

OGNIWA PALIWOWE – POSTĘPY ROZWOJU I KOMERCJALIZACJI

Janusz JEWULSKI

STRESZCZENIE

Ogniwa paliwowe stanowią zróżnicowaną dziedzinę generacji energii elektrycznej zarówno z punktu widzenia poziomu zaawansowania technologii, obszarów zastosowań jak i postępów badań i komercjalizacji. Określone zostały podstawowe charakterystyki działania ogniw paliwowych oraz ich główne obszary zastosowań. Przedstawiono aktualny status rozwoju technologii i postępy komercjalizacji.

OGNIWA PALIWOWE

Ogniwo paliwowe jest źródłem prądowym generującym energię elektryczną w wyniku reakcji elektrochemicznego utleniania paliwa dostarczanego z zewnątrz w sposób ciągły. Utleniaczem jest zazwyczaj powietrze. Proces utleniania obejmuje szereg reakcji elektrodowych powiązanych z transportem jonowym przez warstwę elektrolitu (Tab. 1). Zakres paliw jest zróżnicowany w zależności od rodzaju ogniwa i wynika przede wszystkim z rodzaju elektrolitu zastosowanego przy konstrukcji ogniwa.

Historia ogniw paliwowych datuje się początków XIX wieku, kiedy William Grove skonstruował pierwsze ogniwo paliwowe zasilane wodorem i tlenem z zastosowaniem kwasu siarkowego jako elektrolitu. Jednak dynamiczny rozwój ogniw paliwowych rozpoczął się dopiero w latach 60-tych ubiegłego wieku w ramach badań nad źródłami zasilania statków kosmicznych w energię elektryczną, m.in. w ramach amerykańskiego programu lotów kosmicznych. Badania te dotyczyły ogniw opartych na elektrolicie polimerowym (PEMFC), przede wszystkim zaś ogniw alkalicznych (AFC) z wykorzystaniem stężonego wodorotlenku potasu oraz zastosowaniem czystego wodoru i tlenu jako paliwa i utleniacza. Jedynym produktem reakcji w ogniwach alkalicznych była woda, odyskiwana do celów użytkowych w trakcie lotów kosmicznych

Powtarzające się kryzysy paliwowe końca XX wieku i początku XXI wieku spowodowały wzrost zainteresowania technologią ogniw paliwowych, przede wszystkim ze względu na ich wysoką sprawność elektryczną oraz niski poziom zanieczyszczeń w spalinach. Doprowadziło to m.in. do dynamicznego rozwoju technologii ogniw polimerowych (PEMFC), węglanowych (MCFC) oraz tlenkowych (SOFC). Ogniwa paliwowe charakteryzują się najwyższą znaną sprawnością konwersji energii chemicznej w elektryczną, sięgającą 60% w układach energetycznych z zastosowaniem ogniw paliwowych. W warunkach pracy obciążonego prądowo ogniwa paliwowego, generującego prąd elektryczny, wytwarzane są jednocześnie znaczne ilości ciepła. Pozwala to na podwyższenie sprawności elektrycznej układów energetycznych, która teoretycznie sięgać może 80%. Zademonstrowane w ciągu ostatnich kilku lat

sprawności elektryczne układów z ogniwami paliwowymi (np. ogniw tlenkowych) sięgają 60% już przy mocach elektrycznej rzędu 200 kW (Rys. 1). W miarę wzrostu generowanej mocy, sprawność elektryczna układów z ogniwami paliwowymi rośnie, m.in. ze względu na mniejszy udział strat ciepłych w bilansie energetycznym.

CHARAKTERYSTYKI PRACY OGNIWA PALIWOWEGO

Teoretyczne napięcie ogniwa paliwowego w warunkach bezprądowych (tzw. SEM) wynika ze zmiany entalpii swobodnej sumarycznej reakcji elektrochemicznej oraz aktywności ciśnieniowej substratów i produktów reakcji elektrochemicznej. Przykładowo, napięcie ogniwa polimerowego (PEMFC) określone jest zależnością:

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0,5}}{P_{H_2O}} \quad (1)$$

przy czym wartość wynosi 1,18 V w temperaturze 25 C. Sprawność elektryczna ogniwa zdefiniowana jest jako stosunek użytecznej energii wyprodukowanej w ogniwie, określonej poprzez entalpię swobodną Gibbsa, do zmiany entalpii strumienia reagentów:

$$\eta_{\text{Ogniwo, Teoretyczna}} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2)$$

Napięcie ogniwa zmniejsza się w miarę wzrostu obciążenia prądowego, w wyniku strat związanych z wewnętrzną opornością omową ogniwa, ograniczeniami kinetyki reakcji elektrodowych oraz ograniczeniami transportu substratów i produktów reakcji. Ponadto, konwersja paliwa zasilającego ogniwo paliwowe nie jest kompletna. Wpływa to na rzeczywistą sprawność ogniwa paliwowego [EG&G 2004, Hogers 2003]:

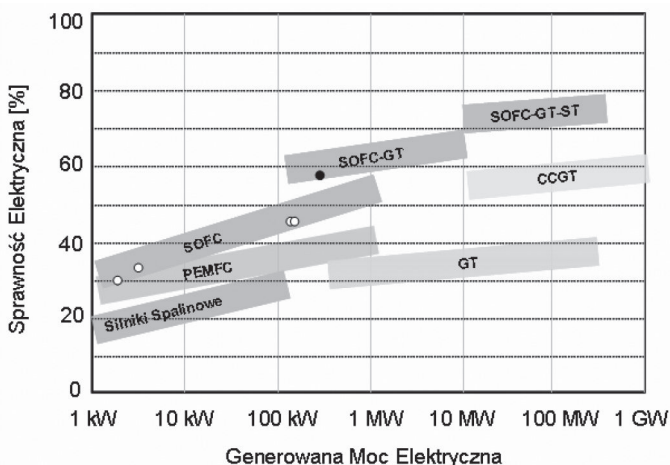
$$\eta_{\text{Ogniwo, Rzeczywista}} = \eta_{\text{Ogniwo, Teoretyczna}} \frac{V}{E^o} U_{FU} \quad (3)$$

Z kolei sprawność elektryczna układu energetycznego z ogniwami paliwowymi zdefiniowana jest w oparciu o wartość opałową paliwa zasilającego:

Janusz JEWULSKI
Instytut Energetyki, Warszawa

$$\eta_{Pr oces} = \frac{P_{FC} + P_{KG}}{\dot{m}Q_{LHV}} \quad (4)$$

Sprawność układu energetycznego z ogniwami paliwowymi rośnie wraz ze wzrostem generowanej mocy, szczególnie w przypadku ogniw działających w wyższych temperaturach. Związane jest to m.in. ze stratami cieplnymi z układu energetycznego do otoczenia, malejącymi w stosunku do generowanej mocy w miarę zwiększania skali mocy układu.



Rys 1. Sprawność elektryczna wybranych technologii generacji prądu w zakresie w pełnym zakresie mocy elektrycznych. Oznaczenia: GT – turbiny gazowe, ST – turbiny parowe, CCGT – układy skojarzone z turbiną gazową, o – istniejące instalacje demonstracyjne tlenkowych ogniw paliwowych SOFC, I – istniejące instalacje demonstracyjne SOFC-GT.

POSTĘPY ROZWOJU TECHNOLOGII I KOMERCJALIZACJI

OGNIWA ALKALICZNE

Ogniwa alkaliczne, AFC (ang. *Alkaline Fuel Cells*), będące najbardziej rozwinięta i w pełni komercyjną technologią ogniw paliwowych, wykorzystywane są m.in. przez NASA od połowy lat 60 w programie lotów kosmicznych Apollo oraz w lotach promów kosmicznych (Atlanta). Elektrolitem w ogniwie alkalicznym jest wodny roztwór wodorotlenku potasu o stężeniu od 30% do 85% wagowych, co umożliwia na pracę ogniwa w zakresie temperatur od 60 C do 225 C, w zależności od stężenia wodorotlenku potasu. Materiałem anodowym w typowym ogniwie alkalicznym jest nikiel Raney'a. W zastosowaniach astronautycznych stosuje się katalizatory Pt/Pd. Zasilane czystym wodorem i tlenem, ogniwa alkaliczne charakteryzują się sprawnością elektryczną przekraczającą 65% już w zakresie mocy elektrycznej rzędu kilku kilowatów. Możliwy jest przy tym bardzo szybki rozruch ogniwa.

Ogniwa paliwowe AFC są bardzo czułe na obecność dwutlenku węgla (zarówno w paliwie jak i w powietrzu). Reaguje on z elektrolitem prowadząc do szybkiego spadku osiągniętych mocy. Spadek osiągniętych mocy ogniwa może być również wywołany obecnością tlenku węgla, który powoduje zatrucie katalizatora. Stanowi to ograniczenie dla zakresu praktycznych zastosowań. W przemyśle motoryzacyjnym prace zmierzające

do komercjalizacji ogniw alkalicznych zostały ograniczone ze względu na brak taniej metody usuwania dwutlenku węgla z powietrza.

OGNIWA WĘGLANOWE

Ogniwa węglanowe, MCFC (ang. *Molten Carbonate Fuel Cells*), działają w oparciu o elektrolit ze stopionych węglanów metali alkalicznych (Li/K/Na)CO₃ w temperaturach 600-650 C. Elektrolit węglanowy zawarty jest w porowatej matrycy wykonanej z glinianu litowego LiAlO₂. Anodę stanowi porowaty spiek ceramiczny Ni/Cr lub Ni/Al., zaś katodę stanowi porowaty tlenek niklu z dodatkiem litu. Rozkład elektrolitu pomiędzy anodę, matrycę elektrolitu oraz katodę ustala się w oparciu o równowagę kapilarną wynikającą z rozkładu porowatości elementów ogniwa. W odróżnieniu od ogniw polimerowych i ogniw fosforanowych, dopuszczalne są wyższe stężenia tlenku węgla w paliwie. W przypadku ogniw węglanowych, paliwem może być również gaz ziemny przetworzony w procesie reformingu parowego zewnętrznego lub wewnętrznego (wewnątrz ogniwa paliwowego). Wymagana jest przy tym wysoka czystość paliwa gazowego, w tym zawartość siarki poniżej 0,5 ppm.

Ogniwa węglanowe znajdują się na etapie wstępnej komercjalizacji. Wiodącymi producentami są FuelCell Energy Inc. (USA), MTU Friedrichshafen (Niemcy), Ansaldo (Włochy) oraz Ishikawajima-Harima Heavy Industries (Japonia). Oferowane są kilka-megawatowe układy energetyczne do zastosowań stacjonarnych, zasilane gazem ziemnym, o sprawności elektrycznej zbliżonej do 50%.

Stopione węglany tworzą silnie korozyjne środowisko. W powiązaniu z parowaniem elektrolitu węglanowego, rozpuszczeniem się katody ogniwa węglanowego oraz migracją elektrolitu wywołaną różnicami potencjału elektrycznego w stosie ogniw paliwowych, prowadzi to do ograniczenia żywotności stosu do około 40 tys. godzin. Osiągi pracy ogniwa węglanowego zwiększają się przy wyższych ciśnieniach przy jednoczesnym skróceniu żywotności stosu.

OGNIWA POLIMEROWE

Ogniwa polimerowe, PEMFC (ang. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*), rozwijane są od lat 60-tych ubiegłego stulecia. Jako elektrolit wykorzystywane są membrany polimerowe (fluorkowany kwas sulfonowy), które po nasyceniu wodą przewodzą jony wodorowe H⁺. Jako paliwo wymagany jest czysty wodór. Zawartość tlenku węgla powyżej 20ppm nie jest tolerowana. W ogniwach PEMFC uzyskiwane są wysokie gęstości prądu, przy szybkim rozruchu oraz stosunkowo niskich kosztach produkcji. Jako katalizatory reakcji elektrodowych wykorzystywane są niewielkie ilości platyny, poniżej 0,5 mg/cm².

Ze względu na niską temperaturę pracy mniejsze są problemy z korozją, natomiast generowane ciepło jest trudniej wykorzystać w procesach kogeneracji. Konieczne jest chłodzenie stosu ogniw PEMFC wodą, co wymaga dodatkowego obiegu chłodzenia. W przypadku chłodzenia stosu powietrzem, duży strumień powietrza wymaga dodatkowego poboru mocy oraz utrudnia nawilżanie membrany. Trwałość ogniw PEMFC ogra-

niczona jest do ok. 5 tys. godzin. Prowadzone są intensywne prace zmierzające do przedłużenia trwałości ogniw polimerowych m.in. w firmie Ballard [Schmittinger, 2008].

Działania w kierunku komercjalizacji prowadzone są intensywnie w szeregu firm m.in. General Electric, Ballard, Plug Power, UTC Power i Hydrogenics, Układy demonstracyjne stosów PEMFC osiągają moc do ok. 200kW. Głównym zakresem zastosowań ogniw polimerowych jest przemysł motoryzacyjny.

OGNIWA METANOLOWE

Ogniwa metanolowe, DMFC (ang. *Direct Methanol Fuel Cell*), stanowią w zasadzie odmianę ogniw polimerowych. Paliwem jest ciekły metanol w odróżnieniu od gazowego wodoru wykorzystywanego w ogniwach PEMFC. Sprawność elektryczna ogniw metanolowych wynosi około 25% (Tab. 1). Wynika to m.in. z wolniejszej kinetyki reakcji anodowej metanolu w porównaniu z ogniwami polimerowymi zasilanymi czystym wodorem. Tlenek węgla, stanowiący truciznę dla reakcji anodowej jest składnikiem przejściowym rozkładu metanolu. Z tego względu wymagana jest wyższa zawartość Pt (do kilku mg-cm⁻²) jako katalizatora reakcji anodowej.

Wykorzystanie płynnego metanolu, jako paliwa umożliwia zastosowanie ogniw DMFC w urządzeniach o mocy 10-200 W, przy zastosowaniu wymiennych zasobników paliwa płynnego.

OGNIWA TLENKOWE

Ogniwa tlenkowe, SOFC (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*), działają w oparciu o elektrolity przewodzące jony tlenkowe O⁼. Ogniwa tlenkowe tubularne działają w zakresie temperatur 850-1000 C, zaś ogniwa tlenkowe o geometrii planarnej działają w zakresie temperatur 650-800 C. Typowym elektrolitem jest tlenek cyrkonu stabilizowany itrem (YSZ) o grubości od 5 do 150 mikronów, w zależności od rodzaju ogniw. W tradycyjnej konfiguracji anodę stanowi spiek Ni/YSZ zaś katoda oparta jest na materiałach perowskitowych.

Ogniwa tlenkowe charakteryzują się wielopaliwowością, pozwalającą na wykorzystanie praktycznie każdego paliwa gazowego o odpowiedniej czystości, paliwa ciekłego po odparowaniu i reformingu (gaz ziemny, LPG, NH₃, metan, metanol, etanol, diesel, eter dimetylowy itd.) lub paliwa gazowego otrzymanego w procesie zgazowania biomasy lub węgla [Qi, 2007]. Możliwy jest w ogniwach tlenkowych wewnętrzny reforming paliwa. Dodatkowo, w warunkach obciążenia prądowego generowane jest w ogniwie tlenkowym ciepło, które wykorzystane może być w procesie kogeneracji.

Tlenkowe ogniwa paliwowe typu SOFC są przedmiotem intensywnych, przedkomercyjnych prac badawczych w Europie (Energy Research Centre of the Netherlands ECN, Forschungszentrum Jülich, Risoe Lab.), Australii (Ceramic Fuel Cells Ltd), Japonii (Tohoku University, Mitsubishi Heavy Industries/Chubu Electric) a przede wszystkim USA (m.in. Versa Power, General Electric, Siemens Power Generation, ZTEK). W chwili obecnej, najbardziej intensywne prace w zakresie modułu procesowego SOFC o mocy od 3kW do 10 kW prowadzone są w ramach programu SECA (USA). Moduł ten będzie stano-

wił podstawowy element konstrukcyjny jednostek większych mocy. Sprawność elektryczna modułu procesowego SOFC zademonstrowana została na poziomie powyżej 40% przy zasilaniu metanem. Sprawność elektryczna wzrasta znacząco do około 60% przy generowanych mocach elektrycznych rzędu 250 kW, w układach z mikroturbinami gazowymi. Przy mocach powyżej 10 MW teoretyczna sprawność elektryczna procesu przekroczyć może 80%.

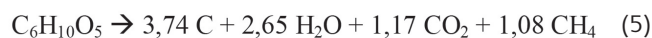
W pracach badawczo-rozwojowych nad ogniwami tlenkowymi dominują zagadnienia materiałowe oraz konstrukcyjno-projektowe, zmierzające do polepszenia niezawodności działania ogniw oraz obniżenia kosztów wytwarzania [Singhal, 2004, Hoogers 2003]. W Polsce prace nad ogniwami SOFC prowadzone są m.in. w Instytucie Energetyki w zakresie wytwarzania płytek oraz konstrukcji stosów ogniw.

OGNIWA FOSFORANOWE

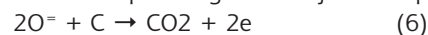
Ogniwa fosforanowe, PAFC (ang. *Phosphoric Acid Fuel Cells*), oferują jedną z najbardziej zaawansowanych komercyjnie technologii ogniw paliwowych. Technologia ta zbliżona jest do technologii ogniw polimerowych. Elektrody stanowi porowaty grafit z domieszką katalizatora (Pt, Pt/Ru). Elektrolitem jest zdysocjowany kwas ortofosforowy (H₃PO₄) w porowatym podłożu węgla krzemu (SiC) Zademonstrowane instalacje obejmują zakres mocy od 50kW do 10MW, z możliwością kogeneracji. Temperatura działania ogniw fosforanowych wynosi 150-200C, co umożliwia wyższy poziom tolerancji tlenku węgla w paliwie gazowym w porównaniu z ogniwami polimerowymi. Niemniej, poziom tlenku węgla nie może przekroczyć 0.5-1.0 %. Producentami ogniw PAFC są m.in. UTC Energy (USA), Fuji Electric Corporation, Toshiba Corporation oraz Mitsubishi (Japan). Czas pracy stosu wynosi obecnie 40 tys. godzin przy docelowej planowanej żywotności ok. 80 tys. godzin. Ograniczenia trwałości ogniw PAFC wynikają m.in. z korozji spowodowanej parowaniem elektrolitu H₃PO₄. Typowe osiągi pracy stosu PAFC, w warunkach ciśnienia atmosferycznego) są rzędu około 0,4 A-cm⁻² przy napięciu 0,65V.

Ogniwa węglowe

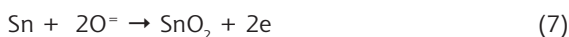
Ogniwa węglowe, DCFC (ang. *Direct Carbon Fuel Cells*), umożliwiają bezpośrednią konwersję węgla stałego w energię elektryczną ze sprawnością elektryczną przewyższającą 80%, w oparciu o procesy elektrochemiczne lub powiązane z nimi procesy chemiczne. Produktem wyjściowym, na obecnym stanie zaawansowania badań, jest czysty węgiel otrzymywany w procesie pirolizy związków o wysokiej zawartości węgla pierwiastkowego (np. biomasy, odpadów organicznych, celulozy, węgla), np.:



Dominującym produktem reakcji jest dwutlenek węgla, który wykorzystany może zostać w skojarzonym procesie chemicznym. Reakcja anodowa przebiegać może jednoetapowo



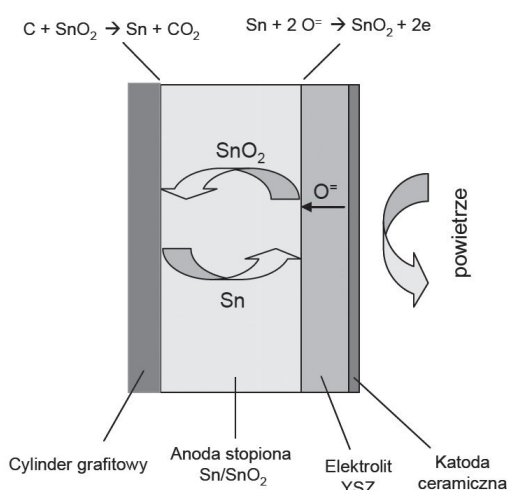
lub dwuetapowo, np. z wykorzystaniem stopionej anody Sn/SnO₂ (Rys. 2)



Emisja dwutlenku węgla szacowana jest na poziomie o rząd wielkości niższym od emisji typowej elektrowni węglowej. Potencjał ekonomiczny i środowiskowy technologii ogniw węglowych jest szczególnie atrakcyjny w krajach o dominującej roli energetyki węglowej. Ogniw węglowe opracowywane są w znacznej mierze w oparciu o istniejącą technologię materiałową wysokotemperaturowych ogniw tlenkowych i węglanowych (SOFC, MCFC). Wynika stąd również zbliżony zakres temperaturowy pracy ogniw węglowych (600-850 C).

Badania w zakresie ogniw węglowych są technologicznie zróżnicowane i obejmują zarówno bezpośrednie napylenie węgla na powierzchnię anody ogniw tlenkowych (metody pneumatyczne, złoża fluidalne) jak również wykorzystanie różnorodnych nośników węgla i materiałów wysokotemperaturowych (ciepłe anody Sn/SnO₂, elektrolity na bazie tlenków cyrkonu, stopionych węglanów, chlorków i azotanów metali alkalicznych).

Ogniw węglanowe są stosunkowo nową technologią, stąd też brak jest demonstracji długotrwałego działania ogniw. Ograniczeniem jest wymóg wysokiej czystości węgla oraz konieczność dostarczania dodatkowego ciepła w celu utrzymania temperatury pracy ogniw.



Rys 2. Zasada działania ogniw węglowych na bazie elektrolitu tlenkowego z wykorzystaniem stopionej anody Sn/SnO₂

WNIOSKI

Ogniw paliwowe oferują najwyższą sprawność elektryczną konwersji paliw spośród istniejących technologii. Sprawność elektryczna dochodzi do 55%-60% w układach ze

stosami ogniw oraz teoretycznie nawet do 70%-80% w układach skojarzonych z turbinami gazowymi (SOFC-GT). Wysokie sprawności generacji energii elektrycznej możliwe są do osiągnięcia już w przypadku stosunkowo niskich mocy. Technologia ogniw paliwowych jest zróżnicowana pod względem typów ogniw, materiałów konstrukcyjnych, zakresu stosowanych paliw oraz zastosowań. Ogniw AFC and PAFC osiągnęły etap komercjalizacji, technologia ogniw PEMFC, MCFC, DMFC znajdują się na etapie wstępnej komercjalizacji, zaś technologia ogniw SOFC znajduje się na etapie przedkomercyjnym. Prace badawczo-rozwojowe nad ogniwami DCFC prowadzone są od niedawna. Zagadnienia materiałowe oraz koszty produkcji są głównymi barierami komercjalizacji ogniw PEMFC i SOFC.

Zakres zastosowań ogniw paliwowych jest bardzo szeroki i obejmuje m.in.:

- generację mocy w skali 10-200's W (DMFC, PEMFC)
- układy CHP w skali 1-5 kW (SOFC, PEMFC)
- zastosowania transportowe 5-200kW (PEMFC), APU (PEMFC, SOFC)
- układy stacjonarne, rozproszone, CHP o mocy 200kW-10 MW (PAFC, MCFC, SOFC)
- układy stacjonarnej generacji mocy >10 MW (MCFC, SOFC)

SPIS SYMBOLI

- n – liczba elektronów,
- R – stała gazowa [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]
- F – stała Faradaya [A s]
- ΔG – entalpia swobodna reakcji [J mol^{-1}]
- ΔH – entalpia reakcji [J mol^{-1}]
- E – napięcie ogniw nieobciążonego prądem [V]
- E° – standardowe napięcie ogniw [V]
- \dot{m} – strumień masowy paliwa [kg s^{-1}]
- p_i – ciśnienie cząstkowe składnika „i” [Pa]
- P_{FC} – moc elektryczna ogniw [W]
- P_{GT} – moc elektryczna generowana w turbinie gazowej [W]
- Q_{LHV} – wartość opałowa [J kg^{-1}]
- V – napięcie ogniw paliwowych [V]
- η – sprawność elektryczna [%]
- U_{FU} – stopień wykorzystania paliwa

LITERATURA CYTOWANA

- EG&G Technical Services, *Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)*, U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory, Morgantown, USA, 2004.
- Hoogers G., *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, London, 2003
- Singhal S., Kendall K., *High Temperature Solid Oxide Fuel Cells*, 2003.
- Schmitteringer W., Vahidi A., *A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells*, Journal of Power Sources 180 (2008) 1-14.
- Qi A., Peppley B., Karan K., *Integrated fuel processors for fuel cell application: A review*, Fuel Processing Technology 88 (2007) 3-22.

Typ ogniwa		Reakcja anodowa (A), katodowa (C) i sumaryczna (S)	Elektrolit	Temp.	η_{EL}	Paliwo / Utleniacz
PEMFC	polimerowe	A: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$ C: $2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e \rightarrow H_2O$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ (c)	Nafion (H ⁺)	60-80	35-45	A: H ₂ C: Powietrze
DMFC	metanolowe	A: $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e$ C: $\frac{1}{2} O_2 + 6H^+ + 6e \rightarrow 3H_2O$ ----- S: $CH_3OH + 1,5O_2 \rightarrow 2H_2O + CO_2$	Nafion (H ⁺)	60-80	25	A: CH ₃ OH C: Powietrze
AFC	alkaliczne	A: $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e$ C: $\frac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow 2OH^-$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow \rightarrow$	KOH (OH ⁻)	25- 225	50-60	A: H ₂ C: O ₂
PAFC	fosforanowe	A: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e$ C: $2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e \rightarrow H_2O$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ (c)	H ₃ PO ₄ (H ⁺)	150- 200	35-45	A: H ₂ , gaz ziemny, LPG CH ₃ OH, biogaz, itd. C: Powietrze
MCFC	węglanowe	A: $H_2 + CO_3^{=} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e$ C: $\frac{1}{2} O_2 + CO_2 \rightarrow CO_3^{=}$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	(Li,Na,K) CO ₃ (CO ₃ ⁼)	600- 700	35-50	A: H ₂ , gaz ziemny, LPG CH ₃ OH, biogaz, itd. C: Powietrze + CO ₂
SOFC	tlenkowe	A: $H_2 + O^{=} \rightarrow H_2O + 2e$ C: $\frac{1}{2} O_2 + 2e \rightarrow O^{=}$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	YSZ (O ⁼)	700- 950	30-55 (60-80)	A: H ₂ , gaz ziemny, LPG CH ₃ OH, biogaz, itd. C: Powietrze
SOFC	tlenkowe	A: $H_2 + O^{=} \rightarrow H_2O + 2e$ C: $\frac{1}{2} O_2 + 2e \rightarrow O^{=}$ ----- S: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$	YSZ (O ⁼)	700- 950	30-55 (60-80)	A: H ₂ , gaz ziemny, LPG CH ₃ OH, biogaz, itd. C: Powietrze
DCFC	węglowe	A: $C + 2O^{=} \rightarrow CO_2 + 4e$ C: $O_2 + 4e \rightarrow 2O^{=}$ ----- S: $C + O_2 \rightarrow CO_2$	YSZ (O ⁼)	700- 850	65	A: C C: Powietrze

Tabela 1. Zestawienie podstawowych typów ogniw paliwowych z uwzględnieniem reakcji elektrodowych, rodzaju elektrolitu, typowego zakresu temperatur pracy, sprawności elektrycznej oraz paliwa i utleniacza