

## **BIOGAZ POCHODZENIA ORGANICZNEGO JAKO PALIWO DLA WĘGLANOWYCH OGNIW PALIWOWYCH**

### **Streszczenie**

Rozdział zawiera analizę możliwości zastosowania biogazu pochodzenia organicznego jako paliwa dla węglanowych ogniw paliwowych. Przedstawiono podstawy teoretyczne, oraz wyniki modelowania ogniwa paliwowego zasilanego biogazem. Rozdział także zawiera wyniki badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym dla symulowanego składu biogazu. Określono także perspektywy takich rozwiązań jak również zasugerowano kierunek dalszych badań w zakresie tematu.

### **Słowa kluczowe**

ogniwa paliwowe, biogaz, odpady organiczne, modelowanie matematyczne, badania doświadczalne

### **Wstęp**

W obecnie rozważanych przyszłościowych układach generujących energię elektryczną za pomocą ogniw paliwowych głównym paliwem brany pod uwagę jest wodór bądź, traktowany przejściowo, gaz ziemny. Oba te paliwa wykazują stosunkowo dobre właściwości pod względem wyżej wymienionego zastosowania. Wodór obecnie nie jest produkowany na skalę pozwalającą na jego zastosowania, jako paliwa w energetyce i nie widać technologii pozwalającej w przyszłości na produkcję wodoru do tego celu. Gaz ziemny wydaje się być paliwem o wyczerpywanych zasobach i trudno go rozważać, jako paliwo perspektywiczne. Biopaliwa są uważane, jako alternatywa dla energetyki opartej wyłącznie na energii elektrycznej, pochodzącej np. z elektrowni atomowych, posiadając jej zalety (głównie bezemisyjność).

Rosnące ceny paliw wraz ze wzrostem zużycia energii elektrycznej będą powodować konieczność wdrożenia coraz to bardziej sprawnych układów do jej produkcji. Klasyczne metody produkcji energii elektrycznej [1–4] oparte o obieg czynnika roboczego osiągnęły już maksymalny poziom sprawności i nie przewiduje się tutaj znacznej poprawy osiągnięć. Ogniwa paliwowe przetwarzają energię chemiczną paliwa w energię elektryczną na drodze procesów elektrochemicznych w związku, z czym nie są ograniczone maksymalną sprawnością obiegu cieplnego. Dodatkowo wysokotemperaturowe ogniwa paliwowe—do których poza węglanowymi zaliczamy również tlenkowe ogniwa paliwowe [5–9]—można w pewnym zakresie traktować, jako źródło ciepła dla tradycyjnych obiegów cieplnych [10, 11], tworząc w ten sposób układy hybrydowe o potencjalnie ultra wysokiej sprawności (ponad 70%), przy umiarkowanych ciśnieniach i temperaturach panujących tych układach. Węglanowe ogniwa paliwowe (ang. Molten Carbonate Fuel Cell—MCFC) uznawane są za przyszłościowe źródła energii elektrycznej, co związane jest z ich stosunkowo wysoką sprawnością produkcji energii elektrycznej. Obecnie budowane układy zawierające ogniwa paliwowe MCFC posiadają moce od 250 kW do setek MW [12]. Urządzenia te stają się więc jednym z przyszłościowych alternatyw rozwoju energetyki, dodatkowo węglanowe ogniwa paliwowe można wykorzystywać do separacji CO<sub>2</sub> ze spalin pochodzenia energetycznego [13, 14]—przy ich zasilaniu biopaliwem, znajdujemy idealne rozwiązanie dla technologii CCS (ang. Carbon Capture and Storage).

Obecnie głównymi paliwami rozważanymi do zastosowań w ogniwach paliwowych są wodór i przejściowo gaz ziemny (metan) [15]. Wodór z punktu widzenia pracy ogniw paliwowych jest paliwem idealnym [16]. Niestety w jego upowszechnieniu występują głównie trudności z jego: produkcją (nie występuje w stanie niezwiązanym na ziemi), dystrybucją (wielokrotnie mniejsza energia chemiczna spalania odniesiona do jednostki objętości) oraz magazynowaniem (bardzo niska temperatura punktu krytycznego). Gaz ziemny jest traktowany, jako paliwo przejściowe ze względu na jego ograniczone zasoby i trudno jest go uważać za paliwo przyszłości. Dlatego jednym z bardziej obiecujących scenariuszy to zastosowanie biomasy [17, 18] lub utylizacja odpadów organicznych w celu produkcji gazu bogatego w metan i/lub wodór.

Określenie możliwości zastosowania biogazów pochodzenia organicznego oraz osiągnięć ogniw paliwowych z punktu widzenia rodzaju zastosowanego paliwa ma duże znaczenie. Zastosowanie biopaliw jako paliwa w węglanowych ogniwach paliwowych i przykładowe wyniki symulacji i eksperymentów przeprowadzonych można znaleźć w [19–23]. Głównym rozważanym w tych opracowaniach biopaliwem jest biogaz pochodzący z oczyszczalni ścieków bądź zgazowarki. W wielu przypadkach, biopaliwo poddawane jest procesom reformingu do wodoru [24, 25] i dopiero wodór jest dostarczany do ogniwa.

## Podstawy teoretyczne

Wyniki dotyczące zastosowania biopaliw zostały otrzymane w oparciu o opracowany model matematyczny ogniwa paliwowego MCFC. Podstawowe założenia i zależności modelu zostały przedstawione w tym rozdziale. Moduł ogniwa paliwowego MCFC składa się z równolegle i szeregowo łączonych ogniw. Moc elektryczna generowana przez cały moduł MCFC określona jest następującym równaniem:

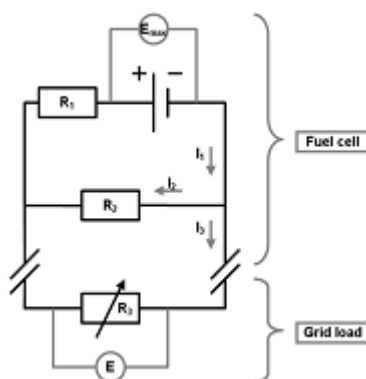
$$P_{MCFC} = \sum_{j=1}^m \left( I_j \cdot \sum_{i=1}^n E_{MCFC,i,j} \right) \quad (1)$$

gdzie:  $i$  – kolejny numer ogniwa;  $n$  – ilość ogniw w stosie;  $j$  – numer stosu;  $m$  – ilość stosów module;  $I$  – prąd stosu;  $E_{MCFC}$  – napięcie generowane przez pojedyncze ogniwo.

Prąd pobierany z ogniwa MCFC jest określony następującą zależnością:

$$I = 2F \cdot \dot{n}_{CO_3^{2-}} \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – stała Faradaya, C/mol;  $\dot{n}_{CO_2,transferred}$  – przepływ jonów węglanowych przechodzących ze strony katody do anody, kmol/s.



Rysunek 1: Zastępczy schemat elektryczny ogniwa

Zastępczy schemat elektryczny pojedynczej celi ogniwa MCFC został pokazany na rys. 1. W ogniwie występują dwa rodzaje oporów: opór jonowy  $R_1$  (stawiany jonom  $CO_3^{2-}$  przez elektrolit) oraz opór elektryczny ogniwa  $R_2$ . Opór oznaczony symbolem  $R_3$  jest oporem przyłożonego do ogniwa obciążenia. Równanie na napięcie ogniwa MCFC określa równanie:

$$E_{SOFC} = \frac{E_{max} - \eta_f \cdot i_{max} \cdot r_1}{\frac{r_1}{r_2} \cdot (1 - \eta_f) + 1} \quad (3)$$

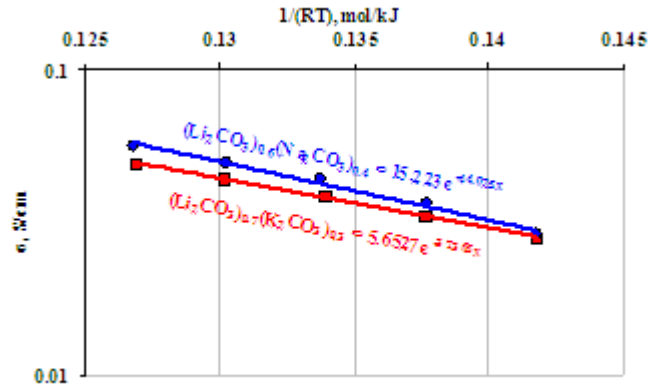
Odpowiednie wartości właściwego oporu elektrycznego zostały określone na podstawie dostępnych danych doświadczalnych [26], i wynoszą odpowiednio  $0.6 \text{ A/cm}^2$  i  $28 \text{ cm}^2/\text{S}$ .

Napięcie maksymalne ogniwa określone jest następującą postacią równania Nernst'a:

$$E_{max} = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{O_2,cathode} \cdot p_{CO_2,cathode}^2}{p_{O_2,anode} \cdot p_{CO_2,anode}^2} \quad (4)$$

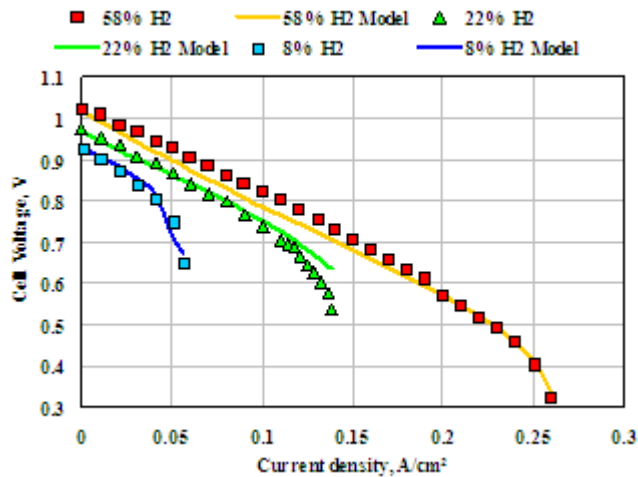
gdzie:  $T$  – temperatura bezwzględna;  $R$  – stała gazu doskonałego;  $F$  – stała Faradaya;  $p_{O_2}$  – ciśnienie cząstkowe tlenu;  $p_{CO_2}$  – ciśnienie cząstkowe dwutlenku węgla; cathode – katoda; anode – anoda.

Ciśnienia cząstkowe były obliczane na bieżąco w oparciu o równanie stanu Lee-Kesler Plockera oraz minimalizacji energii swobodnej Gibbsa [27].



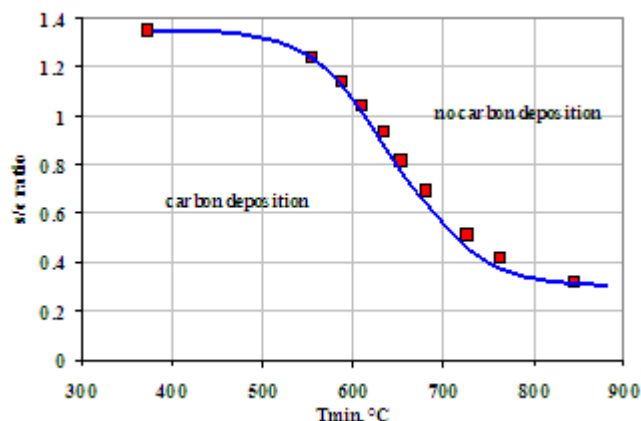
Rysunek 2: Wpływ temperatury na przewodności jonowe ciekłych węglanów

Przewodność jonowa elektrolitu węglanowego jest funkcją temperatury, zależności te dla dwóch różnych elektrolitów zostały przedstawione na rys. 2, dane doświadczalne pochodzą z [28]. Dokładność tak zbudowanego modelu została zweryfikowana na dostępnych danych doświadczalnych zaczerpniętych z [26], wynik tego porównania przedstawiono na rysunku 18.



Rysunek 3: Porównanie wyników uzyskanych za pomocą modelu z danymi doświadczalnymi [26]

Biogazy posiadające w swoim składzie węglowodory o dłuższych łańcuchach charakteryzują się stosunkowo wysokim potencjałem odnośnie sprawności. Jednakże w ogniwie zachodzi wiele reakcji jednocześnie i generowane napięcie, a co za tym idzie sprawność, będą wypadkową tych reakcji.



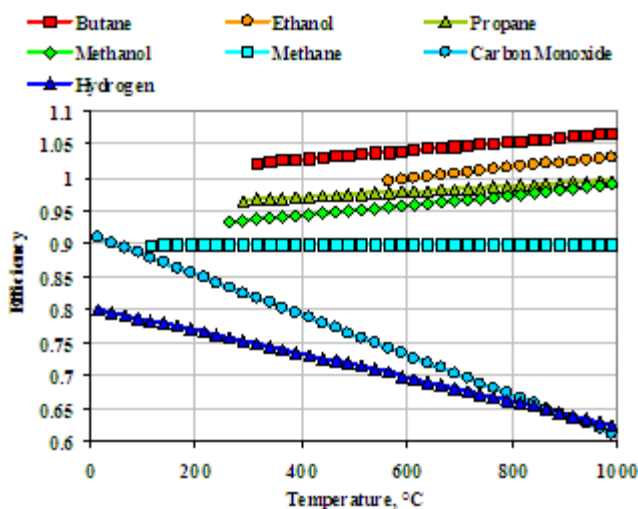
Rysunek 4: Wartości współczynnika s/c ratio przy których nie zachodzi odkładanie się węgla w postaci stałej na powierzchniach elektrod

W celu uniknięcia osadzania się węgla w postaci stałej na powierzchni elektrod konieczne jest dodanie do biogazu odpowiedniej ilości pary wodnej, przy czym różne paliwa posiadają różne graniczne zawartości pary wodnej. Krzywą dotyczącą paliw zawierających metan i tlenek węgla przedstawiono na rys. 4.

W przypadku ogniwa MCFC, współczynnik s/c na poziomie 0.8 zapobiega teoretycznie temu niekorzystnemu zjawisku. Zwyczajowo jest on jednak utrzymywany na poziomie 2 lub wyżej.

#### Biogaz pochodzenia organicznego jako paliwo dla ogniw paliwowych MCFC

Specyfika pracy ogniwa paliwowego MCFC polega na konieczności podawania razem z utleniaczem dwutlenku węgla. W układach komercyjnych jest to realizowane poprzez recyrkulację strumienia spalin do przepływu katodowego ogniwa. Należy nadmienić, iż zawrótzenie gorącego czynnika nie jest zagadnieniem trywialnym i stosowane są tutaj wysublimowane rozwiązania [29]. Zatem, do strumienia katodowego ogniwa podawana jest mieszanina powietrza i dwutlenku węgla tak, aby ich wzajemny stosunek odpowiadał stosunkowi, jaki występuje pomiędzy tymi związkami podczas powstawania jonów węglanowych, tj.  $CO_2/O_2 = 2$ .



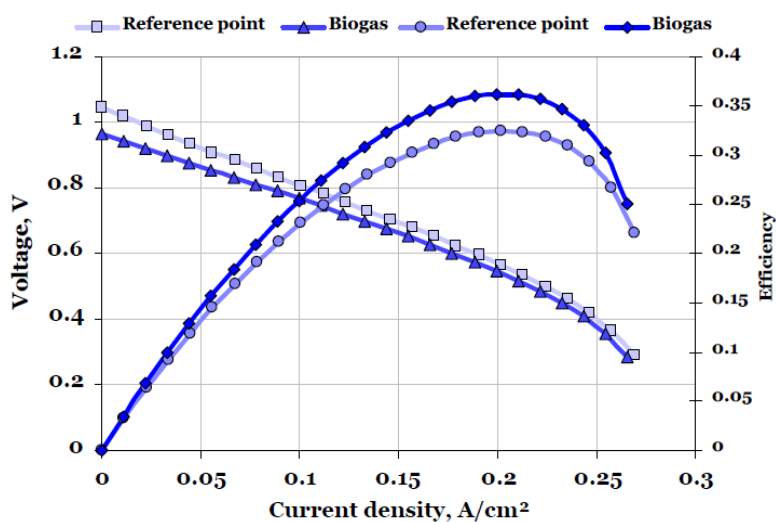
Rysunek 5: Teoretyczna sprawność maksymalna ogniwa paliwowego w zależności od zastosowanego paliwa

W ogniwach paliwowych zachodzą reakcje elektrochemiczne w wyniku których następuje bezpośrednia przemiana energii chemicznej paliwa w prąd elektryczny. Rodzaj zachodzącej reakcji odgrywa tutaj kluczową rolę, i w zależności od jej przebiegu ogniwo może osiągnąć wyższą lub niższą sprawność. Ogólnie rzecz ujmując, reakcje chemiczne można podzielić na egzotermiczne i endotermiczne. Te pierwsze charakteryzują się tym, iż w trakcie ich przebiegu generowane jest ciepło oddawane do otoczenia, te drugie z kolei podczas swojego przebiegu wymagają dostarczenia ciepła z otoczenia. Podczas definiowania sprawności ogniwa często brana jest pod uwagę wyłącznie energia chemiczna dostarczona w paliwie, przy takiej definicji, ciepło dostarczone z otoczenia może powodować osiągnięcie wartości sprawności powyżej jedności. Na rys. 5 przedstawiono

teoretyczne sprawności ogniw paliwowych przy zasilaniu różnymi związkami. Z przedstawionych danych wynika, iż biogaz posiadający w swoim składzie węglowodory o dłuższych łańcuchach powinien charakteryzować się stosunkowo wysokim potencjałem odnośnie sprawności. Z drugiej jednak strony, w ogniwie zachodzi wiele reakcji jednocześnie i generowane napięcie, a co za tym idzie sprawność, będą wypadkową tych reakcji.

Tablica 1: Biogas content for each sample used in form simulations with MCFC [30]

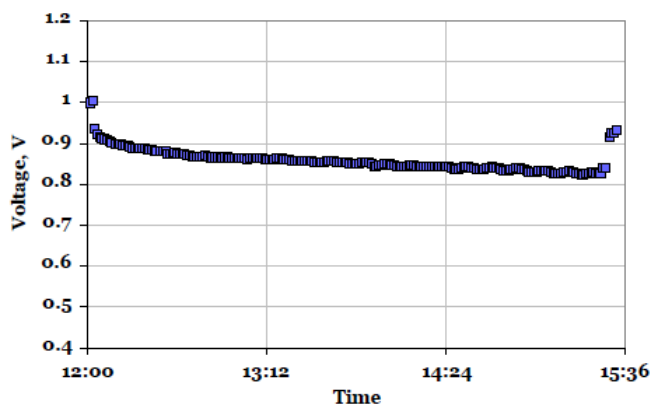
Sample	O <sub>2</sub> , %	N <sub>2</sub> , %	CH <sub>4</sub> , %	CO <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> , %	H <sub>2</sub> O, %
1	0.816	3.08	72.2	23.9	–	–
2	0.249	1.35	72.7	25.7	–	–
3	1.04	3.70	69.6	25.6	–	–
4	0.941	3.51	71.0	24.6	–	–
5	3.06	10.4	62.6	24.0	–	–
6	1.15	4.31	69.2	25.3	–	–
7	0.180	0.749	70.6	28.5	–	–
8	0.467	25.7	41.1	32.8	–	–
Reference Point	–	–	–	23	69	8



Rysunek 6: Krzywe prądowo-napięciowe i gęstości mocy otrzymane dla ogniwa paliwowego MCFC pracującego na biogazie pochodzenia organicznego [30]

Biogaz pochodzenia nie zawiera pary wodnej, którą należy dodać do paliwa w celu bezpośredniego wykorzystania tego gazu do zasilania ogniwa paliwowego. Zadany współczynnik „s/c ratio” był na poziomie 1.4, skład biogazu przedstawiono w tabeli 1, za [30]. Wyniki symulacji pracy ogniwa MCFC dla tego paliwa na tle paliwa referencyjnego przedstawiono na rys. 6. Teoretycznie ogniwo MCFC pracujące na biogazie jako paliwie generuje napięcie powyżej 0.9 V przy otwartym obwodzie zewnętrznym. Maksymalna sprawność jaką osiąga ogniwo to ok. 50%, co jest wynikiem zadowalającym. W punkcie pracy przy maksymalnej sprawności utylizowane ponad 90% paliwa dostarczanego do ogniwa.

Rozkład węglowodorów do wodoru zachodzący w obecności pary wodnej (oraz rozkład samej pary wodnej do wodoru) powinien skutkować wyższą sprawnością paliw zawierających węglowodory w stosunku do wodoru, ponieważ część energii cieplnej generowanej podczas pracy ogniwa jest zamieniana na energię chemiczną paliwa (wodór) co oznacza de facto większą ilość dostarczanego paliwa. Wstępne badania doświadczalne nie potwierdzają jednak tych wyników, po uzyskaniu stabilnej pracy na paliwie referencyjnym, do ogniwa został podany symulowany biogaz o następującym składzie: 58% metanu i 42% dwutlenku węgla zmieszany z parą wodną tak aby utrzymać wartość współczynnika s/c na poziomie 1.2, przy niezmiennym składzie utleniacza.



Rysunek 7: Wpływ biogazu pochodzenia mleczarskiego na napięcie węglanowego ogniwa paliwowego

Na rys. 7 przedstawiono zmiany napięcia ogniwa paliwowego po jego przełączeniu na symulowany biogaz. Widać, iż napięcie to spadło z 1 V do ok. 0.9 V w stosunkowo krótkim czasie, natomiast później nadal systematycznie spadało aż do osiągnięcia wartości lekko ponad 0.8 V. Czas po jakim ogniwo ustabilizowało swoją pracę wyniósł ok. 3 h.



Rysunek 8: Widok na ogniwo paliwowe po pracy na symulowanym biogazie

Po przełączeniu paliwa z biogazu z powrotem na wodór, napięcie wzrosło do prawie 0.95 V, ale nie osiągnęło swojej pierwotnej wartości (ponad 1 V). Zarówno powolny spadek napięcia podczas pracy ogniwa jak i jego niższa wartość po powrocie do paliwa referencyjnego sugerują występujące tutaj procesy degradacji ogniwa. W celu ich wstępnego zidentyfikowania, ogniwo zostało poddane analizie wzrokowej—patrz rys. 8. Zarówno na powierzchni ogniwa jak i kolektory doprowadzającym gazy anodowe zauważono dużo czarnego osadu, sugerującego odkładanie się węgla w postaci stałej—pomimo stosowania odpowiedniego nadmiaru pary wodnej.

### Podsumowanie

Przedstawiono rozważania teoretyczne oraz odpowiadające im badania doświadczalne obrazujące wpływ bezpośredniego przełączenia paliwa dostarczanego do węglanowego ogniwa paliwowego z wodoru na symulowany biogaz zmieszany z parą wodną. Badania teoretyczne sugerują porównywalne lub nawet wyższe osiągi ogniwa na biogazie w stosunku do wodoru i porównywalne do gazu ziemnego. Niestety badania doświadczalne nie potwierdzają rozważań teoretycznych, po skokowej zmianie paliwa na biogaz, ogniwo stabilizowało swoją pracę po ok. 3 h.

W przeciwieństwie do założeń teoretycznych, odnotowano znaczny spadek napięcia generowanego przez ogniwo 0.8 V vs. 1 V (spadek o 20%). Odnotowano także trwałą degradację ogniwa (ok. 10%), która najprawdopodobniej wywołana była odkładaniem się atomowego węgla na powierzchni elektrod—tezę tę potwierdza analiza wzrokowa jaką przeprowadzono zaraz po doświadczeniu.

Wymagane są tutaj dalsze badania zarówno teoretyczne (kinetyka reakcji) jak i dostosowanie samej konstrukcji ogniwa do innego paliwa (powiększenie kanału i zarazem czasu na reakcję).

### Bibliografia

- [1] Ł. Bartela, A. Skorek-Osikowska, J. Kotowicz, Integration of a supercritical coal-fired heat and power plant with carbon capture installation and gas turbine, Rynek Energii 100 (3) (2012) 56–62.

- [2] K. Janusz-Szymańska, Economic efficiency of an igcc system integrated with ccs installation [efektywność ekonomiczna układu gazowo-parowego zintegrowanego ze zgazowaniem węgla oraz z instalacją CCS], *Rynek Energii* 102 (5) (2012) 24–30.
- [3] M. Kawabata, O. Kurata, N. Iki, C. Fushimi, A. Tsutsumi, Analysis of igfc with exergy recuperation and carbon dioxide separation unit, Vol. 3, 2012, pp. 441–448.
- [4] M. Kawabata, O. Kurata, N. Iki, A. Tsutsumi, H. Furutani, Advanced integrated gasification combined cycle (A-IGCC) by exergy recuperation—technical challenges for future generations, *Journal of Power Technologies* 2 (2012) 90–100.
- [5] J. Milewski, A. Miller, Mathematical model of SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) for power plant simulations, in: *ASME Turbo Expo*, Vol. 7, 2004, pp. 495–501.
- [6] J. Milewski, Mathematical model of SOFC for complex fuel compositions, in: *International Colloquium on Environmentally Preferred Advanced Power Generation*, no. ICEPAG2010-3422, 2010.
- [7] S. Bozorgmehri, M. Hamed, Modeling and optimization of anode-supported solid oxide fuel cells on cell parameters via artificial neural network and genetic algorithm, *Fuel Cells* 12 (1) (2012) 11–23.
- [8] H. Marzoghi, M. Raoofat, M. Dehghani, G. Elahi, Dynamic modeling of solid oxide fuel cell stack based on local linear model tree algorithm, *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (5) (2012) 4367–4376.
- [9] P. Pianko-Oprych, Z. Jaworski, Numerical modelling of the micro-tubular solid oxide fuel cell stacks [przeгляд metod modelowania numerycznego mikrorurowych stał otlenkowych stosów ogniw paliwowych], *Przemysł Chemiczny* 91 (9) (2012) 1813–1815.
- [10] G. De Lorenzo, P. Fragiaco, Electrical and electrical-thermal power plants with molten carbonate fuel cell/gas turbine-integrated systems, *International Journal of Energy Research* 36 (2) (2012) 153–165.
- [11] G. De Lorenzo, P. Fragiaco, A methodology for improving the performance of molten carbonate fuel cell/gas turbine hybrid systems, *International Journal of Energy Research* 36 (1) (2012) 96–110.
- [12] H. Jeong, S. Cho, D. Kim, H. Pyun, D. Ha, C. Han, M. Kang, M. Jeong, S. Lee, A heuristic method of variable selection based on principal component analysis and factor analysis for monitoring in a 300 kw mcfc power plant, *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (15) (2012) 11394–11400.
- [13] J. Milewski, J. Lewandowski, A. Miller, Reducing co2 emissions from a coal fired power plant by using a molten carbonate fuel cell, in: *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, Vol. 2, 2008, pp. 389–395.
- [14] G. Discepoli, G. Cinti, U. Desideri, D. Penchini, S. Proietti, Carbon capture with molten carbonate fuel cells: Experimental tests and fuel cell performance assessment, *International Journal of Greenhouse Gas Control* 9 (2012) 372–384.
- [15] K. Chaichana, Y. Patcharavorachot, B. Chutichai, D. Saebea, S. Assabumrungrat, A. Arpornwichanop, Neural network hybrid model of a direct internal reforming solid oxide fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (3) (2012) 2498–2508.
- [16] G. Marban, T. Valdes-Solis, Towards the hydrogen economy?, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007) 1625–1637.
- [17] W. Budzianowski, Negative carbon intensity of renewable energy technologies involving biomass or carbon dioxide as inputs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (9) (2012) 6507–6521.
- [18] A. Sobolewski, . Bartela, A. Skorek-Osikowska, T. Iluk, Comparison of the economic efficiency of chp plants integrated with gazela generator [porównanie efektywności ekonomicznej układów kogeneracyjnych z generatorem gazu procesowego gazela], *Rynek Energii* 102 (5) (2012) 31–37.
- [19] R. Bove, P. Lunghi, Experimental comparison of mcfc performance using three different biogas types and methane, *Journal of Power Sources* 145 (2005) 588–593.
- [20] M. Krumbeck, T. Klinge, B. Döging, First european fuel cell installation with anaerobic digester gas in a molten carbonate fuel cell, *Journal of Power Sources* 157 (2006) 902–905.
- [21] K. Lobachyov, H. Richter, An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system, *Energy Conversion Management* 39 (1998) 1931–1943.
- [22] T. Kivisaari, P. Bjornbom, C. Sylwan, Studies of biomass fuelled MCFC systems, *Journal of Power Sources* 104 (2002) 115–124.
- [23] S. Troglisch, J. Hoffmann, L. Bertrand, Operation of molten carbonate fuel cells with different biogas sources: A challenging approach for field trials, *Journal of Power Sources* 145 (2005) 632–638.
- [24] C. Sequeira, P. Brito, A. Mota, J. Carvalho, L. Rodrigues, D. Santos, D. Barrio, D. Justo, Fermentation, gasification and pyrolysis of carbonaceous residues towards usage in fuel cells, *Energy Conversion and Management* 48 (7) (2007) 2203 – 2220.
- [25] M. R. Mahishi, D. Goswami, Thermodynamic optimization of biomass gasifier for hydrogen production, *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (16) (2007) 3831 – 3840.

- [26] E. Arato, B. Bosio, P. Costa, F. Parodi, Preliminary experimental and theoretical analysis of limit performance of molten carbonate fuel cells, *Journal of Power Sources* 102 (1-2) (2001) 74 – 81.
- [27] Hyprotech Corporation, HYSYS.Plant Steady State Modelling (1998).
- [28] H. Morita, M. Komoda, Y. Mugikura, Y. Izaki, T. Watanabe, Y. Masuda, T. Matsuyama, Performance analysis of molten carbonate fuel cell using a li/na electrolyte, *Journal of Power Sources* 112 (2) (2002) 509 – 518.
- [29] D. A. Brunner, S. Marcks, M. Bajpai, A. K. Prasad, S. G. Advani, Design and characterization of an electronically controlled variable flow rate ejector for fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (5) (2012) 4457 – 4466.
- [30] J. Milewski, K. Michalska, A. Kacprzak, Dairy biogas as fuel for a molten carbonate fuel cell – initial study, *Journal of Power Technologies* 93 (3) (2013) 161–168.

**Abstract**

This chapter contains an analysis of the applicability of biogas as a fuel for molten carbonate fuel cells. The paper presents the theoretical basis and the results of modeling of a fuel cell powered by biogas. Chapter also includes the results of experimental studies conducted in the laboratory for the simulated biogas composition. Identified the prospects of such solutions and suggests directions for further research on the topic.

**Key words**

fuel cells, biogas, organic waste, mathematical modeling, experimental studies