

Anna DUDA-KĘKUŚ*, Piotr TOMCZYK**

Wykorzystanie biomasy do produkcji energii elektrycznej w ogniach paliwowych

STRESZCZENIE. W Polsce udział biomasy w rynku źródeł energii odnawialnej jest potencjalnie największy. Na drodze zgazowania oraz w procesach fermentacyjnych biomasy uzyskuje się cenne paliwo gazowe, które może być zastosowane do wytwarzania energii elektrycznej w ogniach paliwowych. Tą drogą energia elektryczna może być uzyskiwana efektywnie i bez skażenia środowiska naturalnego. W artykule przedstawiono i przeanalizowano technologie zgazowania biomasy oraz zasadę działania, rodzaje i stan rozwoju ogni paliwowych. Dzisiaj, wytwarzanie energii elektrycznej w ogniach paliwowych zasilanych gazem pozyskanym z biomasy nie jest finansowo uzasadnione. Można przewidzieć, że w przyszłości uwarunkowania ekonomiczne dla tej technologii wytwarzania elektryczności będą dużo korzystniejsze: cena generatorów z ogniwami paliwowymi znacznie spadnie na skutek ich masowej produkcji, wzrosną również koszty pozyskiwania kopalnych surowców energetycznych.

SŁOWA KLUCZOWE: biomasa, zgazowanie, ogniwa paliwowe

Wprowadzenie

Energia elektryczna uważana jest za najdoskonalszą formę energii — łatwo i często, prawie bez strat może być przetwarzana (konwertowana) na każdy inny rodzaj energii, na

* Mgr inż., Wydział Zarządzania AGH, Kraków.

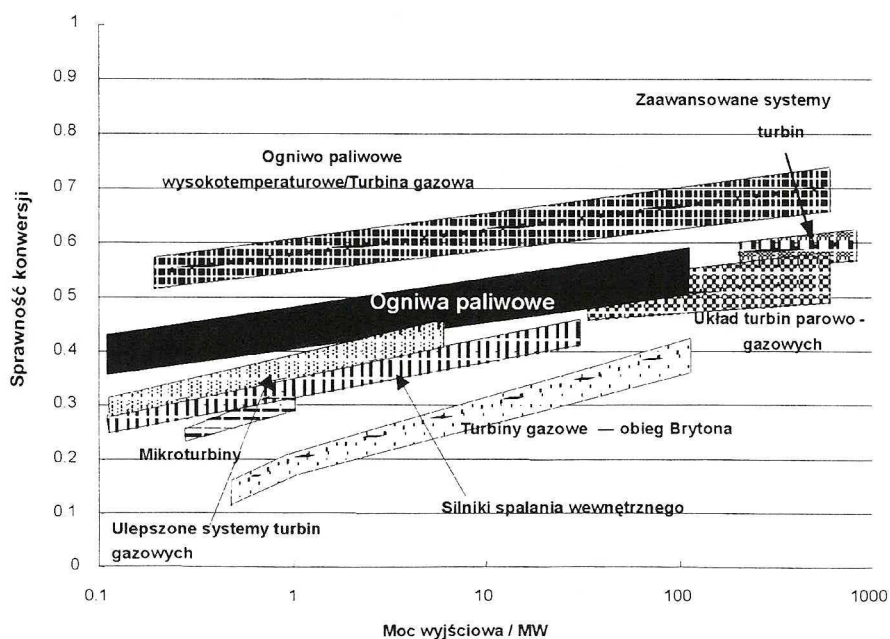
** Dr hab., prof. AGH, Wydział Paliw i Energii AGH, Kraków.

Recenzent: prof. dr hab. Adam GUŁA

przykład na energię mechaniczną, ciepłą, elektromagnetyczną (światłą) lub chemiczną. Energia elektryczna jest wykorzystywana tak powszechnie w przemyśle, administracji, gospodarce komunalnej i gospodarstwach domowych, że chwilowy jej brak, nawet w części sieci energetycznej powoduje chaos, ogromne straty finansowe, a także niezadowolenie i frustrację społeczną. Ceny energii elektrycznej stale rosną. Głównymi przyczynami tego wzrostu są:

- ✧ zwiększone zapotrzebowania związane z podnoszeniem się poziomu życia, a więc ilością energii zużywanej przez statystycznego mieszkańca,
- ✧ struktura przemysłu energetycznego, który obecnie bazuje głównie na surowcach kopalnych. Pozyskiwanie tych surowców jest coraz droższe, a ze względu na stopniowe wyczerpywanie się złóż tych surowców ceny ich będą wzrastać;
- ✧ masowe spalanie surowców kopalnych powoduje zatrucie środowiska substancjami szkodliwymi powstającymi w wyniku tego procesu oraz efekt cieplarniany związany ze wzrostem stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Przeciwdziałanie oraz usuwanie negatywnych skutków spalania surowców kopalnych pośrednio wpływa na ceny pozyskiwanej energii.

Niestety, wytwarzanie elektryczności poprzez konwersję energii chemicznej paliwa w elektrowniach na pracę mechaniczną do napędu generatorów związane jest z dużymi stratami, wynikającymi głównie z drugiej zasady termodynamiki. Strat tych nie można uniknąć. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w generatorach prądowórczych różnego rodzaju i mocy pokazana została na rysunku 1.



Rys. 1. Zależność sprawności generatorów prądowórczych od ich mocy i rodzaju

Fig. 1. Dependences of the efficiency of electric power generator on its type and power

Chociaż złoża paliw kopalnych nie uległy jeszcze całkowitemu wyczerpaniu, a wzrost cen energii jest stosunkowo powolny (nie licząc gwałtownych zmian związanych z wydarzeniami politycznymi), już obecnie ogromny wysiłek badawczy skierowany jest na wypracowanie nowych technologii pozyskiwania energii, które zaspokoilyby zapotrzebowanie na znacznie dłuższy okres i były jednocześnie nieszkodliwe dla otaczającej nas przyrody. W sposób oczywisty zainteresowanie energetyków kieruje się ku energiom odnawialnym (odtwarzalnym), pośrednio bądź bezpośrednio wykorzystującym energię promieniowania słonecznego. W przeciwieństwie do obecnych systemów energetycznych, system przyszłości powinien bazować nie na paliwach wytwarzanych w trakcie wielowiekowego cyklu ich powstawania, ale na natychmiastowym wykorzystaniu i przetwarzaniu dochodzącej do Ziemi energii pierwotnej Słońca. Energia słoneczna może zostać bezpośrednio lub pośrednio przetworzona na energię elektryczną w urządzeniach fotowoltaicznych, turbinach wiatrowych, hydroelektrowniach lub na drodze konwersji energii biomasy. Ze względu na swoje położenie geograficzne i warunki hydrogeologiczne, w Polsce największe potencjalne znaczenie ma wykorzystanie biomasy jako paliwa odtwarzalnego.

Na rysunku 1 zwraca uwagę wysoka sprawność konwersji energii chemicznej paliwa na energię elektryczną w ogniwach paliwowych. Ogniwa paliwowe mogą być zastosowane jako bardzo wydajne generatory prądowców w energetyce rozproszonej (cehuje je wysoka sprawność konwersji w zakresie stosunkowo niskich mocy). W tym układzie umożliwiają one również wytwarzanie energii cieplnej w skojarzeniu z energią elektryczną w pobliżu lokalnego odbiorcy (całkowita sprawność energetyczna takiego systemu wynosi wówczas 80 do 90%). Są one zatem urządzeniami prawie doskonale spełniającymi warunki generatorów przyszłości. Podstawowym paliwem ogniw paliwowych jest wodór. Paliwo bogate w wodór, nadające się do zasilania ogniw paliwowych, może być uzyskiwane poprzez zgazowanie biomasy. Zakłada się, że wytworzony w trakcie konwersji biomasy ditlenek węgla nie powoduje efektu cieplarnianego, ponieważ pochłonięty został w trakcie wzrostu roślin — głównego składnika biomasy. Tak więc, uzyskana na tej drodze energia elektryczna jest wytwarzana nie tylko w sposób efektywny, ale również jej produkcja nie powoduje zanieczyszczenia środowiska. Ogniwa paliwowe mogą być również zasilane paliwem bogatym w metan (po jego przetworzeniu na wodór w konwerterach zewnętrznych lub na drodze wewnętrznej konwersji w wysokotemperaturowych ogniwach paliwowych), uzyskiwanym w naturalnych procesach fermentacyjnych, zachodzących na przykład w komorach fermentacyjnych oczyszczalni ścieków, na wysypiskach, w zbiornikach gnojowicy itp.

1. Rola biomasy w systemie energii odnawialnej w Polsce

W tabeli 1 przedstawiono dane o potencjale energetycznym odnawialnych źródeł energii w Polsce.

TABELA 1. Energetyka odnawialna w Polsce w 2001 r.

TABLE 1. Renewable energy in Poland in 2001

Odnawialne źródło energii	Produkcja energii ze źródeł odnawialnych			
	zasoby [PJ]	możliwa produkcja [PJ]	wykorzystanie zasobów [%]	możliwość produkcji [%]
Biomasa	107	12,84	12	99,20
Energia wodna (małe elektrownie wodne)	2	0,1	5	0,77
Energia geotermalna	0,20	0,0002	0,10	0,002
Energia wiatru	0,05	0,00005	0,10	0,0004
Energia promieniowania słonecznego	0,03	0,0000006	0,002	0,000005
Ogółem	109	12,94	11,80	100

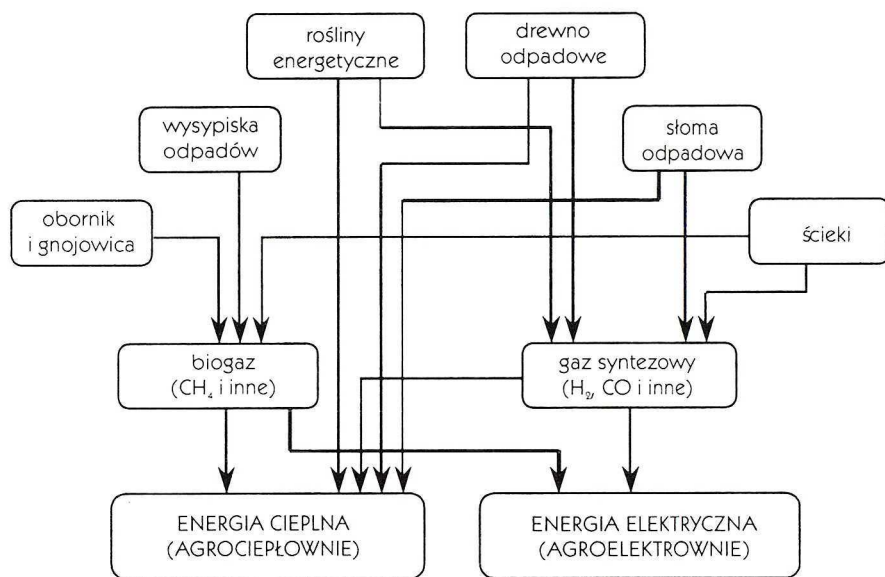
Źródło: Wiśniewski i in. 2003

Zasoby energetyczne biomasy są w Polsce wielokrotnie wyższe od sumy wszystkich innych zasobów energii odnawialnej. Przy wykorzystaniu dzisiaj stosowanych technik mogą one zostać przetworzone w relatywnie największym stopniu (w około 12%). Wynika stąd, że aż 99,2% możliwej do uzyskania energii odnawialnej w Polsce może pochodzić z biomasy. Oznacza to, że biomasa stanowi bezkonkurencyjnie zasobne źródło tego rodzaju energii w naszym kraju. Jego efektywne wykorzystanie powinno stanowić główny priorytet energetyki polskiej w najbliższej przyszłości.

2. Energia biomasy

Biomasa nazywa się substancję organiczną pochodzenia roślinnego, która powstaje w procesie fotosyntezy. Zalicza się do niej rośliny lądowe, wodne i wodorosty, a także odpady zwierzęce, odpady przemysłu spożywczego oraz odpady komunalne. Biomasa może też powstawać w wyniku tzw. metabolizmu społecznego. Ogólnie rzecz biorąc, termin ten określa substancję pochodzącą ze wzrostu roślin lub z odchodów zwierzęcych, zawierających szczątki roślinne. Biomasa występuje zazwyczaj w postaci drewna, słomy, osadów ściekowych podobnych do torfu, a także w formie odpadów komunalnych zawierających makulaturę (Kowalik 2002, 2003; Guzek, Pisarek 2002). W ostatnich latach coraz większe obszary rolnicze przeznaczają się na uprawę roślin energetycznych, takich jak wierzba energetyczna, topinambur, malwa pensylwańska itp. Udział tych roślin w ogólnym bilansie biomasy będzie wzrastał w następnych latach. Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie możliwe drogi przetworzenia biomasy do celów energetycznych.

Energia zmagazynowana w roślinach oraz w odpadach i odchodach zwierzęcych, nazywana jest energią biomasy. Energię chemiczną skumulowaną w biomacie możemy prze-



Rys. 2. Surowce energetyczne oraz produkty rynkowe z biomasy

Fig. 2. Biomass energetic resources and market products

tworzyć na ciepło przez spalanie (procesy zgazowania). W trakcie tego procesu powstaje ditlenek węgla (CO_2) w ilości, która została zaabsorbowana przez rośliny podczas ich wzrostu. Spalanie biomasy jest więc procesem odwrotnym do procesu fotosyntezy. Jak stąd widać, ilość ditlenku węgla zużywana w trakcie procesu fotosyntezy i wytwarzana w procesie spalania wzajemnie się bilansują. W przyrodzie cała biomasa ulega ostatecznie rozkładowi naturalnemu z wydzieleniem ciepła. Tak więc, prowadzenie procesu spalania biomasy z wydzieleniem ciepła imituje naturalny proces zachodzący na co dzień w przyrodzie. Właśnie dlatego energia, którą uzyskujemy z biomasy jest formą energii odnawialnej. Można bowiem przyjąć, że użytkowanie tej energii nie powoduje emisji dodatkowych ilości CO_2 do środowiska, w przeciwieństwie do spalania paliw kopalnych. Dzięki związkom węgla, które stanowią główny składnik biomasy, może ona być łatwo przetwarzana na paliwa stałe, ciekłe oraz gazowe.

3. Otrzymywanie wodoru z biomasy

Do zasilania ogniw paliwowych mogą być stosowane przetworzone paliwa gazowe i płynne uzyskane z biomasy:

1. **Biogaz.** Paliwo to jest mieszaniną gazów powstających w procesie fermentacji metabolicznej odpadów organicznych (biomasy). Odpady te mogą pochodzić z produkcji prze-

mysłowej (przemysł spożywczy), hodowli zwierząt, uprawy roślin lub oczyszczalni ścieków. W tabelach 2 i 3 podano odpowiednio typowe składy gazu wysypiskowego (uzyskanego z odwiertów umiejscowionych na wysypiskach komunalnych) oraz fermentacyjnego (uzyskanego ze ścieków komunalnych w komorach oczyszczalni).

TABELA 2. Skład gazu wysypiskowego
TABLE 2. Composition of land-field gas

Składnik	Zawartość
CH ₄	15—60%
CO ₂	10—40%
N ₂	1—6%
O ₂	1—8%
Związki siarki	ok. 200 mg/m ³
Związki chloru	ok. 100 mg/m ³
Związki fluoru	ok. 20 mg/m ³
Halogenopochodne węglowodorów alifatycznych	ok. 50 mg/m ³
Halogenopochodne węglowodorów aromatycznych	ok. 50 mg/m ³
Metale ciężkie	0—5 mg/m ³

Źródło: Niedźwiedz 2002

TABELA 3. Skład biogazu ze ścieków komunalnych (gazu fermentacyjnego)
TABLE 3. Composition of digester gas from waste treatment facilities

Składnik	Zawartość
CH ₄	55—70%
CO ₂	27—44%
H ₂	0,2—1%
H ₂ S	0,2—3%
CO	~ 1%
Związki chloru	< 1%
Związki amoniaku	< 1%
Halogenopochodne	< 1%

Źródło: Niedźwiedz 2002

2. Gaz syntezowy ze zgazowanie biomasy. Zgazowanie biomasy obejmuje zespół procesów lub pojedynczy proces całkowitej przemiany termochemicznej materiału stałego zawierającego pierwiastkowy węgiel w paliwo gazowe. Realizacja tej konwersji odbywa się

w wysokich temperaturach, w obecności czynnika zgazowującego (powietrza lub tlenu z dodatkiem lub bez dodatku pary wodnej i ditlenku węgla).

Skład gazu powstającego w procesie zgazowania biomasy zależy od:

- ✧ rodzaju biomasy,
- ✧ temperatury i ciśnienia w procesie zgazowania,
- ✧ rodzaju czynnika zgazowującego,
- ✧ typu gazyfikatora.

W tabeli 4 podano zakresy zmienności udziałów procentowych głównych składników gazu syntezowego uzyskanego w procesie zgazowania biomasy.

TABELA 4. Przykładowy skład gazu uzyskiwany w procesie gazyfikacji biomasy

TABLE 4. Exemplary composition of gas obtained by gasification of biomass

Składnik	Zawartość
CO	10—22%
H ₂	10—21%
CH ₄	1—5%
C _n H _m	1—16%
N ₂	23—65%
Cząstki stałe	20—3000 mg/m _n ³
Zanieczyszczenia smoliste	10—150 000 mg/m _n ³

Źródło: Pogoreutz 2000; Skorek, Kalina

Tak więc biomasę, jako odnawialne źródło energii, poddaje się wielokierunkowym procesom przetwarzania. Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie dwie spośród wielu możliwości przetworstwa i zastosowania biomasy jako nośnika energii do zasilania ogniw paliwowych.

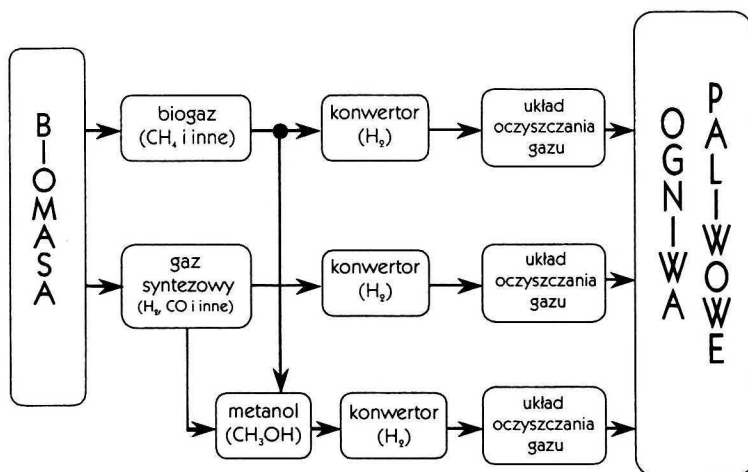
Ogniwa paliwowe są zasilane paliwem bogatym w wodór. Wynika stąd konieczność dalszego przetworzenia pierwotnych produktów gazowych otrzymywanych z biomasy. W przypadku biogazu, zawierającego duże ilości metanu, konieczne jest zastosowanie konwertora, który przetwarza CH₄ w wodór, na przykład na drodze reformingu parowego:



Z kolei dla gazu syntezowego, zawierającego duże ilości tlenu węgla, wykorzystywana jest reakcja gazu wodnego:

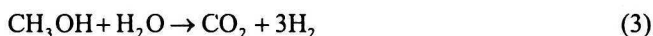


W przypadku metanolu, który może być wytwarzany z gazu syntezowego, reakcja reformingu zachodzi już powyżej 150°C na katalizatorze miedziowo-cynkowym:



Rys. 3. Zastosowanie produktów przetwarzania biomasy do zasilania ogniw paliwowych

Fig. 3. Application of biomass products in fuelling fuel cells



Paliwo otrzymane z konwertora jest następnie oczyszczane ze związków siarki, a w przypadku zasilania ogniw paliwowych niskotemperaturowych (patrz dalsza część pracy) ze śladowych ilości CO.

4. Charakterystyka ogniw paliwowych

Ogniwo paliwowe (OP) jest to ogniwo galwaniczne, które w sposób ciągły przetwarza energię chemiczną paliwa dostarczanego z zewnątrz w energię elektryczną. Produkt reakcji powinien być również odprowadzany na zewnątrz, aby warunki pracy ogniwa nie ulegały zmianie w trakcie jego eksploatacji. Zazwyczaj paliwem w tego typu ogniwach jest wodór, natomiast utleniaczem — tlen (czysty lub zawarty w powietrzu). Jedynymi produktami reakcji zachodzącymi w ogniwach paliwowych wodorowo-tlenowych są: energia elektryczna, ciepło i woda.



Proces zachodzący w OP jest jakby odwróceniem elektrolizy, w trakcie której następuje rozkład wody na tlen i wodór pod wpływem przepływu prądu przez elektrolit (a więc na skutek dostarczenia energii do układu).

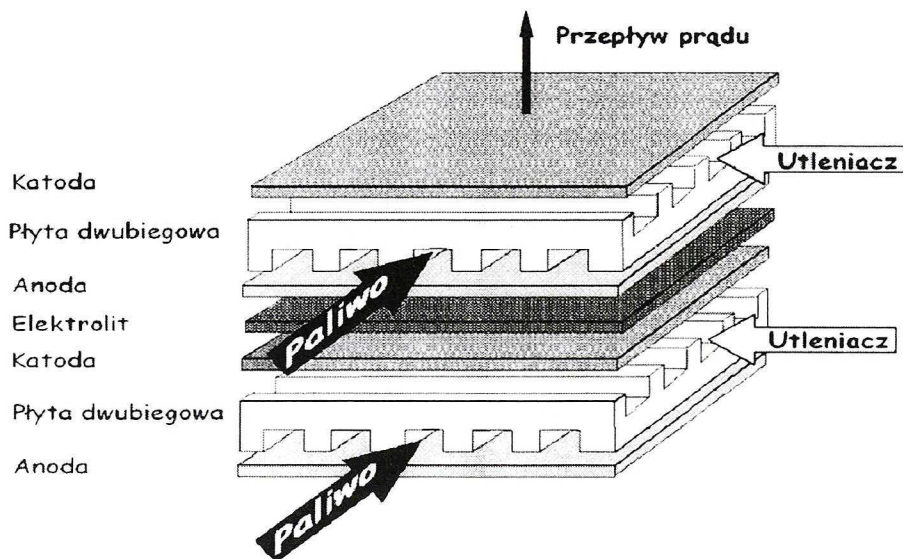
Ogniwo paliwowe działa w taki sam sposób jak dostępne w prawie każdym większym sklepie baterie lub akumulatory do zasilania przenośnych urządzeń elektrycznych: energia chemiczna zamieniana jest w nich bezpośrednio na energię elektryczną. Różnica polega na tym, że bateria lub akumulator mieszczą „w sobie” zapas energii chemicznej i przestają działać po jej wyczerpaniu, natomiast ogniwo paliwowe zasilane jest ze źródeł zewnętrznych i działa tak długo, jak długo paliwo (H_2) i utleniacz (O_2) dostarczane są do urządzenia.

Z pozoru ogniwo paliwowe to proste urządzenie składające się z dwóch elektrod (anody i katody) oddzielonych elektrolitem. Schematycznie, układ OP o tzw. geometrii płaskiej (najczęściej stosowanej w rzeczywistych generatorach działających na zasadzie OP) przedstawiony został na rysunku 4.

Pojedyncze ogniwo paliwowe wytwarza zbyt mało mocy, aby sprostać wymogom zasilania nawet małych urządzeń elektrycznych. Z tego względu OP łączy się w stosy, których napięcie i moc wyjściowa są odpowiednio zwielokrotnione. Zazwyczaj w stosie połączone są ze sobą setki pojedynczych ogniw.

Istnieje wiele rodzajów ogniw paliwowych. Klasyfikacja ta związana jest z rodzajem użytego elektrolitu i temperaturą pracy ogniwa (Fuel Cell Technology Handbook 2003; Handbook of Fuel Cells. Fundamentals, Technology and Applications 2003; Kordesch, Simader 1996).

Różnorodność OP powoduje, że istnieje możliwość dobrego dopasowania typu ogniwa paliwowego do potencjalnych warunków jego zastosowania.



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie układu ogniwa paliwowego o płaskiej geometrii (fragment stosu)

Fig. 4. Schematic drawing of fuel cell of planar geometry (part of a stack)

Poniżej podano wybrane informacje na temat obszarów zastosowań poszczególnych rodzajów OP oraz osiągniętego poziomu technologicznego:

- ✧ OP z elektrolitem polimerowym: bardzo szeroki zakres zastosowań — począwszy od mikroogniw o mocy ułamka wata, przez kilku—kilkusetwatowe urządzenia do zasilania przenośnych urządzeń elektrycznych (aparatów telefonicznych, laptopów, odbiorników RTV itp.), generatory o mocy 1—20 kW stosowane w energetyce rozproszonej do produkcji energii elektrycznej i ciepła jednocześnie, ruchome urządzenia do zasilania samochodów elektrycznych o mocy do 200 kW, stacjonarne generatory elektryczności i ciepła o mocy do 250 kW. Według zgodnej opinii, OP tego typu znajdują bardzo szerokie zastosowanie w przyszłości. Obecny poziom technologiczny: przedkomercyjny.
- ✧ OP z elektrolitem zasadowym: obecnie używane wyłącznie do zastosowań specjalnych — zasilania pojazdów kosmicznych, nieliczne zastosowania wojskowe.
- ✧ OP z kwasem fosforowym: pierwsze OP paliwowe dostępne na rynku komercyjnym. Sprzedano ponad 300 generatorów PC 25 o mocy elektrycznej 200 kW, wyprodukowanych przez firmę ONSI-UTC, zasilanych bezpośrednio gazem ziemnym. Po roku 2000 obserwowany jest powolny spadek zainteresowania tego typu OP.
- ✧ OP ze stopionymi węglanami — wyłącznie nadające się do zastosowania w urządzeniach stacjonarnych o mocy powyżej 50 kW (najczęściej budowane są jednostki o mocy 200—250 kW). Optymalne do zasilania paliwem pochodzącym ze zgazowania węgla lub biomasy.
- ✧ OP z elektrolitem ze stałych tlenków — budowane są w dwóch konfiguracjach: rurowej i płaskiej. OP o konfiguracji rurowej stosowane w generatorach stacjonarnych o mocy 100—300 kilowatów, w których często stosuje się dodatkowo mikroturbiny gazowe — urządzenia takie osiągają sprawność konwersji paliwa na energię elektryczną powyżej 60%. Obecny poziom technologiczny: przedkomercyjny. Generatory konfiguracji płaskiej są obecnie w stanie badań i prób na poziomie prototypów. Tego typu generatory mają być stosowane w mniejszych jednostkach o mocy od kilku do kilkaset kilowatów.

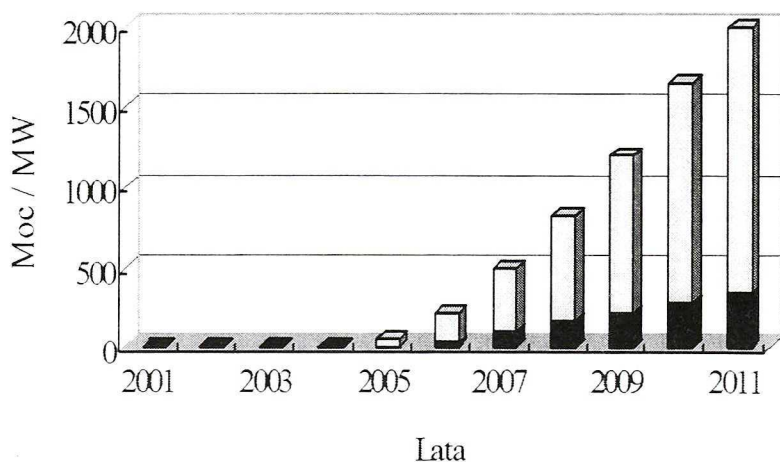
Ogniwa paliwowe mają szereg zalet, które powodują, że są prawie idealnymi generatorami prądotwórczymi dla zastosowań lokalnych (zasilania urządzeń przenośnych, samochodów, gospodarstw domowych i małych obiektów socjalnych, małych elektrowni):

- ✧ pracują cicho i prawie nie powodują skażenia środowiska;
- ✧ sprawność generatorów OP jest prawie niezależna od obciążenia;
- ✧ możliwa jest budowa modułowa generatorów, pozwalająca na bieżące dostosowanie ich wielkości do zmieniających się potrzeb;
- ✧ cechuje je prostota konstrukcyjna;
- ✧ istnieje możliwość współwytwarzania energii z generatorami innego typu we wspólnym systemie o wysokiej sprawności;
- ✧ możliwy jest ich szybki rozruch.

5. Koszt energii elektrycznej wytworzonej w ogniwie paliwowym zasilanym paliwem pochodzącym z przetworzenia biomasy

Głównym powodem, dla którego ogniwa paliwowe nie znalazły jeszcze szerokiego zastosowania w energetyce i transporcie jest ich wysoki koszt. Cena najtańszego komercyjnie dostępnego systemu OP, jednostki PC 25 (firma ONSI-UTC, PAFC) o mocy 200 kW, wynosi ok. 900.000 USD., czyli ok. 4.500 USD/kW. W przypadku bardziej nowoczesnych polimerowych i wysokotemperaturowych ogniw paliwowych współczynnik koszt/moc jest nawet kilkukrotnie wyższy. Miernikiem opłacalności w energetyce dla generatorów prądotwórczych jest koszt ok. 1000 USD/kW. Oczekuje się, że masowa produkcja ogniw paliwowych znacznie obniży ich cenę jednostkową. Na rysunku 5 przedstawiono prognozowany wzrost sumarycznej mocy zainstalowanych ogniw paliwowych na rynku europejskim w latach 2001—2011 (wg Frost&Sullivan za Huhn 2002). Olbrzymie nadzieje wiąże się z postępem technicznym w tej dziedzinie, który nie tylko ma doprowadzić do zastąpienia używanych obecnie drogich katalizatorów (platyna) tańszymi materiałami, ale także ma zwiększyć niezawodność i długotrwałość działania ogniw paliwowych.

O ile jeszcze kilka lat temu w publikacjach kładziono nacisk na bardzo wysoką sprawność ogniw paliwowych zasilanych wodorem w stosunku do innych rodzajów generatorów prądotwórczych, to obecnie analizie poddaje się cały cykl energetyczny, uwzględniający również koszty i zanieczyszczenia związane z etapem konwersji paliwa.

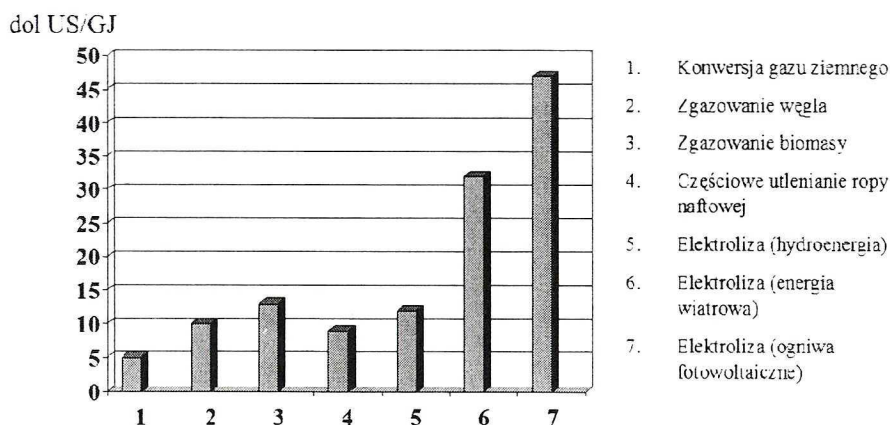


Rys. 5. Moc elektryczna zainstalowanych ogniw paliwowych (część jasnoszara słupka: kogeneracja energii elektrycznej i cieplnej, część ciemnoszara słupka: produkcja wyłącznie energii elektrycznej) — prognoza na lata 2001—2011 (Huhn 2002)

Fig. 5. Electric power of fuel cells installed (light-gray part of column: cogeneration of power and heat, dark-gray part of column: power only) — forecast for 2001 to 2011 (Huhn 2002)

Długotrwałość działania ogniw paliwowych (*lifetime* — „czas życia”) jest kolejnym czynnikiem wpływającym na opłacalność proponowanych rozwiązań, ze względu na koszt amortyzacji urządzeń. Obecnie przyjmuje się, że czas działania stacjonarnych generatorów OP powinien przekraczać 40 000 godz. (ponad 4,5 roku). Testy polowe OP z kwasem fosforowym (PC25) wykazały, że ich trwałość spełnia założone oczekiwania, jednak przy relatywnie niskiej sprawności konwersji (poniżej 40%). W przypadku OP ze stopionymi węglanami żywotność ta osiągana jest jedynie incydentalnie. Dla ogniw paliwowych tlenkowo-ceramicznych i polimerowych prowadzone są obecnie testy w trakcie ich długotrwałego działania. Producenci tych urządzeń spodziewają się, że uda im się znacznie przekroczyć istniejącą obecnie normę 40 000 godz.

Wysokość kosztów wytwarzania wodoru uzyskanego różnymi metodami przedstawiona została na rysunku 6 (w odniesieniu do cen z roku 1999) (Hart 1999).



Rys. 6. Koszty wytwarzania wodoru różnymi metodami (w odniesieniu do cen z roku 1999) (Hard 1999)

Fig. 6. Costs of hydrogen production using various technologies (related to prices in 1999) (Hard 1999)

Z wykresu zamieszczonego na rysunku 6 wynika, że w chwili obecnej najtańszym źródłem wodoru jest proces konwersji gazu ziemnego (CH_4). Inne metody, takie jak gazyfikacja węgla, częściowe utlenianie ropy naftowej czy elektroliza z użyciem energii elektrycznej z hydroelektrowni, okazują się być tańsze niż gazyfikacja biomasy. A więc tak długo, jak cena surowców kopalnych (w szczególności gazu ziemnego) pozostanie na obecnym, stosunkowo niskim poziomie, zasilanie ogniw paliwowych paliwem uzyskanym w procesie zgazowania biomasy będzie nieuzasadnione ze względów ekonomicznych. Jednocześnie należy podkreślić, że jest to najtańszy sposób kogeneracji elektryczności i ciepła ze źródeł odnawialnych, którego udział w bilansie energetycznym może stale wzrastać (energia z hydroelektrowni w praktyce osiągnęła już pułap swoich możliwości). Jeżeli uwzględni się coraz ostrzejsze wymagania ekologiczne, rozwój technologii ogniw paliwowych, procesów zgazowania, energetyki rozproszonej oraz wpływ inżynierii genetycznej na efektywność

pozyskiwania biomasy, to może okazać się wkrótce, że będzie to coraz szerzej stosowana technologia energetyczna. W czasopismach fachowych coraz częściej przedstawiane są analizy technologiczne i ekonomiczne systemów gazyfikatorów biomasy i urządzeń prądotwórczych różnych rodzajów. Z pracy Lobachova i Richtera (1998) wynika, że zakładając:

- ✧ konfigurację systemu gazyfikator biomasy + węglanowe ogniwo paliwowe o mocy 150 MW,
- ✧ sprawność ogniwa paliwowego: 53%,
- ✧ dopłatę budżetową: 6%,
- ✧ „czas życia” instalacji: 30 lat,
- ✧ wykorzystanie mocy instalacji: 70%,

koszt generowanej energii elektrycznej będzie wynosił od 2,5 do 3,7 UScent/kW·h. Jest on niższy od oszacowanych kosztów energii elektrycznej wytworzonej w prądnicach magneto-elektrycznych napędzanych turbinami zasilanymi gazem syntezowym ze zgazowania biomasy (3,5 do 9,5 UScent/kW·h, w zależności od stosowanego typu turbiny i mocy). W obliczeniach założono wskaźniki nieosiągalne dla współczesnych OP (sprawność, żywotność). Obserwując jednak stały postęp techniczny w tej dziedzinie można przyjąć, że jest to założenie realistyczne dla następnego dziesięciolecia.

Podsumowanie

Dla jak najoszczędniejszego wykorzystania paliwa odnawialnego, powinno ono być stosowane w wysokowydajnych generatorach prądu. Takimi generatorami są ogniwa paliwowe, których sprawność konwersji energii chemicznej paliwa na energię elektryczną zazwyczaj przekracza 40%. Ogniwa paliwowe nie powodują zanieczyszczenia środowiska, pracują cicho i mogą być stosowane w generatorach małej i średniej mocy w energetyce rozproszonej, gdzie również może być wykorzystywane wytwarzane w czasie ich pracy ciepło odpadowe.

Paliwo takie może być wytworzone na drodze zgazowania biomasy (gaz syntezowy), a jego głównymi składnikami są H_2 , CO, CO_2 , CH_4 , C_nH_m i N_2 . Innym źródłem paliwa gazu zdatnego do zasilania ogniw paliwowych jest biogaz pochodzący z wysypisk odpadów (gaz wysypiskowy) oraz z komór fermentacyjnych (gaz fermentacyjny). Głównymi składnikami tego gazu są CH_4 , CO i H_2 . Gaz syntezowy, wysypiskowy lub fermentacyjny jest następnie przetwarzany (konwertowany) na paliwo bogate w wodór i oczyszczany przed użyciem go do zasilania ogniw paliwowych.

Produkcja wodoru z biomasy jest droższa w porównaniu z konwersją metanu (gazu ziemnego). Cena biomasy jest stale za wysoka w stosunku do innych paliw kopalnych a różnicy tej nie rekompensują zalety jej stosowania („zerowa” emisja dwutlenku węgla) i duży potencjał rynkowy. Konkurencyjność ekonomiczna biomasy na rynku paliw nie jest więc możliwa bez dodatkowych subwencji proekologicznych.

Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wskazują jednak, że zasilanie ogniw paliwowych gazem syntezowym uzyskanym w procesie zgazowania biomasy będzie w przyszłości bardziej uzasadnione ekonomicznie niż zasilanie nim prądnic napędzanych silnikami cieplnymi.

Praca finansowana z badań statutowych AGH 11.11.210.62

Literatura

- GUZEK K., PISAREK M., 2002 — Wykorzystanie biomasy na cele energetyczne w Polsce. *Czysta Energia*, 2 (6) s. 6—7.
- Fuel Cell Technology Handbook .Red. G. Hoogers. Boca Raton, CRC, 2003.
- Handbook of Fuel Cells. Fundamentals, Technology and Applications. Red. W. Vielstich, A. Lamm, H.A. Gasteiger. Chichester, Wiley, 2003.
- HART D., 1999 — Hydrogen as an energy carrier. *Energy World*, s. 272—6.
- HUHN K., 2002: European stationary market seeking a breakthrough. *The Business of Fuel Cells*, 1, s. 2—4.
- KORDESCH K., SIMADER G., 1996 — Fuel Cells and Their Applications. Weinheim, VCH.
- KOWALIK P., 2002 — Wykorzystanie biomasy jako surowca energetycznego. *Czysta energia*, 10 (14), s. 8—9.
- KOWALIK P., 2003 — Wykorzystanie biomasy jako surowca energetycznego. [W:] *Termochemiczne przetwórstwo węgla i biomasy*, red.: M. Ściążko, H. Zieliński. Zabrze — Kraków, Wydawnictwo Instytutu Chemicznej Przeróbki Węgla i Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, s. 39—51.
- LOBACHYOV K.V., RICHTER H.J., 1998 — An advanced integrated biomass gasification and molten fuel cell power system. *Energy Convers. Mgmt.*, 39, s. 1931—1943.
- NIEDŹWIEDŹ A., 2002 — Zastosowanie biogazu dla zasilania ogniw paliwowych. Praca magisterska, Kraków, WFiTJ, AGH.
- POGOREUTZ M., 2000 — Economical and technological comparison of small—scale CHP on the basis of biomass. Sevilla, 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry.
- SKOREK J., KALINA J. — Paliwa gazowe dla układów kogeneracyjnych. Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska w Gliwicach; Zakład Termodynamiki i Energetyki Gazowej Seminarium cykliczne „Elektroenergetyka w procesie przemian” — Generacja rozproszona.
<http://kaziu.ise.polsl.gliwice.pl/kalina/paliwa.pdf>
- WIŚNIEWSKI G., MICHAŁOWKA-KNAP K., KUNIKOWSKI G., 2003 — Odnawialne zasoby energii w Polsce, ich przestrzenne rozmieszczenie i procedury lokalizacyjne, *Czysta energia*, 11 (27), s. 28—29.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE OPRACOWANIA I PRZYGOTOWANIA DO DRUKU PUBLIKACJI W DZIALE WYDAWNICZYM: STUDIA, ROZPRAWY, MONOGRAFIE

1. Treść merytoryczna publikacji i sposób ich ujęcia powinny odpowiadać poziomowi działu i powinny odnosić się do tytułu działu: Studia, Rozprawy, Monografie.

2. Układ publikacji powinien być przejrzysty, zwarty, a jego treść podzielona na rozdziały tworzące zamkniętą całość. Objętość publikacji nie powinna być mniejsza od 5 arkuszy wydawniczych i nie powinna przekraczać 10 arkuszy wydawniczych (ok. 120 stron).

3. Każda publikacja powinna zawierać streszczenie w języku angielskim w objętości 1,5—2 strony maszynopisu. Tabele i rysunki zawarte w publikacji powinny również zawierać podpisy w języku angielskim.

WSKAZÓWKI DLA AUTORÓW DOTYCZĄCE PRZYGOTOWANIA TEKSTU NA DYSKIETCE

Kompletny materiał do druku powinien zawierać:

- tekst zasadniczy,
- tytuł w języku polskim i angielskim,
- tabele i rysunki,
- podpisy pod tabele i rysunki w języku polskim oraz angielskim,
- streszczenia i słowa kluczowe w obu językach.

Dyskietkę z wpisanym tekstem należy nadesłać wraz z jednym kompletnym wydrukiem przygotowanej pracy na papierze formatu A4. Liczba wierszy na stronie i znaków w jednym wierszu jest dowolna. Należy tylko zachować jednowierszowe odstępy między poszczególnymi akapitami.

Tekst powinien być zapisany w jednym z następujących formatów:

- ASCII 8 — prosimy o podanie standardu polskich liter (np. Centralno-europejskie, Latin 2, Mazowia),
- WORDPERFECT (wersja 5.0, 5.1 i następne),
- WORD FOR WINDOWS (wersja 2.0, 6.0 i 7.0).

Na marginesie nadesłanego wydruku prosimy zaznaczyć miejsca wstawienia rysunków i tabel.

Tytuły i podtytuły należy oddzielić od tekstu światłem górnym i dolnym oraz określić stopień tytułu (I rzędu, II, III... . Rozdział zasadniczy — I rz., podrozdział — II rz., tytuł podrzędny — III rz. itd.) na wydruku.

Tabele należy umieścić w osobnym pliku. Na wydruku każda tabela powinna być opisana, tzn.: nazwisko autora, tytuł artykułu (w przypadku prac zbiorowych), tytuł tabeli i numer.

Wszelkie symbole we wzorach i powołaniach na nie w tekście prosimy pisać pismem prostym. Ważne jest, by 0 (zero) wpisane było przez klawisz cyfrowy, w celu odróżnienia go od litery O (o).

Rysunki (czarno-białe) prosimy dostarczać:

— na papierze lub kalce (w przypadku prac zbiorowych każdy rysunek musi być opisany: nazwisko autora, tytuł artykułu i tytuł rysunku),

— na dyskietce w jednym z podanych niżej formatów:

- a) *.TIF — format zapisu mapy bitowej wykorzystywany przez większość programów obsługujących scanery,
- b) *.IMG — pliki tworzone przez programy pracujące w środowisku GEM,
- c) *.PLT — rysunki eksportowane z programów typu CAD,
- d) *.CGM — format zapisu grafiki wykorzystywany m.in. przez takie programy, jak: HARVARD PACKARD GRAPHICS, APPLAUSE,
- e) *.PCX,
- f) *.CDR z programu CorelDRAW.

Literatura powinna być umieszczona na końcu pracy z oznaczeniem „LITERATURA”.

W trakcie wpisywania tekstu prosimy o przestrzeganie następujących zasad:

- nie należy kończyć poszczególnych wierszy klawiszem ENTER,
- nie stosować zaciągów akapitowych za pomocą tabulatora czy spacji,
- poszczególne akapity należy rozdzielać wstawiając jedną pustą linię,
- nie dzielić ręcznie wyrazów,

- nie justować poszczególnych linii akapitu za pomocą klawisza spacji,
- nie rozspacjowywać wyrazów (np. t y t u ł),
- nie podkreślać wyrazów, zdań (np. podkreślony).

WSKAZÓWKI EDYTORSKIE

1. Przy **podziale tekstu** na rozdziały i podrozdziały kilku stopni należy stosować numerację cyfrową wielorzędową:

rozdziały — 1, 2, ...

podrozdziały pierwszego stopnia — 1.1, 1.2, ..., 2.1, 2.2, ...

podrozdziały drugiego stopnia — 1.1.1, 1.1.2, ..., 1.2.1, 1.2.2, ...

podrozdziały trzeciego stopnia i ew. inne tytułiki pozostawia się zazwyczaj nie numerowane.

2. Przy numeracji liczbowej wielorzędowej tekstu ilustracje zaleca się numerować w obrębie rozdziałów, nadając im podwójną numerację, np. rys. 4.6 (szósty rysunek w czwartym rozdziale). Jeżeli ilustracji jest niewiele, numeruje się je kolejno w całej pracy. W przypadku cudzych ilustracji należy podać źródło, z którego je zaczerpnięto.

3. Według tej samej zasady numeruje się tabele. Numer i tytuł tabeli umieszczamy nad tabelą.

4. **Wzory matematyczne** numeruje się podobnie, podając numer ujęty w nawiasy okrągłe przy prawym marginesie (jeśli jest ich mało, nie wymagają numeracji). Wskaźniki i wykładniki powinny być napisane wyraźnie i czytelnie. Powinny mieć jednakową wielkość i być prawidłowo obniżone lub podwyższone w stosunku do linii wiersza podstawowego. Obowiązkiem Autora jest dopilnowanie prawidłowego zapisu wzorów i ich objaśnień na wydruku przed złożeniem materiałów do Wydawnictwa.

5. Między liczbami i datami należy umieszczać pauzę długą bez odstępów, np. 1963—1975, 1—27. W połączeniach typu: południowo-zachodni — łącznik (krótka pauza) bez odstępów.

6. Autor sporządza jeden wykaz literatury dla całej pracy. Kolejność pozycji bibliograficznych powinna być alfabetyczna (wg nazwisk autorów). Prace zbiorowe, katalogi itp. szereguje się alfabetycznie wg tytułów.

Elementy i kolejność opisu bibliograficznego

A. Książki jednego lub kilku (do trzech) autorów:

Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł. Oznaczenie kolejności wydania (Wyd. 1, 2, ...). Miejsce wyd., nazwa wydawcy, np.:

Rysiowa H., 1969: Wstęp do matematyki współczesnej. Wyd. 2. Warszawa, PWN.

Jeżeli autorów jest więcej niż trzech, zaleca się stosowanie następującej formy zapisu:

Kluz T. i in., 1972: Budownictwo betonowe. T. 7. Warszawa, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii.

B. Prace zbiorowe, zbiory prac:

Tytuł. Inicjały imion i nazwisko redaktora naukowego (poprzedzone skrótem Red.). Oznaczenie kolejności wydania.

Numer tomu (części, jeżeli jest). Miejsce wydania, wydawca, rok wydania, np.:

Poradnik inżyniera. Elektronika. Red. B. Paszkowski. Wyd. 2. T. 1. Warszawa, WNT, 1971.

C. Artykuły z czasopism i innych wydawnictw ciągłych:

Nazwisko i inicjały imion autora, rok wydania: Tytuł. Nazwa Czasopisma, numer rocznika (tomu), numer zeszytu, strony, np.:

Nowakowski J., Kapinos J., 1992: Przemysł aluminiowy — stan obecny i tendencje zmian. Gosp. Sur. Miner., 8/1, s. 17—28.

7. Powołania w tekście na rysunki, tabele, wzory, rozdziały i podrozdziały — zgodnie z numeracją. W powołaniach na literaturę podajemy w nawiasie okrągłym nazwisko autora i rok wydania, np. (Rysiowa 1969) — jeden autor, (Nowakowski, Kapinos 1992) — dwóch autorów, (Kluz i in. 1972) — więcej niż trzech autorów, a w przypadku prac zbiorowych — tytuł (początek tytułu) i rok wydania (Poradnik... 1971).

W przypadku maszynopisów gwarancyjnych (materiały konferencyjne, sprawozdania itp.) redakcja nie będzie wносить poprawek do nadesłanego tekstu.

Biomass utilization for energy power production in fuel cells

Abstract

Potentially, biomass holds the largest share in the renewable energy market in Poland. Gasification and fermentation of biomass can produce a valuable gas fuel, which can be further employed for generation of electric power in fuel cells. This way, the electricity can be produced efficiently and without pollution of environment. The technologies of biomass gasification as well as principles of operation of fuel cells, their types and state-of-the-art status were presented and discussed in the paper. Production of electricity in the fuel cells fed with the gaseous fuel obtained by the gasification of biomass is today financially unprofitable. However, one may anticipate that in the near future, the economical conditions will be more favourable for this technology of electric power production: prices of fuel cells generators will decrease due to their massive production whereas costs of fossil fuels will increase.

KEY WORDS: biomass, gasification, fuel cells