

## Ogniwo paliwowe PEM

OP

1. Cel i opis

Ogniwo paliwowe PEM wytwarza energię elektryczną z wodoru i tlenu. Rdzeń ogniwa składa się z protonowoprzewodnościowej membrany (PEM-PROTONY-WYMIANA-MEMBRANA) znajdującej się między elektrodami, które powleczone są z materiału katalizatora.

Takie ogniwo paliwowe powstało do celów demonstracyjnych i dydaktycznych, inne wykorzystanie tego ogniwa jest niezalecane.

Ogniwo paliwowe jest zaprojektowane dla temperatury otoczenia i ciśnienia gazu, które odpowiada około (w przybliżeniu) ciśnieniu otoczenia. Paliwo to może służyć do demonstracji jego funkcji oraz można określić (wyznaczyć) jego charakterystykę prądowo-napięciową oraz można wyznaczyć jego sprawność.

2. Wskazówki bezpieczeństwa

Do pracy z ogniwa paliwowego konieczny jest wodór i tlen. Zamiast tlenu może zostać wykorzystane powietrze. Muszą być przestrzegane ogólne przepisy bezpieczeństwa przy obchodzeniu się wodorem i tlenem. Należy uważać aby nie nastąpił wybuch.

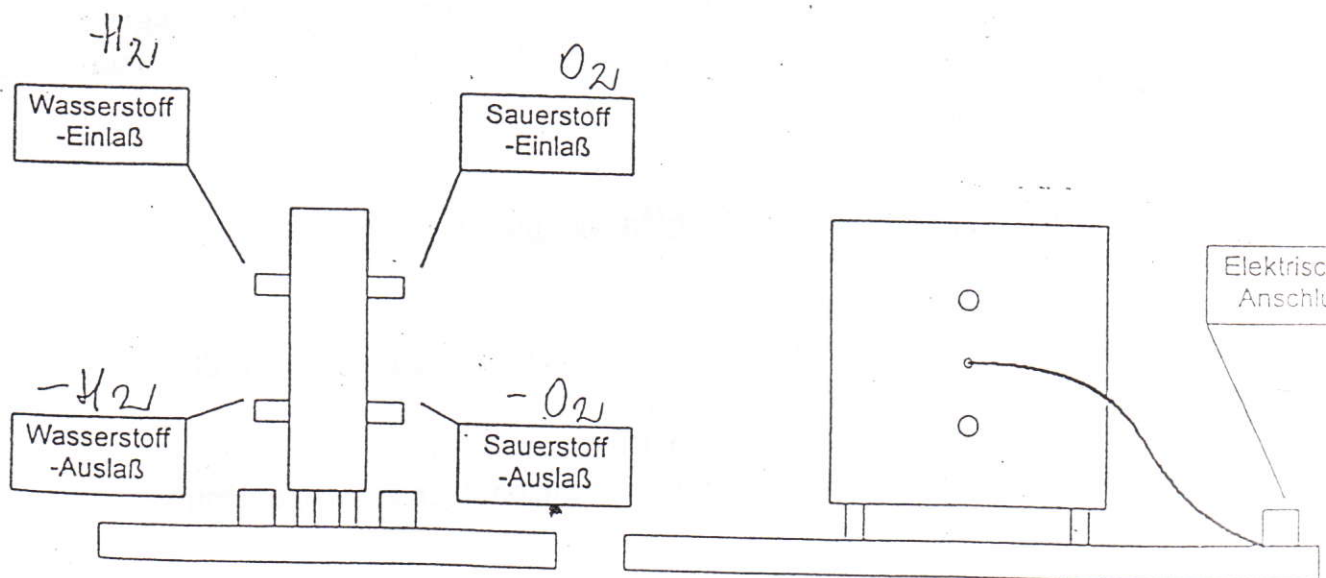
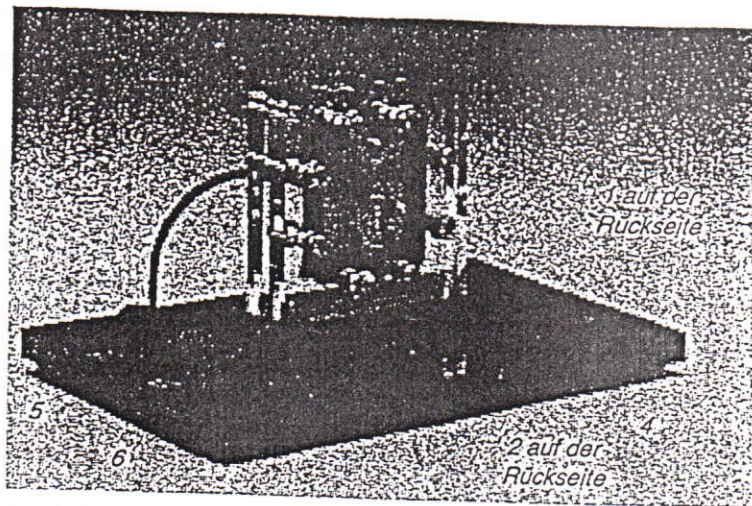
3. Funkcje i elementy obsługi (Elementy budowy)

1. Wejście - króciec doprowadzenia wodoru
2. Wyjście - króciec do wyprowadzenia niezużytego wodoru i do odpływu powstałej wody
3. Wejście - króciec do doprowadzenia tlenu
4. Wyjście - króciec do wyprowadzenia nie zużytego tlenu i odprowadzenia powstałej wody
5. 4 mm - gniazdko (-)
6. 4 mm - gniazdko (+)

4. Używanie (Posługiwanie się)

Do demonstracji wytwarzania energii elektrycznej z ogniwa paliwowego PEM, właściwe jest doprowadzenie do jednej strony wodoru, podczas gdy na

73



Rys. 1

drugiej stronie dyfunduje powietrze przez otwarty króciec. Przez wytworzenie energii elektrycznej może obracać się np. mały silnik (2-V silnik 11031.00 z tarczą).

Do pomiaru charakterystyki elektrycznej ogniwa paliwowego, powinno się do drugiej strony doprowadzić tlen.

#### Uwagi:

- do ogniwa nie powinno zostać przyłożone napięcie
- powinno unikać się zwarcia ogniwa (max. 10 sek.)
- do celi powinna dostawać się tylko woda destylowana (odmineralizowana  $< 2\mu\text{S}/\text{cm}$ ) nie wolno używać wody z wodociągu (bieżącej), kwasu ani ługu
- przy doprowadzeniu wodoru do ogniwa paliwowego uważać aby w wężu doprowadzającym był tylko wodór, a nie powietrze dlatego, że mogłoby wodór z tlenem zawartym w powietrzu reagować bezpośrednio przy elektrodzie, co mogłoby prowadzić do uszkodzenia membrany.

#### 5. Sposoby zaopatrzenia w gaz

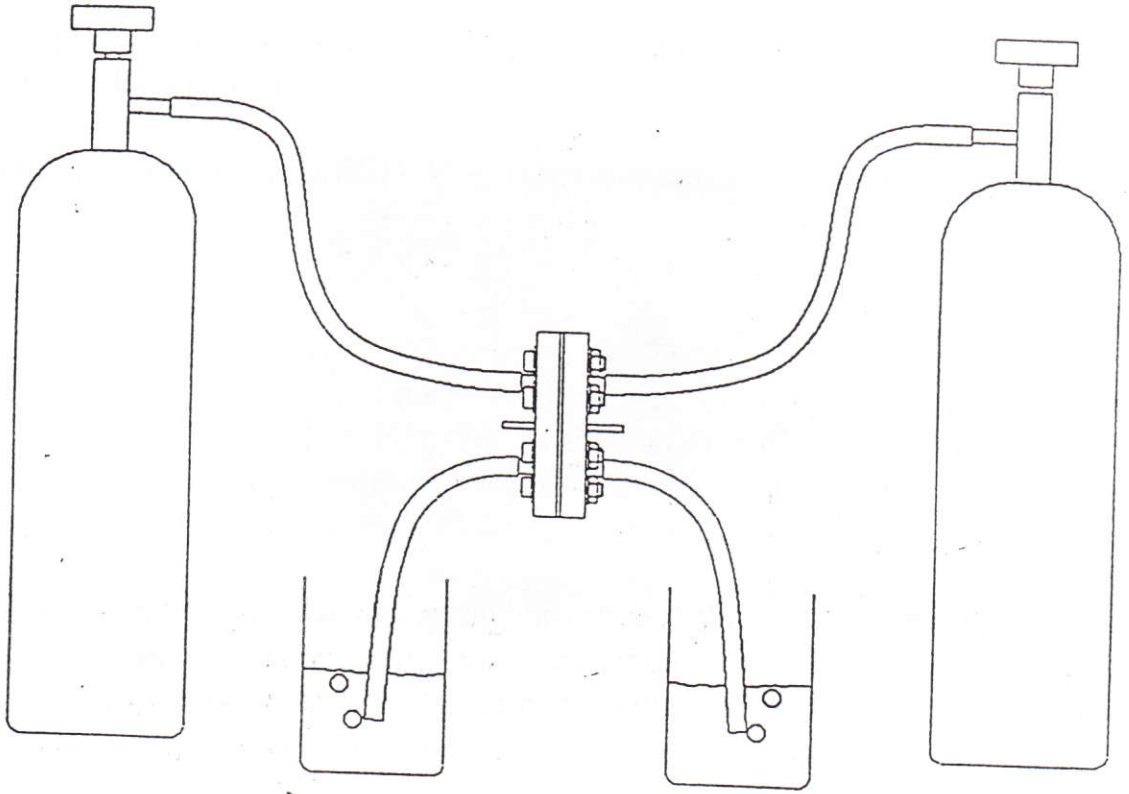
Przy zaopatrzeniu ogniwa gazem wyjścia 2 i 4 muszą być albo zamknięte albo otwarte. Wyjścia mogą pozostać otwarte wtedy, gdy gaz jest w ciągłej dyspozycji (jest w dużych ilościach do dyspozycji) i strumień gazu jest wprowadzany przez zawór.

Przykłady:

- butla ciśnieniowa z precyzyjnym zaworem regulującym
- elektrolizer (wanna elektrolityczna).

Wyjścia będą (muszą być) zamknięte jeżeli wodór przy otwartym wyjściu będzie szybko się ulatniał (duża ilość wodoru będzie szybko niewykorzystana). Dzieje się tak w przypadku „małych gazometrów” (małych zbiorników gazu), dla których małe ilości gazu pod małym (niskim) nadciśnieniem są do dyspozycji. Poza tym wyjścia muszą być zamknięte przy badaniu sprawność ogniwa - przy określaniu ilości zużywanego gazu (patrz eksperyment „Pomiar sprawności”).

Rys.2. Zaopatrzenie ogniwa paliwowego przez butlę gazową z precyzyjnym zaworem regulacyjnym.



Rys. 2

Butle gazowe z zaworem precyzyjnym lub butle stalowe z zaworem redukcyjnym. Przy ich zastosowaniu wymagany jest mały strumień gazu. Butle gazowe są podłączone przez wąż silikonowy lub gumowy z górnymi króćcami. Dla kontroli zużycia gazu muszą być także na dolne króćce podłączone węże, które doprowadzają nie zużyty gaz do wody destylowanej znajdującej się w zbiornikach. Wystarczającym jest otwarcie zaworów butli tak daleko aby ok. 10 sek. bąbelki gazu ulatywały (wylatywały) - rys. 2.

## 2. Wanna elektrolityczna (elektrolizer)

Wanna elektrolityczna (elektrolizer) jest najprostszym, zalecanym sposobem zaopatrzenia ogniwa paliwowego w gaz (numer zamówienia 06748.00).

Jest ona bezpieczna i zapewnia, iż w węźu połączeniowym do ogniwa nie będzie powietrza. Osiąga się to przez to iż wanna elektrolityczna produkuje już parę minut gaz (dla natężenia prądu 1 A - 2 min. dla 100 mA (baterie słoneczne) ok. 20 min.) zanim węże zostaną przyłączone do ogniwa.

Dla kontroli tego procesu muszą zostać węże całkowicie wypełnione wodą, która zostanie potem wyparta przez produkowane gazy (dokładny opis w rozdziale „Eksperyment - „charakterystyka”).

Przy zaopatrywaniu w gaz z wanien elektrolitycznych z alkalicznego lub kwaśnego elektrolitu (np. z aparatu do rozkładu wody typu Hoffmanna) musi zawsze z przyczyn bezpieczeństwa być zastosowana płuczka laboratoryjna (wodna).

## 3. Gasbar (ciśnieniowe zbiorniki gazu) - numer zamówienia 40466.00

Ciśnieniowe zbiorniki gazu składają się z dwóch małych zbiorników gazów w których mogą być magazynowane np. wodór i tlen. Gazy mają w tych zbiornikach nadciśnienie do 25 hPa (25 cm H<sub>2</sub>O). Po to aby gazy nie były szybko niewykorzystane przez ogniwo paliwowe, muszą króćce wyprowadzające ogniwa zostać zamknięte (dokładny opis w rozdziale Eksperyment - „Sprawność”).

## 4. Zbiornik wodoru metolu

Przy dłuższym przechowywaniu jest zbiornik wodoru metolu zabezpieczany przez klapę zamykającą. Do pobierania wodoru musi być wykorzystany łącznik (lub zawór regulujący - numer zamówienia 06745.10). Łącznik zanim będzie dokręcany (nakręcany) do zbiornika wodoru metolu musi zostać przez prawoskrętną śrubę nastawczą, kluczem imbusowym zamknięty. Potem będzie śruba nastawcza ostrożnie odkręcona i wyjście gazu kontrolowane przez zanurzenie do zbiornika wody. Wystarczającym jest aby 1 pęcherzyk gazu raz na sekundę wychodził. Na końcu będzie (zostanie) zbiornik wodoru metolu przez wąż połączony do wejścia ogniwa. Zbiornik wodoru metolu może pracować z otwartym lub zamkniętym wyjściem ogniwa

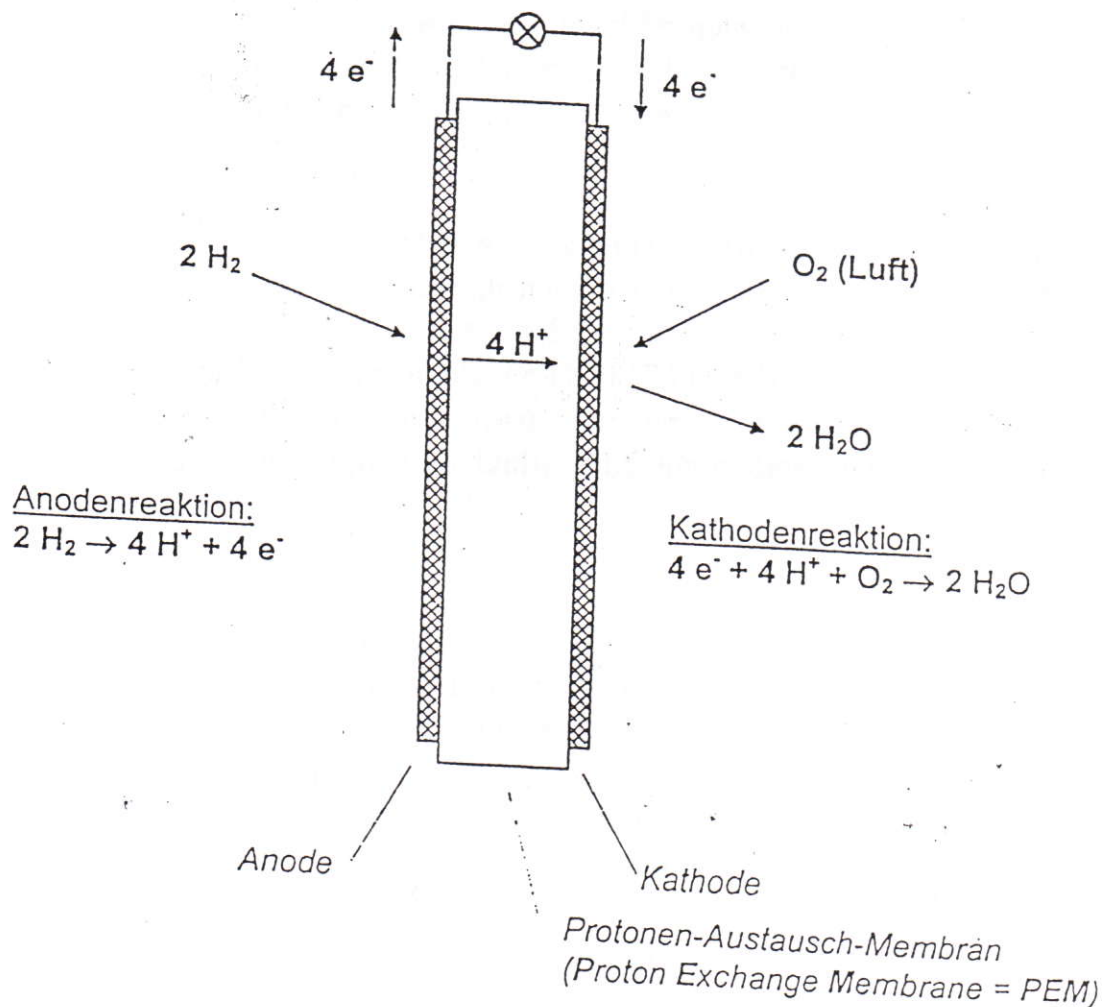
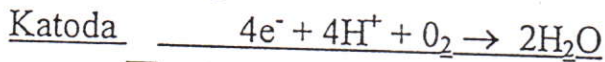
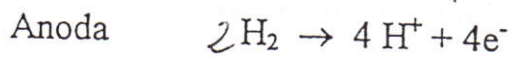
paliwowego tak, że nadciżnienie gazu doprowadzonego, które wynosi ok. 600 hPa nie powoduje uszkodzenia ogniwa.

5. Sposób funkcjonowania ogniwa paliwowego PEM

Rdzeń ogniwa jest jednolitą elektrodową membraną. Na cienką protonowoprzewodnościową membranę jest na obu jej stronach naniesiona warstwa z materiału katalizatora. Te obie warstwy tworzą anodę i kontrolę elektrochemicznego ogniwa.

W ogniwie paliwowym zostaje przekształcona energia chemiczna w formie wodoru i tlenu „bezpośrednio” tj. bez spalania w energię elektryczną. Wodór i tlen przereagowują do wody i oddają prąd i ciepło.

Odbywa się następująca reakcja (rys. 3).



Rys. 3. Zasada działania ogniwa paliwowego PEM.

Wprowadzony na anodę wodór w formie gazowej utlenia się, rozpada się przez katalityczne oddziaływanie elektrody (np. platyny) na jony  $H^+$  i elektrony). Jony  $H^+$  (protony) przedostają się przez protonoprzewodnościową membranę do katody. Elektrony wędrują przez zamknięty obwód do katody i wykonują na tej drodze pracę elektryczną. Wprowadzony na katodę tlen zostaje zredukowany gdzie razem z jonami  $H^+$  i elektronami tworzy wodę.

Wanna elektrolityczna (elektrolizer) PEM pracuje odwrotnie: z energii elektrycznej jest wytworzony wodór i tlen. Techniczne wyprowadzenie (sposób wyprowadzenia) elektrod jest jednak inny. Na PEM - ogniwo paliwowe nie powinno przykładać się napięcia - ono nie pracuje jak wanna elektrolityczna.

## 6. Konserwacja (Dogład)

Ogniwo paliwowe nie wymaga szczególnych konserwacji (dogład). Należy zwrócić uwagę na następujące punkty:

- nigdy nie przykładać zewnętrznego napięcia do ogniwa (może to spowodować natychmiastowe jego uszkodzenie)
- ogniwo powinno być zawsze wilgotne. Idealnym jest obecność kropli wody na płycie z tworzywa sztucznego. Dla uniknięcia wysuszenia zaleca się zamknąć połączenia gazowe, np. króćce wejściowe i wyjściowe węzłem razem (ze sobą) połączyć. Wysuszona membrana nie szkodzi ogniwu.

Na początku pracy charakteryzuje się ono jednak wyraźnie gorszą sprawnością (wydajnością). Najszybszym i najprostszym zwilżeniem ogniwa paliwowego jest dmuchnięcie na niego. Ogniwo samo się zwilża w czasie pracy i po ok. 15 min. osiąga znowu dobrą sprawność (wydajność). Ogniwo paliwowe można uważnie wodą ze spryskiwacza nawilżyć.

- za dużo wilgoci szkodzi ogniwu. Stojąca w ogniwie woda musi zostać przedmuchana (wydmuchana).

## 7. Dane techniczne

Ogniwo paliwowe PEM do wytwarzania energii elektrycznej z wodoru i tlenu lub powietrza .

Powierzchnia elektrod	-	16 cm <sup>2</sup>
Moc	-	1 W
Napięcie jałowe	-	0,9 V
Zwarcie	-	do ok. 10 s.

## 8. Eksperymenty (Doświadczenia)

1. Określenie (ustalenie) charakterystyki ogniwa paliwowego typu PEM. Najprostszym zaopatrzeniem ogniwa paliwowego w gaz jest wanna elektrolityczna (elektrolizer). Możliwe jest także pobieranie gazu z ciśnieniowych zbiorników gazu jak to jest opisane przy określeniu „sprawności ogniwa”.

Materiały do tego eksperymentu	Nr zamówienia
- ogniwo paliwowe PEM	06747.00
- szafka (skrzynka) rozdzielcza	06030.23
- opór 10 om, obudowa G1	(2x) 06056.10
- opór 5 om, obudowa G1	06055.50
- opór 10 om, obudowa G1	(2x) 06055.10
- wtyczka zwierająca (połączeniowa) (czarna)	(2x) 06027.05
- wąż połączeniowy 50 cm, czerwony	(2x) 07361.00
- wąż połączeniowy 50 cm, niebieski	(2x) 07361.04
- wąż połączeniowy 75 cm, czerwony	(2x) 07362.01
- wąż połączeniowy 75 cm, niebieski	(2x) 07362.04

### Zaopatrzenie gazu przez wannę elektrolityczną (PEM):

- wanna elektrolityczna PEM 06748.00
- zasilacz sieciowy uniwersalny 13500.93
- wąż połączeniowy 50 cm, czerwony 07361.01
- wąż połączeniowy 50 cm, niebieski 07361.04
- spryskiwacz 500 ml 33931.00
- zbiornik 250 ml, tworzywo sztuczne 36013.01
- ok. 1 litra wody destylowanej  
(odmineralizowano  $\delta < 2 \mu\text{s/cm}$ )

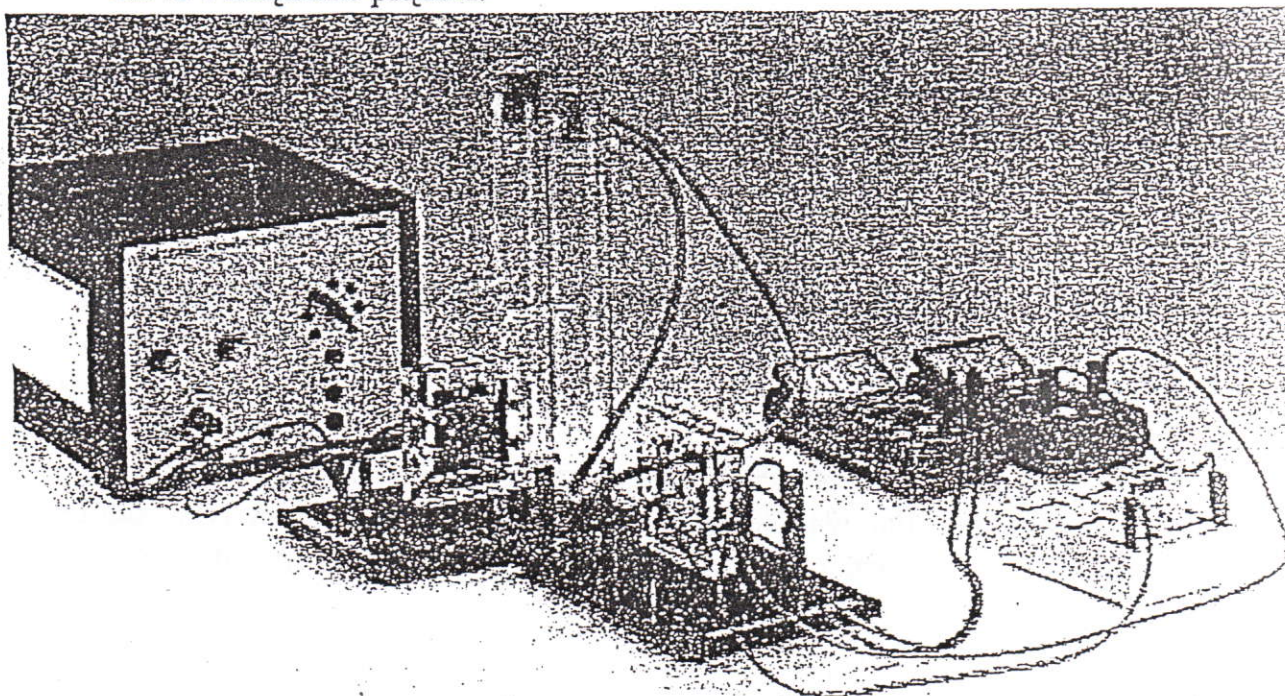
### Budowa i przeprowadzenie

- stanowisko badawcze przedstawiono na rysunku 4, schemat połączeniowy na rysunku 5
- przygotowanie wanny elektrolitycznej:  
do górnych wylotowych króćców zasobnika wanny elektrolitycznej podłączyć węże silikonowe. Obydwa zasobniki napełnić wodą destylowaną aż do górnego znacznika - wąż trzymać wysoko, tak aby się napełnił wodą). Korek gumowy zatknąć na zasobniki tak aby nie utworzyły

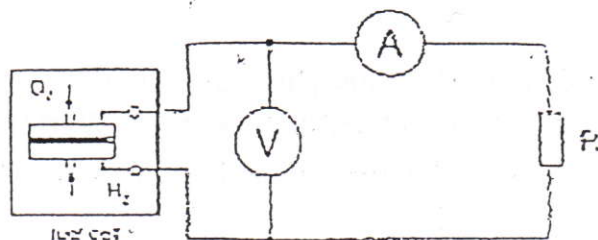


się żadne pęcherzyki gazowe pod korkiem i mocno zacisnąć. Wężę wypełnione wodą trzymać w zbiorniku z wodą destylowaną. Wanę elektrolityczną (elektrolizer) według rysunku 4 podłączyć do zasilacza sieciowego i ustawić natężenie prądu 2A względnie napięcie pracy max 2V.

- gdy wodór i tlen w zbiorniku zaczynają wychodzić przez wężę, ścisnąć wężę i do górnych króćców ogniwa paliwowego podłączyć.
- Uwaga: ewentualnie znajdujące się krople wody w wężach mogą zahamować dopływ gazu do ogniwa, należy zmniejszyć napięcie wyjściowe do stanu początkowego. Wężę na krótko podnieść po to aby woda się wylała.
- Dane elektryczne ogniwa zależą od przepływu gazu i wilgotności membrany. Dla wytworzenia stabilnego stanu pracy ogniwo powinno przed wyznaczeniem charakterystyki ok. 5 minut pracować w stanie jałowym i potem ok. 5 min. ze stałym obciążeniem np. 2  $\Omega$ .
  - według rysunku połączeniowego 5 podłączyć do ogniwa różne wielkości oporu obciążeniowego i mierzyć każdorazowo napięcie  $U$  i natężenie prądu  $I$ .



Rys. 4. Stanowisko do wyznaczenia charakterystyki.



Rys. 5. Wyznaczenie charakterystyki ogniwa typu PEM (schemat połączeniowy).

Najpierw mierzyć napięcie jałowe, a następnie wykonać szereg pomiarów zaczynając od największych wartości oporu. Jeżeli opór wewnętrzny amperomierza jest nie do zaniedbania w stosunku do oporu obciążeniowego powinno się zawsze do pomiarów 10 A - zakres miernika wykorzystać. Jeżeli nie jest doprowadzona wystarczająca ilość gazów do ogniwa to dla oporów obciążeniowych  $< 1 \Omega$  napięcie i natężenie prądu mogą być niestabilne. Przed pomiarem powinien być obwód prądowy (elektryczny) otwarty ok. 30 sekund, po to aby zagwarantować dobre zaopatrzenie w gaz. Powinno się unikać zwarcia ogniwa paliwowego (max. 10 s.).

### Wyniki pomiarów

Tabela R/ $\Omega$	Kombinacje	u/V	I/A
-----------------------	------------	-----	-----

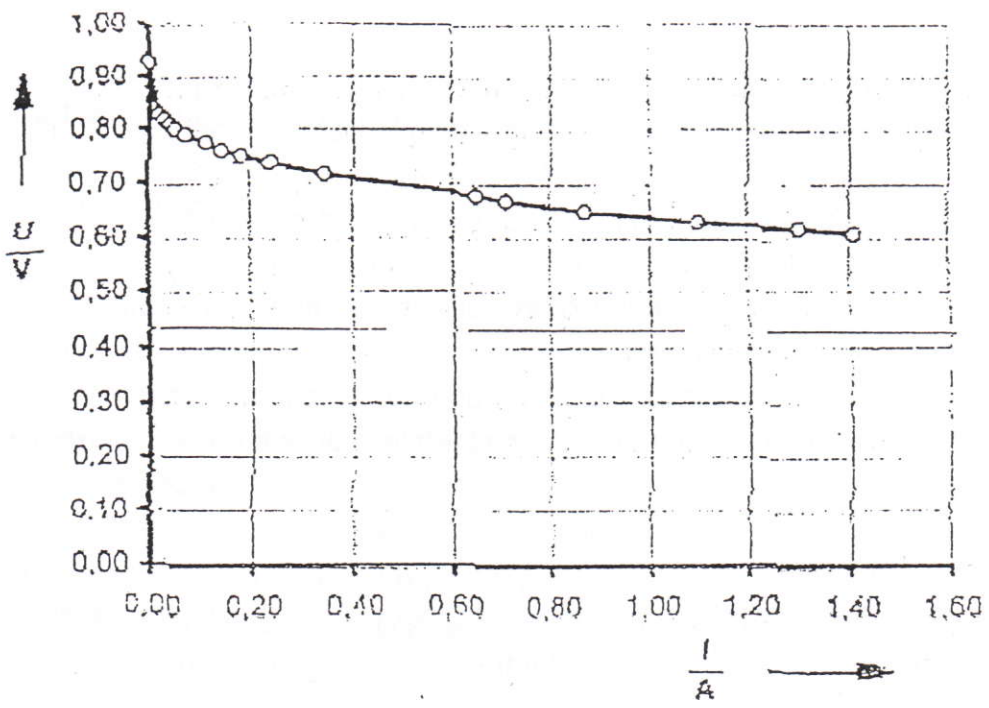
Wydajność ogniwa paliwowego zależy od ciśnienia gazów, ich przepływu wilgotności. Wartości pomiarowe z tabeli przedstawia rys. 6. Napięcie jałowe wynosiło  $U_0 = 0,93 \text{ V}$ .

Rys. 6. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa paliwowego typu PEM.

Przy dużych natężeniach prądu charakterystyka  $U = f(I)$  na rys. 6 jest w przybliżeniu liniowa. Jeżeli w tym zakresie charakterystyka odbiega od liniowej, to oznacza, że dopływ tlenu i wodoru do ogniwa jest niewystarczający.

### Wykorzystanie (ocena)

Między elektrodami na której znajdują się tlen i wodór powstaje różnica potencjałów  $\Delta E$ . Zależy ona od temperatury. Wartość teoretyczną  $\Delta E$  można obliczyć z potencjału termodynamicznego i wynosi ona dla  $t = 25^\circ\text{C}$ ,  $\Delta E = 1,23 \text{ V}$ .



Przy ogniwie może być napięcie zaciskowe maksymalnie tak duże jak obliczone, teoretyczna wartość. Napotyka się jednak dodatkowe skoki potencjału:

- w równowadze elektrochemicznej występuje tzw. graniczna różnica potencjałów między elektrodą i membraną. Przy tym odbywa się stała (ciągła) wymiana ładunków między elektrodą i membraną, ale sumaryczna reakcja (reakcja brutto) równa się zero.

Dodatkowy prąd płynący przez ogniwo paliwowe zakłóca równowagę elektrochemiczną na elektrodzie. Potencjał elektrody przyjmuje przez różne reakcje inną, zależną od gęstości prądu wartość. Odbieganie (odchylenie) od równowagi nazywa się „Elektryczną Polaryzacją” - elektroda zostaje spolaryzowana. Charakterystyka ogniwa paliwowego, dlatego przy przejściu na większe prądy przyjmuje, przybliżony, liniowy przebieg, w tym zakresie wędrówka jonów przez membranę jest miarodajna.

## 2. Określenie sprawności ogniwa paliwowego paliwowego typu PEM

Zaopatrzenie ogniwa paliwowego w wodór i tlen może odbywać się także za pomocą „ciśnieniowych zbiorników gazu” tak że zużycie wodoru i tlenu może zostać zmierzone.

„Ciśnieniowe zbiorniki gazu” mogą być napełnione za pomocą wonnej elektrolitycznej (elektrolizera) typu PEM, lub prosto z butli ciśnieniowej.

Dla tego eksperymentu lepsze są węże gumowe niż silikonowe, ponieważ przez węże silikonowe jest większa dyfuzja gazów (wodór dyfunduje na zewnątrz, azot do wnętrza).

<u>Materiały</u>	<u>Numer zamówienia</u>
ogniwo paliwowe typu PEM	06747.00
szafka rozdzielcza	06030.23
opór 2 $\Omega$ , obudowa G1	06055.20
zbiornik ciśnieniowy gazu	40466.00
wąż gumowy $d_i = 4$ mm	39282.00
wąż gumowy $d_i = 6$ mm	39280.00
zaciski na wąż, szerokość 10 mm	(4x) 43631.00
łączniki węzłów 9 redukcje) 3-6/7-11 mm	(2x) 47517.01
śpryskiwacz 500 ml	33931.00
zbiornik (kubek) 250 ml, tworzywa sztuczne	36013.01
stoper	03071.00
urządzenie do ręcznego pomiaru ciśnienia	07136.00
termometr	38056.00
multimetr cyfrowy	(2x) 07134.00

wąż połączeniowy 50 cm, czerwony	(2x) 07361.00
wąż połączeniowy 50 cm, niebieski	07361.04
wąż połączeniowy 75 cm, czerwony	07362.01
wąż połączeniowy 75 cm, niebieski	07362.04

ok. 1 litr wody destylowanej (odmineralizowanej)  
wody  $\delta < 2 \mu\text{s/cm}$ )

#### do napełniania zbiorników ciśnieniowych:

wanna elektrolityczna typu PEM	06748.00
uniwersalny zasilacz sieciowy	13500.93
wąż połączeniowy, 50 cm czerwony	07361.01
wąż połączeniowy, 50 cm niebieski lub puszka ciśnieniowa gazu.	07361.04

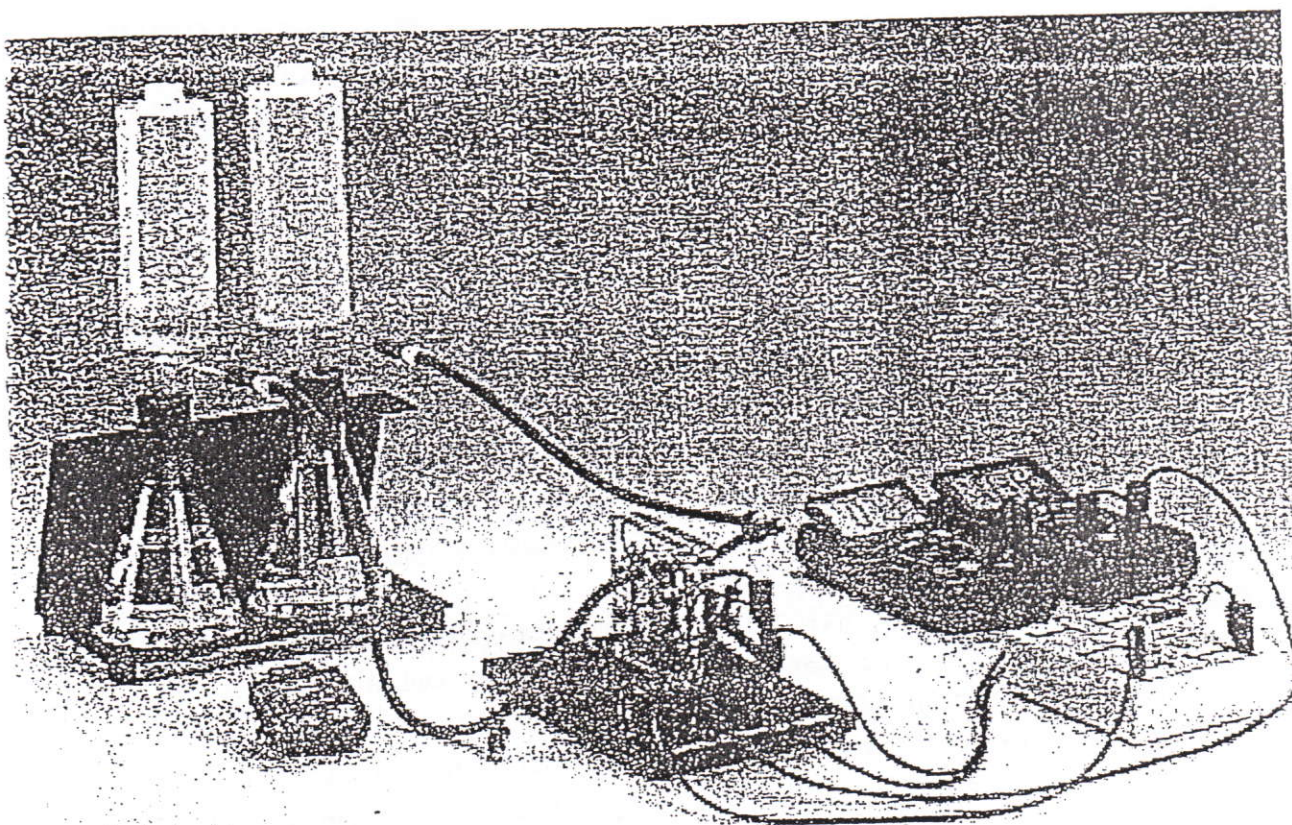
#### Budowa i przeprowadzenie

Przygotowanie ciśnieniowych zbiorników gazu z 2 gazometrami - jeden gazometr składa się z kolby Erlenmeyera z włożonymi cylindrycznymi lejkami i odchodzącej (wychodzącej) pod kątem prostym rurki szklanej, kształtką redukcyjną z krótkim węzłem gumowym ( $d = 6 \text{ mm}$ ) podłączyć do rurek szklanych. Oba gazometry każdorazowo przez cylindryczne lejki destylowaną wodą do kolby Erlenmeyera napełnić tak aby w prostopadłej wychodzącej rurce nie było pęcherzy. Nadmiar wody wypływa przez rurki szklane i powinien zostać odprowadzony do zbiornika.

Cylindryczne lejki posiadają znaczniki, oznaczające wysokość napełnienia. Zalecane jest kontrolowanie napełnienia wody kolb cylindrycznych do znaczników, po to aby znać objętość wypływającej wody.

- Przygotowanie wanny elektrolitycznej (elektroliza) odbywa się tak jak opisane jest w punkcie „Charakterystyka (wyznaczanie charakterystyki)”
- Gdy wodór i tlen wypływają z węży należy je krótko ścisnąć i przy małym gazometrze „zbiornika ciśnieniowego” zamknąć. Do określenia sprawności ogniwa powinny być oba gazometry możliwie do pełna wypełnione. Nadmiar gazów ponad 250 ml (pojemność małego gazometru) ulatnia się przez lejek na zewnątrz. Przeto może nie tylko  $\text{H}_2$  a także  $\text{O}_2$  gazometr bez problemu za pomocą wanny elektrolitycznej („elektroliza”) zostać napełniony do pełna. Po napełnieniu gazometrów wannę elektrolityczną odłączyć i węże zacisnąć z tyłu wanny elektrolitycznej.
- Budowę stanowiska przedstawia rysunek 7, a schemat połączeń - rys. 5.
- Dolne króćce wylotowe ogniwa paliwowego krótkimi węzami ( $d_i = 4 \text{ mm}$ ) i zaciskami zamknąć trwale.
- Górne króćce wlotowe ogniwa paliwowego każdy z gazometrem

- podłączyć.
- Zaciski na wężach połączeniowych między gazometrami i ogniwem otworzyć.
  - Według rysunku 5 opór obciążeniowy  $2\Omega$  podłączyć do ogniwa.
  - Ogniwo zużywa wodór i tlen w stosunku 2:1.
- Objętość  $V$   $H_2$  zużywanego wodoru zależy od czasu  $t$  pomiaru.



Rys. 7. Pomiar sprawności ogniwa (Budowa stanowiska).

Wskazówka:

Wartość napięcia i natężenia prądu nie są przez długi czas stałe, przeto zaopatrzenie w gaz jest gorsze. Wtedy zaleca się każdorazowo czas 25 ml wodoru zużywanego wodoru mierzyć i pomiędzy pomiarami ogniwo paliwowe wodorem i tlenem przepłukać.

- Na stronie tlenowej ogniwo zaciski na dolnym, wylotowym króćcu ostrożnie otworzyć i ok. 25 ml tlenu przepuścić; następnie zaciski zamknąć,
- potem w taki sam sposób przepuścić wodór, aż stan wody w cylindrycznym lejku ok. 1 mm nad znacznikiem będzie się znajdował i zaciski znowu zamknąć, jeżeli poziom wody przekroczy znacznik zacząć mierzyć czas i zatrzymać gdy zużyte jest 25 ml wodoru,
- napięcie  $U$  i natężenie prądu  $I$  na początku i na końcu przedziału pomiaru czasu mierzyć,
- ogniwo paliwowe przepłukać znowu z tlenem i wodorem i przeprowadzić pomiar czasu dla zużycia 25 ml wodoru,
- mierzyć temperaturę  $V$  wewnątrz pomieszczenia i ciśnienie otoczenia.

### Wyniki pomiarów

tabela (opór obciążeniowy  $2\Omega$ )

Potoczenia = 998 hPa

$V = 23^\circ\text{C}$ .

Znacznik	$V_{\text{H}_2}/\text{ml}$	$t/\text{min.,s}$	/	$V/V$	$I/A$
wartości średnie	$t = 540 \text{ s,}$	$U = 0,75 \text{ V}$		$I = 0,35 \text{ A}$	

### Wykorzystanie

Prawo Faradaya przedstawia zależność między potrzebną ilością materii  $n$  o natężeniu prądu  $I$  wytworzonego w czasie  $t$

$$n = \frac{I \cdot t}{z \cdot F} \quad (1)$$

gdzie:  $n$  - ilość materii (wodoru),  $I$  - natężenie prądu,  $t$  - czas,  
 $z = 2$  liczba elektronów w cząsteczce wodoru,  
 $F = 96487 \text{ A}_s/\text{mol}$  - stałe Faraday'a.

Objętość materii n można określić z ogólnego stanu gazu

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} \quad (2)$$

T - temperatura absolutna  
p - ciśnienie  
R = 8,31      gólna stała gazowa (uniwersalna)  
Z (1) i (2) wynika

$$\frac{V}{t} = \frac{I \cdot R \cdot t}{z \cdot F \cdot p} \quad (3)$$

Dla ogniwa paliwowego wyznaczenie objętości gazu w czasie t będzie konieczne po to aby mógł płynąć prąd I.

Do określenia sprawności ogniwa potrzebne jest obliczenie energii elektrycznej  $W_{el}$  i chemicznej wodoru  $W_{H_2}$ .

$$W_{el} = \mu \cdot J \cdot t \quad (4)$$

$$W_{H_2} = n \cdot H \quad (5)$$

gdzie:

U - napięcie, I - natężenie, t - czas,

n - ilość materii wodoru,

H - molowa wartość opałowa (molowa entalpia reakcji) wodoru.

Rozróżnia się dwie wartości opałowe:

- d dolną  $H_u$  i górną  $H_o$ .

Molowa wartość opałowa wodoru wynosi:

$$H_u = 242,0 \text{ kJ/mol}$$

$$H_o = 286,1 \text{ kJ/mol}$$

Różnicą między nimi jest molowa entalpia parowania (entalpia skroplin) q wody:



$$H_o = H_u + q \quad (6)$$

W ciśnieniu  $p$  należy uwzględnić ciśnienie otoczenia. Musiały by być przyjęte jeszcze dwie poprawki, które jednak wzajemnie się znoszą: w gazometrze znajduje się słup wody o ciśnieniu ok. 20 hPa, które należałoby dodać. Wytwarzany wodór jest nasycony parą wodną, której ciśnienie nasycenia  $\sim 23$  hPa należałoby odejmować teoretyczną, potrzebną ilość gazu według równania (3) jest porównywana ze zmienną  $i$  z tego oblicza się ilość wykorzystanego gazu.

$$\begin{aligned} I &= 0,35 \text{ A} \\ p &= 998 \text{ hPa} \\ T &= 296 \text{ K} \end{aligned}$$

zmieniono

$$V_{H_2/t} = 0,0447 \text{ m/s}$$

Wykorzystanie gazu: 97 %

Brakujące 3 % to straty dyfuzyjne wewnątrz ogniwa.

Sprawność ogniwa oblicza się z równania (4) i (5)

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{n \cdot H} \quad (7)$$

Na podstawie przebiegającej reakcji w ogniwie paliwowym musiałyby się do tego równania przyjąć wartość opałową górną  $H_o$ .

W obliczeniach technicznych jest powszechnie przyjęte przyjmować  $H_u$  gdyż ciepło kondensacji wytwarza tylko ciepło, a nie energię elektryczną.

Sprawność ogniwa można obliczyć wyrażając  $n$  z równania stanu gazu.

Otrzymuje się sprawność:

$$\eta = \frac{RT \cdot U \cdot I \cdot t}{H \cdot p \cdot V} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} I &= 0,35 \text{ A} \\ U &= 0,75 \text{ V} \\ t &= 540 \text{ s} \\ p &= 998 \text{ hPa} \\ T &= 296 \text{ K} \\ V_{H_2} &= 25 \text{ ml} \end{aligned}$$

Dla podanych w eksperymencie warunków sprawność  $\eta$  (obliczona dla  $H_u$ ):  
 $\eta = 58 \%$ .

Sprawność ogniwa nie zależy tylko od oporu obciążenia ale także od ciśnienia gazów, wilgotności membrany i temperatury.