC

Ogólne zestawienie charakterystyk wyżej wymienionych ogniw przedstawia poniższa tabela.

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC ITSOFC HTSOFC
Parametry pracy					
Temperatura(°C)	80	60-220	150-220	650	600-800 800-1000
Ciśnienie (atm)	1-5	-	1-8	1-3	1-15
Wydajność (%)	40-50	40-50	40-50	50-60	45-55
Gęstość mocy(kW/kg)	0.1-1.5	0.1-1.5	0.12	-	1-8
Elektrolit	Membrana protonowo przewodząca	Wodorotlenek potasu	Kwas fosforowy	Stopione węglany	Tlenowo przewodzące ceramiki
Elektrody	Węglowe	Węglowe	Grafitowe	Nikiel i stal nierdzewna	Perowskity
Katalizator	Platyna	Platyna	Platyna	Nikiel	Platyna, perowskity
Reagenty					
Nośniki	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Paliwo	H ₂	H ₂	H ₂	H ₂ /CO/ CH ₄	H ₂ /CO/ CH ₄
Proces reforming	Zewnętrzny	-	Zewnętrzny/ wewnętrzny	Zewnętrzny/ Wewnętrzny	Zewnętrzny/ wewnętrzny
Utleniacz	O ₂ /powietrze	O ₂	O ₂ /powietrze	CO ₂ /O ₂ /powietrze	O ₂ /powietrze

Ogniwa paliwowe nisko - i wysokotemperaturowe

Ogniwa paliwowe możemy również podzielić ze względu na zakres temperatur, w których mogą pracować:

- niskotemperaturowe ogniwa paliwowe- pracują w zakresach temperatur od 20 do 250 °C. Jako paliwo w tego typu ogniwach wykorzystujemy wodór, a utleniaczem jest powietrze lub czysty tlen. Zastosowanie w przemyśle elektronicznym oraz motoryzacyjnym,

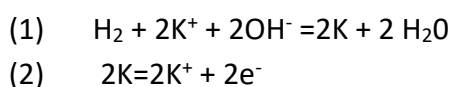
- wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe - pracują w znacznie wyższych temperaturach (powyżej 750 °C). Jako nośnik energii do ogniwa wykorzystują wodór, tlenek węgla (II), metan a także gazy z pirolizy węgla i ciężkie węglowodory. Są to urządzenia o dużej mocy stosowane do wytwarzania ciepłej wody i pary technologicznej we współpracy z turbiną gazową i parową.

Niskotemperaturowe ogniwa paliwowe

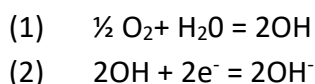
Alkaliczne ogniwo paliwowe (AFC – Alkaline fuel Cell)

Jako elektrolit stosowany jest wodny roztwór wodorotlenku sodu lub potasu. Rolę paliwa spełnia gazowy wodór, natomiast utleniaczem jest tlen lub powietrze. Zakres pracy ogniwa wynosi od 65-220 °C przy ciśnieniu 1 bar. Materiał, z którego wykonane są elektrody to węgiel oraz metal np. nikiel. Woda jako produkt reakcji elektrodowych usuwana jest z systemu w procesie parowania. Tego typu urządzenia są wykorzystywane np. na statkach kosmicznych. Ich sprawność kształtuje się w granicach 40-50%

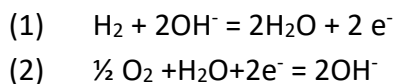
Reakcje na anodzie przebiegają w następujący sposób:



natomiast na katodzie:



sumarycznie:

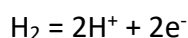


Ogniwo paliwowe z kwasem fosforowym (PAFC- Phosphoric acid fuel cell)

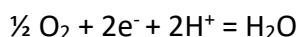
Elektrolitem stosowanym w tego typu ogniwach jest kwas ortofosforowy. Zakres temperatury pracy ogniwa wynosi od 150 do 205 °C przy ciśnieniu 1 bar. Jako paliwo stosowany jest wodór, dla którego dopuszcza się zanieczyszczenie CO₂. Utleniaczem jest tlen lub powietrze, a elektrody wykonane są z węgla. Wydajność urządzenia wynosi ok. 40%, natomiast przy wykorzystaniu pary wodnej do wytwarzania prądu w układzie kogeneracyjnym łączna sprawność sięga 85%. Ogniwa tego typu są obecnie dostępne

komercyjnie. Wykorzystywane są w systemach służących do zasilania budynków, a także w elektrowniach oraz w portach lotniczych.

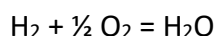
Na anodzie zachodzi reakcja:



Na katodzie:



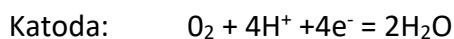
Łączna reakcja to:



Ogniwa paliwowe z membraną polimerową (PEMFC- Proton exchange membrane fuel cells)

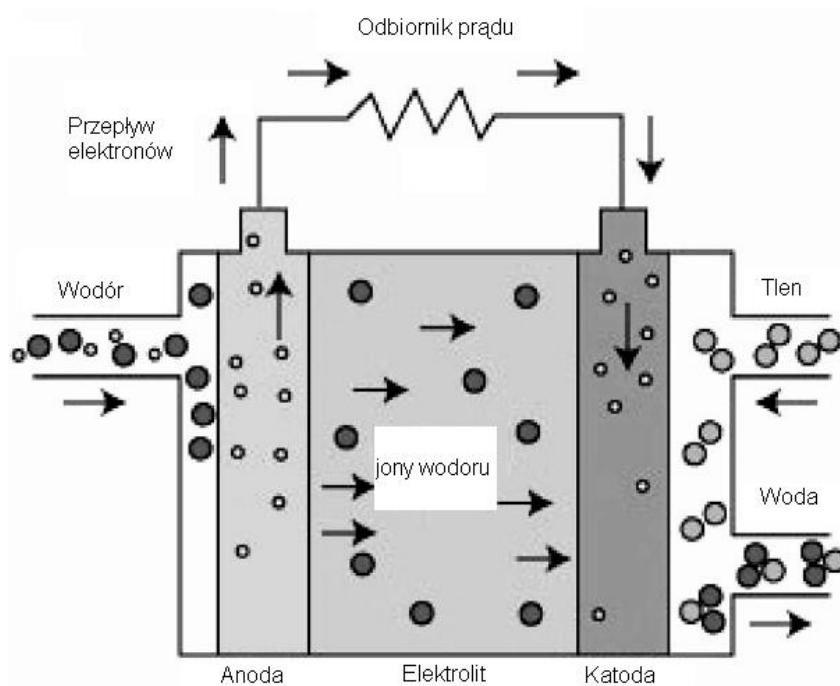
Elektrolitem w ogniwie PEMFC (skrótowo określanym jako PEM) jest kwas sulfonowy tworzący membranę pokrytą porowatą platyną, która spełnia rolę katalizatora. Elektrody wykonane są z grafitu, teflonowane na zewnątrz. Całość jest sprasowana w podwyższonej temperaturze na grubość ok. 1 mm. Kanalikami w elektrodach doprowadzane są substraty i odprowadzana woda lub para wodna. Ogniwia te charakteryzują się niską temperaturą pracy (<100 °C), niewielką masą oraz krótkim czasem rozruchu. Jako źródła wytwarzania energii, umożliwiają osiągnięcie mocy ok. 200 kW przy sprawności rzędu 34%. Ogniwia te wykorzystywane są do napędzania autobusów i samochodów.

Elektrochemiczne reakcje zachodzące w ogniwie PEM są następujące:



Budowa i działanie ogniwa PEMFC

Aby ogniwo mogło pracować niezbędne jest dostarczenie paliwa jakim jest wodór. Wodór dostarczany jest do jednej elektrody (anody), a tlen spełniający rolę utleniacza do drugiej (katody). Na anodzie następuje rozpad wodoru na atomy, które następnie w obecności katalizatora platynowego dzielą się na protony i elektrony. Protony i elektrony wędrują w kierunku katody, ale w odmienny sposób. Protony przenikają przez membranę spełniającą rolę elektrolitu, a elektrony poruszają się zewnętrznym obwodem wytwarzając energię elektryczną. Ostatecznie całość przechodzi do katody gdzie łącząc się z tlenem tworzy wodę. Średnia wartość napięcia wytwarzana przez pojedynczą celkę tego typu urządzenia kształtuje się w granicach 0,7V, a gęstość mocy jest znacznie wyższa w porównaniu z innymi ogniwami. Zasadę pracy PEMFC przedstawia rys.2.



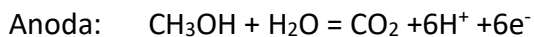
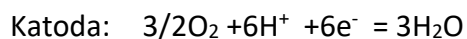
Rys.2. Zasada działania ogniwa PEMFC.

Ogniwo paliwowe zasilane bezpośrednio metanolem (DMFC - Direct-Methanol Fuel Cell)

Ogniwa paliwowe tego rodzaju są specjalną odmianą ogniw paliwowych z membraną protonowo przewodzącą. Posiadają one podobną strukturę do PEM, a różnicę stanowi rodzaj użytego paliwa (metanol). Metanol nie jest reformowany lecz dostarczany bezpośrednio do ogniwa.

Elektrolitem w ogniwie DMFC jest spolimeryzowany fluorkowy kwas sulfonowy w postaci membrany pokrytą porowatą platyną. Elektroda anodowa oprócz platyny pokrywana jest również rutenem. Zadaniem tych katalizatorów jest chemisorpcja metanolu i wody oraz pozabawienie ich elektronów. Ruten rozkłada cząsteczkę wody, a platyna metanol. Ogniwo to pracuje w temperaturze 90-120 C przy ciśnieniu 1 bara.

Elektrochemiczne reakcje zachodzące w ogniwie są następujące:



Zakres zastosowania ogniw paliwowych niskotemperaturowych

Ogniwa paliwowe niskotemperaturowe mogą z powodzeniem zastąpić małe mobilne generatory energii elektrycznej i ciepła. Sprawdzają się doskonale jako wytwornice prądu elektrycznego w silnikach hybrydowych samochodów osobowych (lub całkowicie elektrycznych) i dostawczych. Są świetnym źródłem zasilania urządzeń elektronicznych tj.: komputery, telefony. Zastosowane jako małe, przydomowe generatory energii elektrycznej i ciepła niezależniają od ograniczeń dostaw prądu, wpływając na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń z małych kotłowni. Aby w pełni rozwinęła się ta technologia konieczne

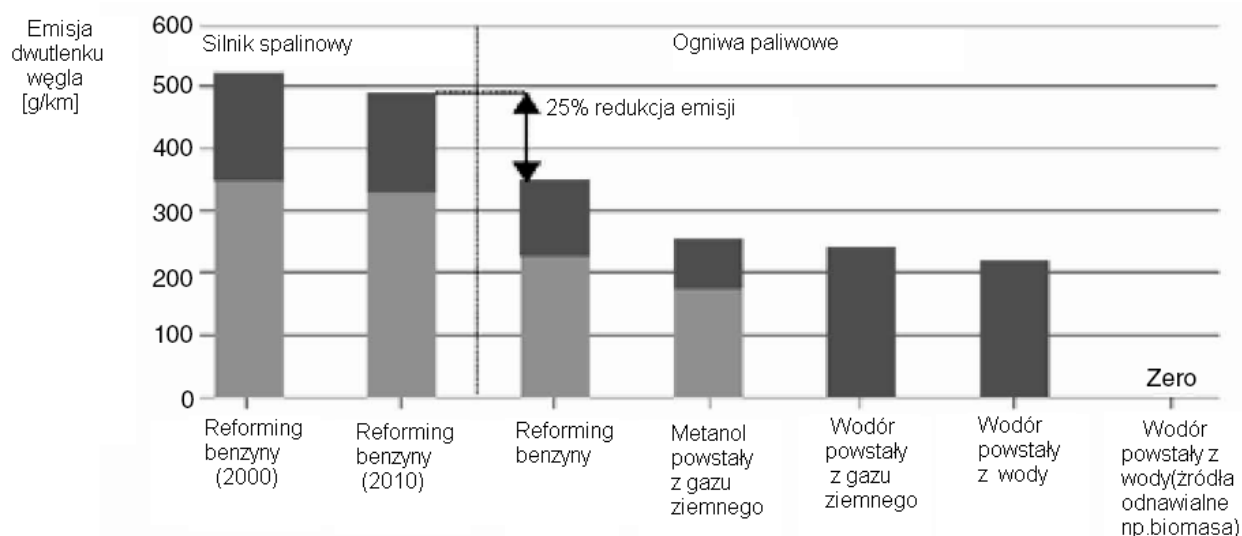
jest, aby ogniwa paliwowe były tańsze, co jest związane z kosztem produkcji poszczególnych elementów np. membrany ale przede wszystkim aktywnych katalitycznie elektrod.

Koszty i analiza ekonomiczna ogniw PEM

Pomimo licznych ulepszeń na przestrzeni lat (tzn. zmniejszenie grubości błony elektrolitowej) koszt membran pozostaje na wysokim poziomie. Jednym z przykładów mogą być membrany Nafion®, których cena kształtuje się w granicach od 500 do 1000 \$ za m² w zależności od wielkości zamówienia, czyli ok. 100\$ za 1 kW wytwarzanej energii elektrycznej. Szacuje się jednak, że koszt membrany będzie się zmniejszać wraz ze wzrostem wielkości produkcji.

Wpływ na środowisko

Najbardziej atrakcyjną cechą ogniw paliwowych jest ich minimalny wpływ na środowisko podczas pracy. Ciekawe porównanie przedstawiono na rysunku 3, na którym możemy zaobserwować różnicę w wytwarzaniu gazów cieplarnianych przez ogniwa paliwowe oraz silniki spalinowe. Jeśli jako pierwotne paliwo do pracy ogniw paliwowych użyjemy czystego wodoru, emisja gazów cieplarnianych jest praktycznie zerowa.



Rys.3. Emisja gazów cieplarnianych (Industry Canada, "Canadian Fuel Cell Commercialization Roadmap," March, 2003.)

Czas życia ogniw

Kolejnym kluczowym problemem w technologii ogniw paliwowych jest ich dość szybkie starzenie się. Zanieczyszczenia zawarte w paliwie powodują stopniowe zatykanie się porowatych elektrod, co w konsekwencji ogranicza przepływ jonów wodoru i tlenu, zmniejszając wydajność prądową. Konstruktorzy starają się stworzyć zestawy o żywotności nie mniejszej niż 40 000 godzin, co będzie oznaczało konieczność wymiany całego zestawu co 5-7 lat.

3. Opis wykonania ćwiczenia

Istotne wielkości i parametry związane z pracą ogniwa

Siła elektromotoryczna [V] – jest to różnica potencjałów między elektrodami ogniwa odwracalnego, gdy stan równowagi obu elektrod zostanie zachowany. Aby takie zjawisko miało miejsce przez ogniwo musi płynąć nieskończenie mały prąd lub ogniwo musi być pozbawione obciążenia. Siłę elektromotoryczną ogniwa SEM definiuje się jako:

$$\text{SEM} = -\Delta G / q$$

gdzie: ΔG - zmiana entalpii swobodnej, q - ładunek elektryczny

Rezystancja (opór) - oznaczmy ją symbolem R . Jest miarą oporu czynnego, z jakim element (opornik) przeciwstawia się przepływowi prądu elektrycznego. Rezystancję możemy zdefiniować jako:

$$R = U / I$$

gdzie I - natężenie prądu elektrycznego, U - napięcie prądu elektrycznego.

Moc ogniwa P – określamy jako iloczyn napięcia i natężenia prądu płynącego przez ogniwo. Jednostką mocy jest wat [W]. Moc ogniwa możemy określić następującym wzorem: $P = U \cdot I$

Sprawność energetyczna η – stosunek wartości energetycznej otrzymanego wodoru do ilości energii elektrycznej potrzebnej do jego wytworzenia.

Sprawność faradajowska K elektrolizera jest to stosunek ładunku elektrycznego zawartego w wytworzonym paliwie (w wodrze $2e/H_2$) do ładunku elektrycznego który przepłynął przez elektrolizer. Część ładunku elektrycznego z dostarczanego prądu bierze udział w reakcjach ubocznych zachodzących w elektrolizerze, z tego powodu ładunek elektryczny zawarty w wytworzonym paliwie jest zawsze mniejszy od ładunku elektronów dostarczonego do elektrolizera.

Sprawność ta informuje nas jaki procent energii paliwa jest bezpośrednio użyty na wytworzenie energii elektrycznej w procesie elektrochemicznego utleniania. Sprawność faradajowska jest przeważnie bardzo wysoka, najczęściej przekracza 0,95.

Procedury pomiarowe

Celem pomiarów jest zbadanie charakterystyk ogniwa paliwowego z membraną protonowo przewodzącą (PEM) pracującego zarówno jako wytwornica wodoru oraz jako generator elektryczności.

W części pierwszej ćwiczenia należy, posługując się stabilizowanym zasilaczem prądu stałego (HAMEG HM8143), zasilać ogniwo PEM napięciem ok. 1,7V i prądem 100mA celem wytwarzania wodoru podczas elektrolizy wody dzięki dostarczeniu zewnętrznej energii. W zbiorniczku na wodór ustawić poziom gazu na ok. 5 cm³ a następnie podłączyć zasilacz. Zmierzyć czas potrzebny do wytworzenia 20 cm³ wodoru; co 1 min odczytywać wartość napięcia i natężenia prądu.

W części drugiej ćwiczenia należy odczytywać wartości napięcia i natężenia prądu płynącego przez zmienny opornik R (w zakresie od $R=100\Omega$ do 10Ω z krokiem 5Ω ; poniżej 10Ω z krokiem 1Ω) który stanowi obciążenia ogniwa PEM zasilanego wodorem wytworzonym w pierwszej części ćwiczenia. W tym celu napełnij zbiorniki wodoru i tlenu z elektrolizera. Przed pomiarem dokładnie przepłucz elektrody ogniwa wodorem i tlenem ze zbiorników tak, aby usunąć krople wody i powietrza.

4. Sposób przygotowania sprawozdania

1. Część wstępna (teoretyczna) powinna zawierać dokładne omówienie wzorów i procesów bezpośrednio związanych z wykonaniem ćwiczenia i wykonywanymi obliczeniami.
2. Zamieścić rysunki połączeń układu eksperymentalnego użytego w każdej z części ćwiczenia.
3. Przedstawić wyliczenia parametrów pracy ogniwa:

Obliczanie sprawności energetycznej η :

$$\eta = E_{\text{wodoru}} / E_{\text{elektryczna}}$$
$$\eta = V_{H_2} \cdot H_b / U_{sr} \cdot I_{sr} \cdot t$$

H_b –wartość opałowa wodoru = $12,745 \cdot 10^6$ [J/m³]

V_{H_2} – ilość wyprodukowanego wodoru [cm³]

U – napięcie prądu [V]

I – natężenie prądu [A]

t – czas [s]

Obliczanie sprawności faradajowskiej K.

Do obliczenia sprawności faradajowskiej potrzebne będą :

II Prawo Faradaya:

$$Q = I \cdot t = n \cdot z \cdot F$$

Równanie stanu gazu doskonałego

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Przekształcając dwa powyższe wzory możemy obliczyć teoretyczną ilość wytworzonego wodoru.

$$V = R \cdot I \cdot T \cdot t / F \cdot p \cdot z$$

gdzie:

V - teoretyczna ilość powstałego wodoru [m³]

R - uniwersalna stała gazowa = $8,314$ [J/mol·K]

p - wartość ciśnienia atmosferycznego = $1,013 \cdot 10^5$ [Pa]

F - stała Faradaya = 96485 [C/mol]

T - temperatura otoczenia = 298 [K]

I - natężenie prądu [A]

t - czas [s]

z - liczba elektronów

$$V_{(\text{teoretyczne})} = R \cdot I_{\text{sr}} \cdot T \cdot t / F \cdot p \cdot z$$

Sprawność Faradaya obliczymy przez stosunek objętości wodoru powstałego w doświadczeniu do objętości, która powinna zostać teoretycznie wytworzona:

$$K = V_{\text{H}_2 \text{ wytworzone}} / V_{\text{H}_2 \text{ teoretyczne}}$$

Wyznaczenie krzywej pracy

1. Narysować wykres napięcie ogniwa w funkcji prądu $U(I)$ oraz mocy w funkcji prądu $P(I)$.
2. Wyznacz wartość prądu, dla której jest osiągnięta największa moc.

5. Lista pytań do kolokwium pisemnego

1. Jaki jest cel ćwiczenia i na czym polega jego wykonanie?
2. Co to jest ogniwo paliwowe?
3. Rodzaje ogniw paliwowych
4. Zasady klasyfikacji ogniw paliwowych
5. Reakcje elektrodowe w ogniwach paliwowych niskotemperaturowych
6. Reakcje elektrodowe w ogniwach paliwowych wysokotemperaturowych
7. Co to jest sprawność energetyczna i sprawność faradajowska ogniwa?
8. Budowa ogniwa PEMFC oraz reakcje zachodzące w ogniwie
9. Czym określone jest SEM i ile wynosi sprawność różnych ogniw paliwowych?
10. Zalety i wady ogniw paliwowych

6. Literatura

1. P. Piela, A. Czerwiński, *Przem. Chem.* 2006, 85, 13.
2. P. Piela, A. Czerwiński, *Przem. Chem.* 2006, 85, 164.
3. Appleby, A.J. and Foulkes, F.R., *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
4. Larminie, J. and Dicks, A., *Fuel Cell Systems Explained*, John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 2000.
5. Penner, S.S., Ed., *Commercialization of fuel cells*, *Energy: Int. J.*, 20(5), Pergamon Press, New York, 1995.
6. European Commission, *A Fuel Cell Research, Development and Demonstration Strategy for Europe up to 2005*, Belgium, 1998.