

Wpłynęło 12.06.2013 r.  
Zrecenzowano 02.07.2013 r.  
Zaakceptowano 30.07.2013 r.

## Ogniwa paliwowe w elektrociepłowniach rolniczych

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

**Krzysztof BUTLEWSKI**<sup>ABCDEF</sup>

*Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Oddział w Poznaniu*

### Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję efektywnej rolniczej elektrociepłowni syngazowej, w której następuje konwersja energii zawartej w biomase na energię elektryczną i ciepłą. W elektrociepłowni tej wykorzystano zgazowarkę z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym oraz wysokotemperaturowe ogniwo paliwowe ze stopionymi węglanami MCFC. Ogniwo to umożliwia efektywne wykorzystanie pod względem energetycznym dostępnej biomasy w obszarach wiejskich oraz przyczynia się do zmniejszenia emisji dwutlenku węgla, który produkowany na anodzie ogniwa bierze udział w reakcjach chemicznych na katodzie. W elektrociepłowniach rolniczych o mocy ponad 1 MW korzystne jest zastosowanie cyrkulacyjnych gazyfikatorów fluidalnych, w których potrzebna energia zewnętrzna może być dostarczona z innych odnawialnych źródeł energii. Nadwyżkę ciepła powstającego w układach czyszcząco-chłodzących oraz zawartego w odlotowym gazie anodowym można zamieniać na energię elektryczną za pomocą modułów ORC.

**Słowa kluczowe:** rolnicza elektrociepłownia, gazyfikacja biomasy, ogniwo paliwowe, moduł ORC

### Wstęp

W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój odnawialnych źródeł energii w Polsce i świecie. Szczególnie dynamicznie rozwijają się systemy wykorzystujące energię promieniowania Słońca w ogniwach fotowoltaicznych i panelach słonecznych, energię wiatru w wiatrakach o osi poziomej i pionowej, energię ciepłą Ziemi w pompach i wymiennikach ciepła oraz energię biomasy za pomocą technologii spalania oraz procesów biologicznych i fizycznych. W rolniczych elektrociepłowniach do produkcji energii mogą być wykorzystane turbiny parowe, turbiny gazowe, silniki spalinowe, silniki Stirlinga lub ogniwa paliwowe. Szczególnie



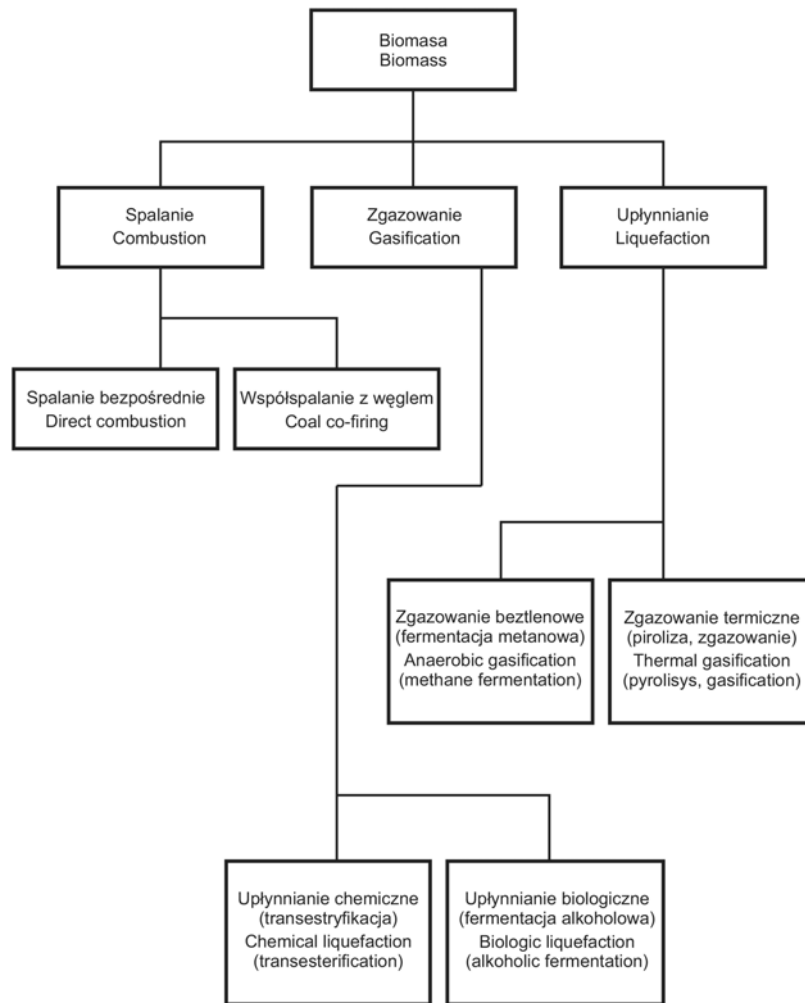
ważną rolę w rozwoju efektywnych elektrociepłowni rolniczych odgrywają ogniwa paliwowe, których wszechstronne zastosowanie przewiduje się w najbliższych latach [BOSIO i in. 2010; BUTLEWSKI 2012; SURYGALA 2008].

### **Konwersja biomasy do paliw gazowych i płynnych**

W Polsce prowadzone są intensywne badania dotyczące efektywnego wykorzystania biomasy w rozproszonym systemie energetycznym. Tradycyjnym sposobem wykorzystania biomasy jest jej spalanie w kotłach oraz – rozpowszechniony ostatnio ze względu na możliwość uzyskania certyfikatów ekologicznych – proces współspalania biomasy z węglem. Najbardziej zaawansowanym technologicznie sposobem wykorzystania energetycznego biomasy jest jej konwersja do paliw gazowych lub płynnych (rys. 1), które mogą być wielokierunkowo zastosowane w różnorodnych układach energetycznych [BUTLEWSKI 2012]. Biomasa o dużej zawartości lignin i celulozy, do której można zaliczyć drewno poprodukcyjne, słomę, pozostałości z produkcji rolnej i leśnej, osady ściekowe, rośliny z upraw energetycznych nadają się do procesu zgazowania, w wyniku którego powstaje syngaz, składający się głównie z wodoru i tlenku węgla. Natomiast biomasa, stanowiąca produkt uboczny pochodzący z hodowli zwierząt (np. gnojowica i obornik), nadaje się do procesu beztlenowej fermentacji, w wyniku której powstaje biogaz, składający się głównie z metanu i dwutlenku węgla [GŁASZCZKA i in. 2010; MYCZKO (red.) 2011]. Z upraw oleistych, np. rzepaku, słonecznika, gorczycy w wyniku transestryfikacji uzyskuje się biodiesel i bioglicerol. Biodiesel wykorzystuje się głównie do napędu silników z zapłonem samoczynnym maszyn roboczych i pojazdów, natomiast bioglicerol może być wykorzystywany jako spoiwo zwiększające wartość opałową pelet i brykietów wytwarzanych z biomasy [GOLIMOWSKA, GOLIMOWSKI 2010].

### **Konwersja biomasy do wodoru**

Coraz więcej nowych rozwiązań w zakresie konwersji biomasy do metanu i wodoru [HARYANTO i in. 2009; OHKUBO i in. 2010; RYCKEBOSCH i in. 2011; SURYGALA 2008] stwarza korzystne warunki do zastosowania ogniw paliwowych w elektrociepłowniach rolniczych. Wodór z biomasy można uzyskać dwustopniowo lub jednostopniowo za pomocą procesów termochemicznych, biologicznych i chemicznych (rys. 2). W procesie dwustopniowym uzyskane substancje gazowe lub płynne poddaje się procesowi reformingu, natomiast w procesie jednostopniowym otrzymaną mieszaninę gazów, składającą się głównie z wodoru, oczyszcza się do stanu odpowiedniego do bezpośredniego zastosowania w ogniwie paliwowym. Podstawowe procesy reformingu biopaliw można podzielić na trzy rodzaje: reforming parowy (SR), półspalanie (POX) oraz konwersję autotermiczną (ATR). Reforming parowy prowadzi się w warunkach podwyższonej temperatury i niskiego ciśnienia na katalizatorach niklowych. Proces ten jest silnie endotermiczny. Temperatura gazów wprowadzanych do złoża katalizatora wynosi 450–650°C, natomiast gazów wylotowych 700–950°C. W trakcie tego procesu zachodzi wiele reakcji chemicznych, wśród których dominującymi są reakcja reformingu parą wodną i reakcja gazu wodnego, które przedstawiają się następująco:



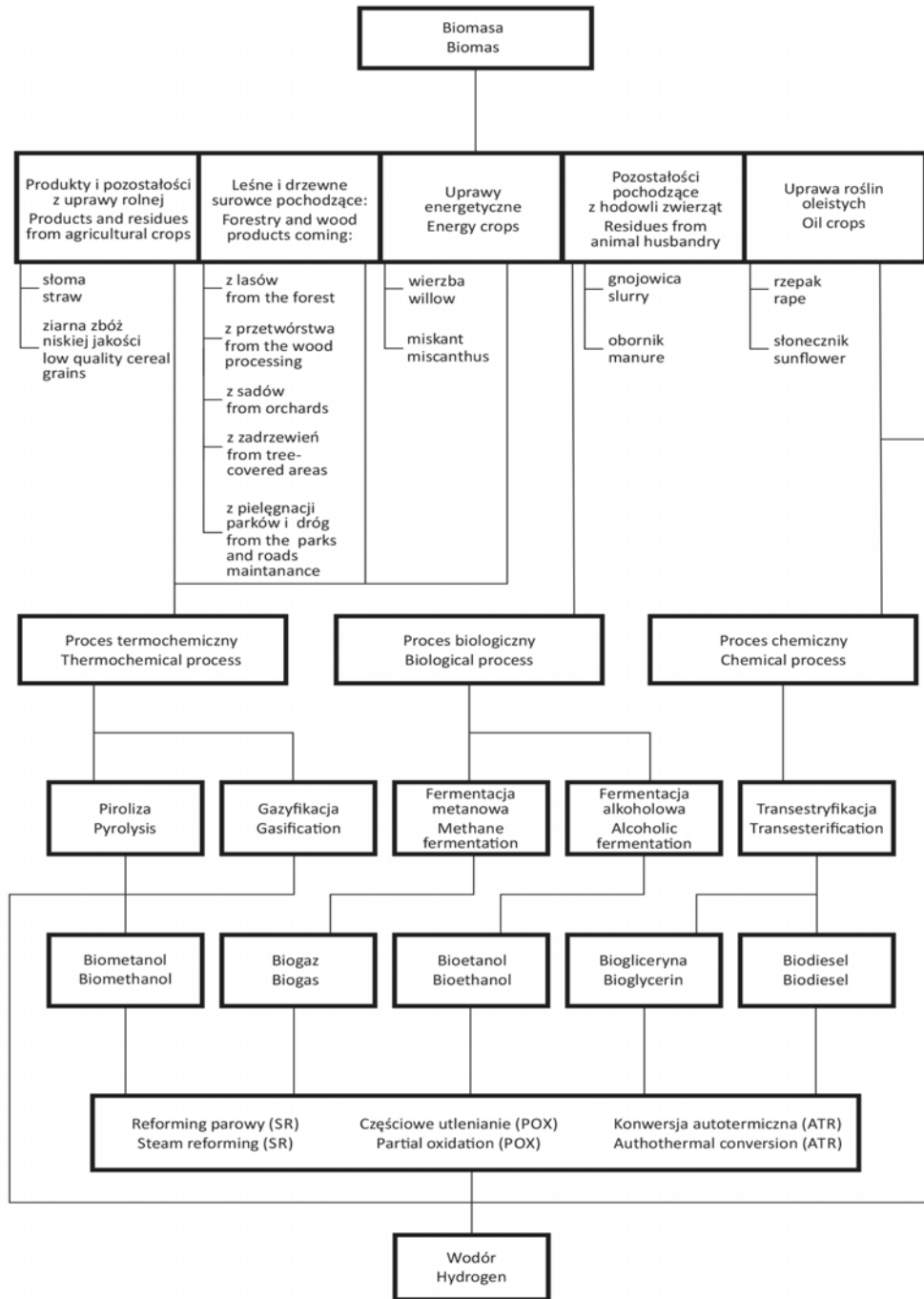
Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys.1. Sposoby konwersji biomasy do celów energetycznych  
Fig.1. The methods of biomass conversion for the energetic purpose



W procesie reformingu węglowodorów para wodna może być zastąpiona dwutlenkiem węgla. Powstaje wówczas syngaz o większej zawartości tlenu węgla. Tego typu proces określany jest jako reforming suchy, a reakcja chemiczna jest następująca:

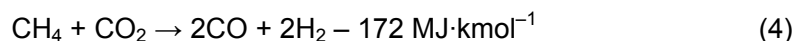




Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

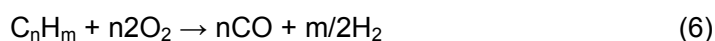
Rys. 2. Konwersja biomasy do wodoru  
Fig. 2. Biomass conversion to the hydrogen

W pewnych procesach przemysłowych bardziej pożądanym jest reforming suchy. Poważnym problemem w procesie reformingu parowego jest odkładanie się węgla na katalizatorze, co prowadzi do zmniejszenia efektywności procesu i zatkania katalizatora. Aby zmniejszyć skutki tego zjawiska, dodaje się parę wodną w znacznym nadmiarze w stosunku do wymagań określonych stechiometrią reakcji. Obecność nadmiaru pary wodnej oraz niklu jako katalizatora procesu powoduje zmniejszenie intensywności występowania reakcji Boudouarda:



Na świecie wytwarza się instalacje do reformingu parą wodną o różnej wydajności wodoru od 100 do 100 000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> [TOMCZYK 2008].

Półspalaniem określa się częściowe utlenianie węglowodorów w warunkach podstechiometrycznej zawartości powietrza. Proces ten opisują następujące równania:



W procesie częściowego utleniania metanu otrzymuje się mniejszą ilość wodoru z jednego mola metanu niż w procesie reformingu parowego. Przewagą reaktorów wykorzystujących proces półspalania jest ich krótszy czas rozruchu, bardziej zwarta budowa, prostota działania oraz niższy koszt wytwarzania.

Konwersja autotermiczna łączy w sobie reforming parowy i półspalanie, w którym nie występuje transfer ciepła z i do reaktora. W procesie tym zachodzą reakcje częściowego utleniania oraz towarzyszące im reakcje następcze reformingu i gazu wodnego. Metoda ta znajduje zastosowanie głównie do zasilania ogniw paliwowych stosowanych w pojazdach, w których paliwem wejściowym jest metanol lub benzyna.

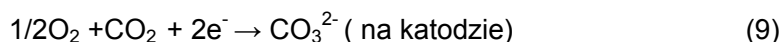
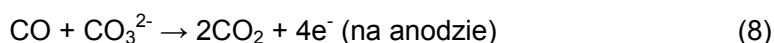
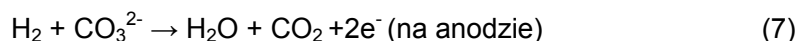
### Podział ogniw paliwowych

Ogniwa paliwowe są urządzeniami, w których następuje zamiana energii elektrochemicznej na energię elektryczną. Zaletami ogniw paliwowych są: wysoka sprawność energetyczna, niski stopień wydzielania się substancji szkodliwych z przetwarzanego paliwa, cichość pracy, niski poziom generowanych drgań. Podstawowym paliwem stosowanym w ogniwach paliwowych jest wodór. Ogniwa paliwowe można podzielić na pięć podstawowych typów ze względu na zastosowany elektrolit, rodzaj reakcji elektrochemicznej, temperaturę pracy oraz rodzaj paliwa:

1. Z protonowymienną membraną polimerową PEMFC (ang. „proton exchange membrane fuel cell”). Elektrolitem jest polimer stały o przewodnictwie protonowym – temperatura pracy wynosi od 90 do 120°C.

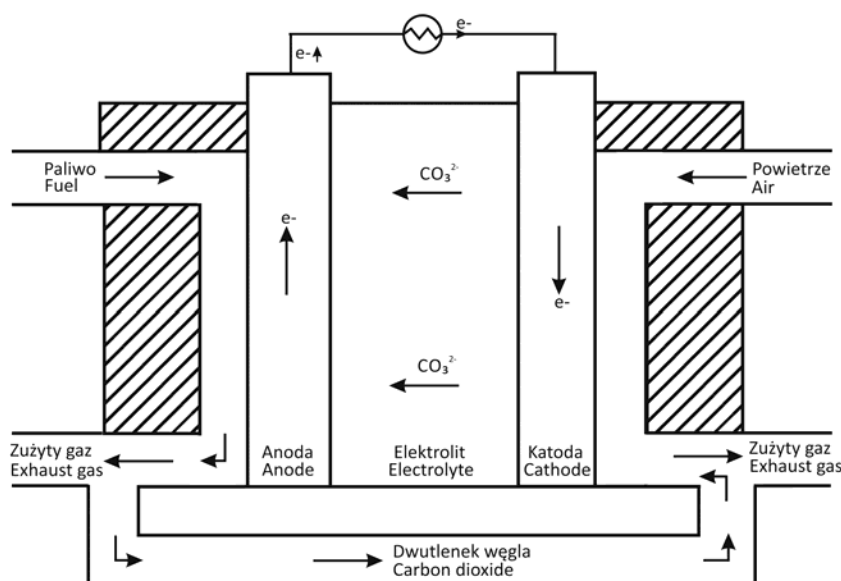
2. Z elektrolitem alkalicznym AFC (ang. „alkaline fuel cell”). Elektrolitem jest wodny roztwór KOH lub NaOH, przewodzący za pośrednictwem jonów OH<sup>-</sup> – temperatura pracy wynosi 65–220°C, w zależności od stężenia elektrolitu.
3. Z kwasem fosforowym PAFC (ang. „phosphoric acid fuel cell”). Elektrolitem jest stężony kwas ortofosforowy, przewodzący za pomocą protonów – temperatura pracy wynosi ok. 200°C.
4. Ze stopionymi węglanami MCFC (ang. „molten carbonate fuel cell”). Elektrolitem jest stopiony eutektyk Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> lub Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, przewodzący za pośrednictwem jonów węglanowych CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> – temperatura pracy wynosi ok. 650°C.
5. Ze stałymi tlenkami SOFC (ang. „solid oxide fuel cell”). Elektrolitem jest tlenek cyrkonu dotowany tlenkiem itru, przewodzący za pośrednictwem jonów tlenkowych O<sup>2-</sup> – temperatura pracy wynosi 800–1000°C.

Do zastosowania w elektrociepłowniach rolniczych najlepiej nadają się, z uwagi na najkorzystniejsze właściwości, ogniwa węglanowe (MCFC) oraz ze stałymi tlenkami (SOFC). Ogniwa te pracują w wysokiej temperaturze. Elektrolitem w ogniwie SOFC jest ciało stałe, dlatego nie muszą one mieć kształtu talerzowego, który jest charakterystyczny dla innych rodzajów ogniw [SURYGAŁA 2008]. Z badań eksploatacyjnych ogniw SOFC wynika, że w celu osiągnięcia stabilnej mocy wymagana jest w odpowiednim zakresie proporcji obecność dwutlenku węgla i powietrza w zastosowanym gazie. Na prawidłową pracę ogniwa wpływa także niski stopień zanieczyszczenia gazu określonymi substancjami, głównie siarczkami i azotkami [STAINFORTH, KENDALL 1998]. Ogniwa MCFC pierwotnie były stosowane w układach ze zgazowanym węglem ze względu na możliwość wykorzystania tlenku węgla, który jest głównym składnikiem zgazyfikowanego węgla. Rozwój konstrukcyjny ogniw MCFC spowodował ich szerokie zastosowanie do wytwarzania energii elektrycznej z zastosowaniem gazu ziemnego jako paliwa [SZARGUT, ZIĘBIK 2007]. Obecnie – ze względu na ogólnosiwiatową restrykcyjną politykę dotyczącą emisji dwutlenku węgla – coraz częściej wykorzystuje się te ogniwa do wytwarzania energii z gazów otrzymanych w wyniku gazyfikacji i fermentacji biomasy [WATANABE i in. 2006]. Ze względu na zastosowanie w ogniwach MCFC jako elektrolitu stopionych soli, jego optymalna temperatura pracy jest ściśle określona i wynosi 652–682°C [BOSIO i in. 2010]. Niższa temperatura może spowodować krzepnięcie soli, natomiast wyższa powoduje intensywne jej odparowanie. Aby temu zapobiec, w ogniwach tych zastosowano precyzyjne układy sterowania temperaturą [TOMCZYK 2006]. Elektrochemiczne reakcje, występujące w ogniwie ze stopionymi węglanami, są następujące:



Ogniwo MCFC, w odróżnieniu od innych ogniw paliwowych, wykorzystuje część anodowych gazów odlotowych do zasilania katody w dwutlenek węgla, tworząc

częściowy obieg zamknięty przepływu tego gazu (rys. 3). Do katody należy doprowadzić, oprócz powietrza, także dwutlenek węgla. Energia elektryczna ogniwa powstaje wskutek przepływu elektronów z katody do anody. Powstawaniu tej energii towarzyszy wydzielanie się katodowego i anodowego gazu odlotowego o dużej entalpii, która może być wykorzystywana do wytwarzania energii elektrycznej za pomocą modułów ORC (ang. „organic rankine cycle”).



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 3. Ogniwo paliwowe ze stopionymi węglanami (MCFC)

Fig. 3. Molten carbonate fuel cell (MCFC)

### Zgazowanie biomasy do paliwa stosowanego w ogniwach paliwowych

Efektywnym sposobem wykorzystania biomasy jest poddanie jej procesowi zgazowania, a otrzymany gaz można zastosować jako paliwo do ogniw paliwowych. Zgazowaniem biomasy określa się cykl przemian z udziałem tlenu, dwutlenku węgla oraz pary wodnej, prowadzący do wytworzenia gazu syntezowego zwanego syngazem, składającego się głównie z tlenku węgla oraz wodoru i metanu. Obejmuje on trzy etapy: suszenie, pirolizę i zgazowanie. Wilgotność biomasy wprowadzanej do zgazowarki może być różna i wynosić od 10 do 90%. Każdy kilogram wilgoci pobiera ok. 2–3 MJ energii na przemianę fazową. Energia ta nie jest w żaden sposób odzyskiwana i dlatego do zgazowania powinna być wprowadzana biomasa o stosunkowo najmniejszej wilgotności. Powstająca para wodna reaguje w kolejnych etapach procesu zgazowania z węglem, tworząc tlenek węgla i wodór. W temperaturze 250–750°C przebiega termiczny kraking (piroliza), w wyniku którego wydzielają się substancje lotne i powstaje stały półprodukt zwany karbonizatem. Substancje lotne są mieszaniną tlenku węgla, wo-

doru, metanu, dwutlenku węgla oraz par węglowodorów ciekłych (smoły i olejów) i wody. Wytworzony karbonizat podlega zgazowaniu w temperaturze powyżej 750°C. Zachodzą wówczas różne reakcje endotermiczne w warunkach niedoboru tlenu oraz z udziałem pary wodnej i dwutlenku węgla, w wyniku których powstają substancje lotne, ulegające reakcjom wtórnym, zależnym od sposobu prowadzenia procesu zgazowania. Proces zgazowania prowadzony jest w reaktorach zwanych gazogeneratorami lub generatorami [PORADA 2008]. Proces zgazowania można scharakteryzować pod względem:

- rodzaju czynnika zgazowującego;
- rodzaju złoża;
- sposobu dostarczenia ciepła (autotermiczny, allotermiczny, ogrzewanie przeponowe, za pomocą stałego, ciekłego lub gazowego nośnika ciepła);
- parametrów procesu (ciśnienie, kierunek przepływu reagentów).

W zależności od stosowanego środka zgazowującego rozróżnia się pięć głównych rodzajów czynników zgazowujących: powietrze, mieszaninę powietrza i pary wodnej, mieszaninę tlenu i pary wodnej, parę wodną (z koniecznością dostarczenia ciepła z zewnątrz) oraz wodór. Dla przykładu można podać, że w wyniku zgazowania biomasy w złożu fluidalnym, gdy czynnikiem zgazowującym jest powietrze, uzyskuje się 5–16% obj. wodoru w produkowanym gazie, natomiast gdy czynnikiem zgazowującym jest para wodna wówczas uzyskuje się 38–56% obj. wodoru [PISKOWSKA-WASIAK 2011].

Rodzaj zastosowanego złoża w generatorze zgazowania biomasy jest podstawowym wyróżnikiem charakteryzującym poszczególne metody. Rozróżnia się zgazowanie w złożu stałym, fluidalnym, zawieszonym oraz zgazowanie w kąpieli ciekłych soli lub metali. Reaktory zgazowania w złożu stałym wymagają paliwa o dużym uziarnieniu – od 5 do 100 mm – i znajdują zastosowanie w układach o małej mocy. Proces zgazowania w złożu stałym może zachodzić w reaktorach przeciwprądowych, w których przepływ biomasy i czynnika zgazowującego odbywa się w kierunku przeciwnym, w reaktorach współprądowych, w których przepływ biomasy i czynnika zgazowującego odbywa się w tym samym kierunku oraz w reaktorach poprzecznych, gdzie ruch biomasy odbywa się w kierunku prostopadłym do przepływu czynnika zgazowującego. Cechą charakterystyczną zgazowania w złożu stałym jest istnienie gradientu temperatury wzdłuż reaktora i występowania następujących stref: suszenia, odgazowania, redukcji, spalania i popiołowej. Zgazowarki przeciwprądowe można stosować do paliwa o stosunkowo dużej zawartości wilgoci, aczkolwiek otrzymany gaz zawiera dużą ilość smoły. Zgazowarki współprądowe i poprzeczne wymagają paliwa o zawartości wilgoci do 30%. Uzyskiwany gaz ma mniejszą wartość opałową niż gaz pochodzący ze zgazowarek przeciwprądowych, ale zawiera mniej smoły.

Zgazowanie w złożu fluidalnym charakteryzuje się stałą temperaturą w strefie reakcyjnej i wymaga paliwa o mniejszym uziarnieniu (do 20 mm), niż stosowanego w zgazowarkach o złożu stałym. Cząstki paliwa w złożu fluidalnym ulegają intensywnemu mieszananiu, dzięki czemu następuje szybka wymiana ciepła między reagentami. Zgazowanie fluidalne można podzielić na dwa rodzaje:



- z fluidalnym złożem pęcherzykowym;
- z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym.

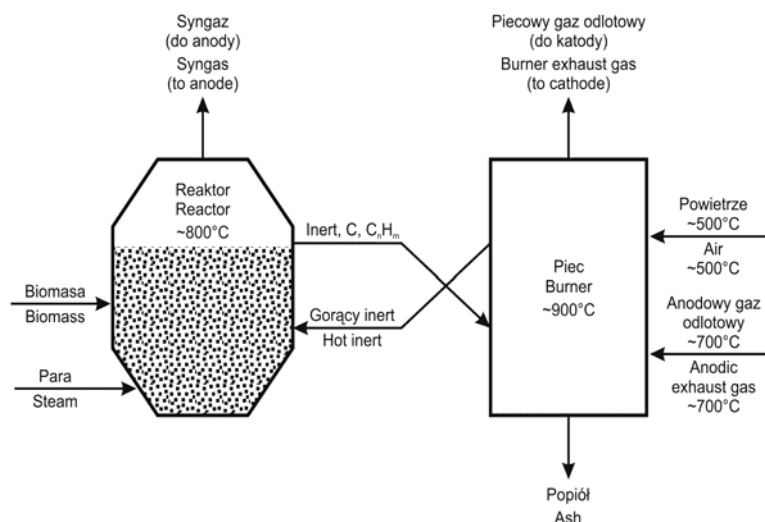
Temperatura zgazowania w złożu fluidalnym wynosi 750–900°C. Zaletami zgazowania fluidalnego jest duża wydajność gazu w odniesieniu do objętości generatora oraz elastyczność na zmiany właściwości paliwa. Wadami są duża zawartość smoły i pyłu w produkowanym gazie oraz niższy stopień zgazowania biomasy.

### **Koncepcja rolniczej elektrociepłowni z cyrkulacyjną zgazówką fluidalną, ogniwem paliwowym MCFC oraz modułami ORC**

Jednym z priorytetów polityki państwa jest rozwój efektywnych, zdywersyfikowanych, układów energetycznych, opartych na odnawialnych źródłach energii [Ministerstwo Gospodarki 2009]. Szczególnie ważnym kierunkiem rozwoju tych źródeł w Polsce jest wykorzystanie biomasy pochodzenia rolniczego i leśnego [MYCZKO 2010], a także pozostałości poprodukcyjnych, w tym frakcji stałej pofermentu powstającego w biogazowniach [CZEKAŁA i in. 2012]. W wyniku termochemicznego zgazowania biomasy powstaje mieszanina gazów ze znacznym udziałem wodoru, którego ilość w produkowanym gazie zależy od rodzaju biomasy, typu reaktora oraz parametrów fizycznych procesu zgazowania. Wodór uznawany jest jako paliwo przyszłości i można oczekiwać na jego powszechne zastosowanie w energetyce i transporcie wraz z rozwojem energetyki termojądrowej oraz produkcji ogniw paliwowych [BUTLEWSKI 2011; CIECHANOWICZ, SZCZUKOWSKI 2010]. W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję elektrociepłowni rolniczej, z wykorzystaniem zgazówki z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym oraz ogniwem paliwowym ze stopionymi węglanami. W celu zwiększenia efektywności energetycznej przedstawionej elektrociepłowni zaproponowano zastosowanie modułów ORC w wybranych miejscach technologicznych przepływu medium energetycznego.

### **Zgazówka z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym**

Zgazówka z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym (rys. 4) zbudowana jest z dwóch modułów – reaktora i pieca. W reaktorze zachodzi proces pirolizy i gazyfikacji biomasy z zastosowaniem pary wodnej. Ciepło pochodzi ze sprzężonego z reaktorem pieca, w którym zachodzi proces utleniania stałych produktów gazyfikacji, głównie węgla i węglowodorów. Do pieca doprowadzony jest odlotowy gaz anodowy, pochodzący z ogniwa paliwowego oraz ogrzane powietrze, a także zewnętrzne paliwo, służące do utrzymywania w piecu temperatury ok. 900°C. Gaz pochodzący z reaktora kierowany jest do układu oczyszczającego i jest określany jako gaz anodowy. Gaz piecowy również jest kierowany do układu oczyszczającego i jest określany jako gaz katodowy. Cyrkulacja inerty, którym jest piasek, między reaktorem i piecem pozwala na wymianę ciepła i utrzymanie odpowiedniej temperatury w obu modułach [PORADA 2008]. Przed wprowadzeniem do reaktora zalecane jest rozkruszenie biomasy w celu uzyskania możliwie największej powierzchni kontaktu pomiędzy fazą stałą i gazową.



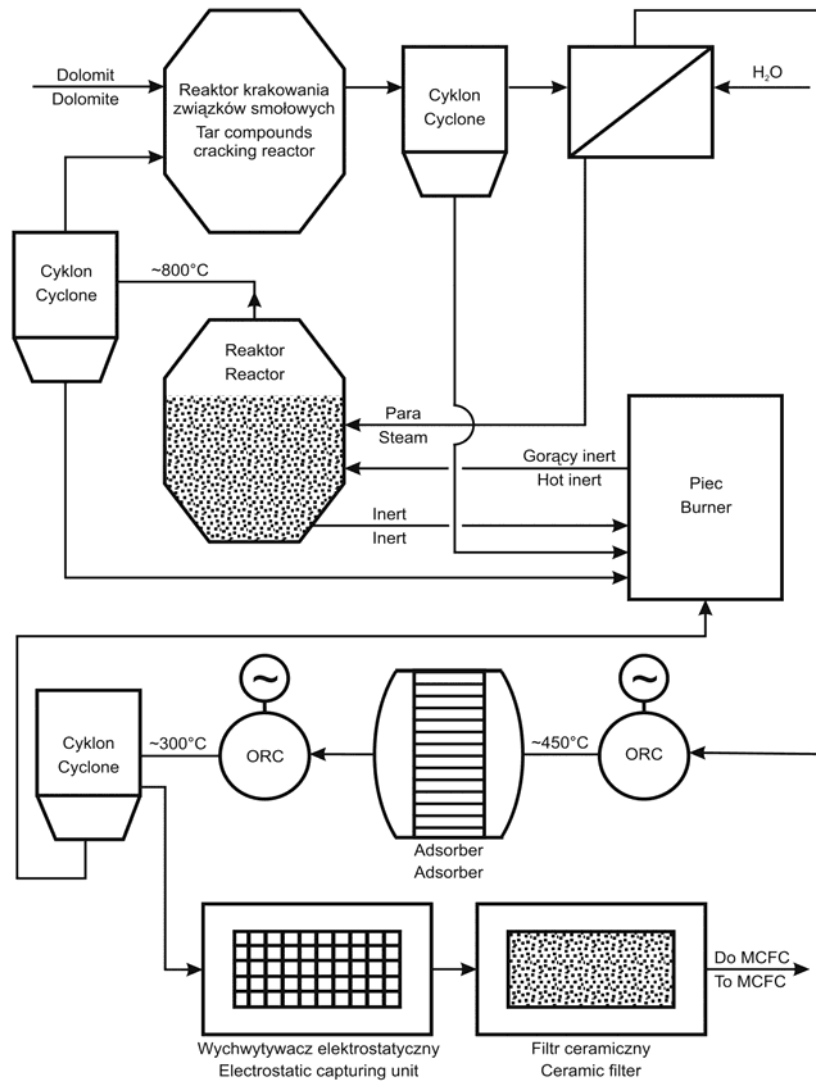
Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 4. Zgazowarka biomasy z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym wykorzystana w układzie energetycznym z ogniwo paliwowym MCFC

Fig. 4. Biomass gasifier with the circulated fluidized-bed used with the MCFC fuel cell in an energetic system

### Układy chłodząco-czyszczące syngazu i gazu piecowego

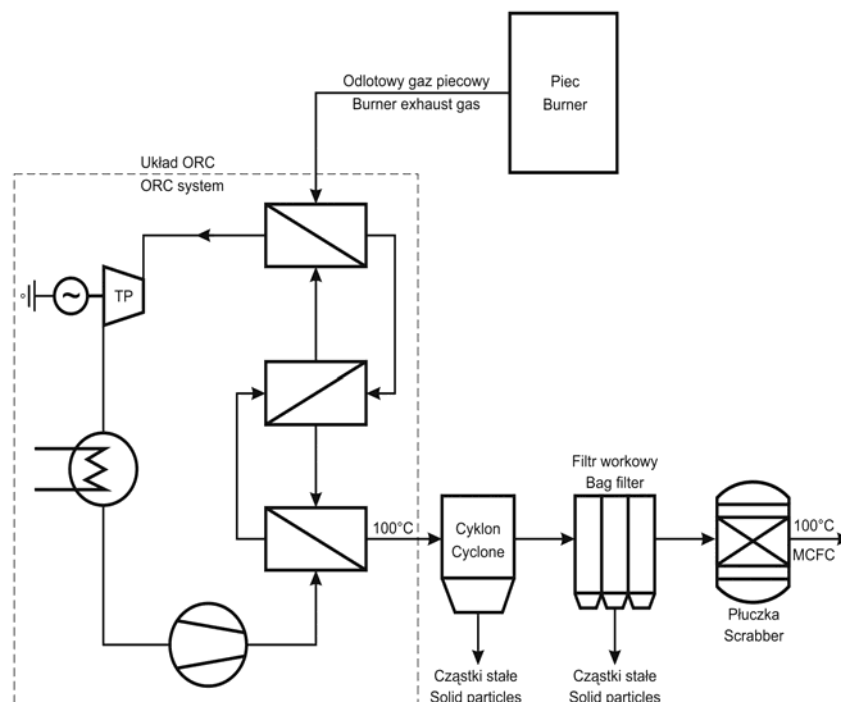
Gaz pochodzący z reaktora (syngaz) zawiera cząstki stałe i substancje płynne. Większe cząstki stałe w postaci pyłu i węgla drzewnego są usuwane w cyklonie, a następnie kierowane do pieca, w którym następuje ich spalanie (rys. 5). Substancje płynne, którymi są związki o dużej masie cząsteczkowej i występują w postaci smoły poddawane są procesowi krakingu w specjalnym reaktorze. Optymalny proces krakingu związków smołowych zachodzi w temperaturze 1200°C. W celu obniżenia tej temperatury dodaje się do reaktora dolomit, który jest katalizatorem procesu krakowania. Uzyskany na tym etapie gaz prawie nie zawiera węgla oraz węglowodorów i składa się głównie z wodoru, metanu, tlenku węgla, dwutlenku węgla, wody oraz zanieczyszczeń. Szczególnie niebezpiecznym zanieczyszczeniem dla środowiska oraz pracy ogniwa paliwowego jest obecność związków siarki. Dlatego po kolejnym przejściu przez cyklon, w którym wychwytywane są cząstki stałe o średnicy większej niż 5 µm, gaz przed dostaniem się do adsorbera musi zostać schłodzony do temperatury ok. 450°C. Ciepło odbierane z gazu w wymiennikach jest wykorzystywane do wytwarzania pary stosowanej w reaktorze zgazowania oraz zamieniane na energię elektryczną w układzie ORC. W adsorberze wychwytywane są związki siarki przez reaktor z tlenkiem cynku oraz związki halogenowe przez reaktor z węglanem sodu. Po opuszczeniu adsorbera gaz jest dalej ochładzany do temperatury 300°C, w celu końcowego oczyszczenia w kolejnych urządzeniach, którymi są: cyklon, elektrostatyczny wychwytywacz i filtr ceramiczny. Ciepło odbierane z gazu jest wykorzy-



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 5. Układ do oczyszczania syngazu przeznaczonego do ogniwa paliwowego MCFC  
 Fig. 5. Syngas cleaning system for the MCFC fuel cell use

stywane w module ORC do zamiany na energię elektryczną. Po procesie oczyszczania gaz jest sprężany do ciśnienia 3,5 bar i ponownie ogrzewany do temperatury 600°C, a następnie kierowany do anody ogniwa paliwowego. Gaz pochodzący z pieca jest chłodzony, aby możliwe było jego oczyszczenie w kolejnych modułach, którymi są: cyklon, filtr workowy i płuczka (rys. 6). Odebrane ciepło z rozgrzanego gazu jest wykorzystywane w układzie ORC do wytworzenia energii elektrycznej. Ciepło to może być alternatywnie zastosowane do ogrzania powietrza procesowego kierowanego do pieca. Gaz, przechodząc przez cyklon, jest



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

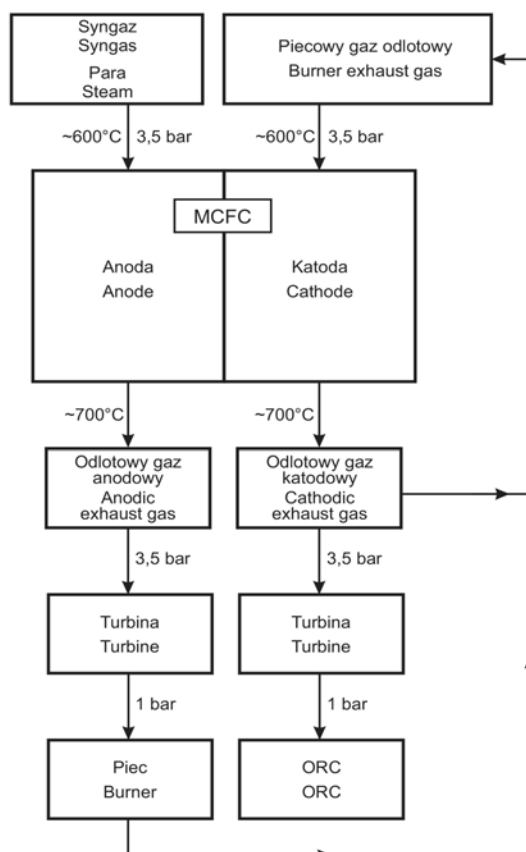
Rys. 6. Układ do oczyszczania gazu piecowego z modułem ORC przeznaczony do ogniwa paliwowego MCFC

Fig. 6. Burning gas cleaning system including ORC system for the MCFC fuel cell use

oczyszczany z cząstek stałych o średnicy powyżej 5  $\mu\text{m}$ , następnie drobny pył popiołowy wychwytywany jest w filtrze rękawowym. Związki siarki usuwane są w płuczce, w której następuje dalsze ochłodzenie gazu do temperatury poniżej 100°C. Po oczyszczeniu gaz piecowy jest sprężany do ciśnienia 3,5 bar oraz ogrzewany w wymienniku ciepła do temperatury 600°C. W wyniku procesów elektrochemicznych zachodzących w ogniwie paliwowym temperatura gazu anodowego oraz katodowego wzrasta do ok. 700°C (rys. 7). Gaz anodowy, po rozprężeniu w turbinie, trafia ponownie do pieca, natomiast energia cieplna gazu anodowego jest wykorzystywana do wytwarzania pary w gazie anodowym oraz do zamiany ciepła na energię elektryczną w module ORC.

### Elektrociepłownia syngazowa z ogniwem paliwowym MCFC i modułami ORC

Koncepcję elektrociepłowni, która w założeniu przeznaczona jest do efektywnej konwersji energii zawartej w biomase, którą może być drewno odpadowe lub stała frakcja pofermentu pochodzącego z biogazowni, do energii elektrycznej i cieplej przedstawiono na rysunku 8. W elektrociepłowni tej założono zastososo-



Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

Rys. 7. Przepływy gazów do i z ogniwa paliwowego MCFC  
 Fig. 7. Gas flows to and from the MCFC fuel cell

wanie zgazowarki z cyrkulacyjnym złożem fluidalnym. Do reaktora dostarczana jest biomasa, która powinna być rozdrobniona do średnicy mniejszej niż 20 mm. Do reaktora doprowadzona jest para wodna z dwóch źródeł. Pierwszym jest para wytworzona w układzie chłodząco-oczyszczającym syngazu, gdzie następuje jego ochłodzenie z temperatury 800°C do 300°C. Drugim jest para wytworzona w wymienniku ciepła, w którym odlotowy gaz katodowy oddaje ciepło przepływającej wodzie. Zastosowanie pary wodnej umożliwia wytworzenie gazu wodnego, który jest mieszaniną wodoru, dwutlenku węgla i tlenku węgla. Wartość opałowa tego gazu wynosi 12,8–13,8 MJ·m<sup>-3</sup> [PORADA 2008]. Temperatura w reaktorze utrzymywana jest dzięki przepływowi gorącego inerty (piasku) między reaktorem a piecem, w którym następuje spalanie cząstek pyłu i węgla drzewnego, pochodzącego z reaktora, oraz dodatkowego zewnętrznego paliwa. Temperatura w piecu wynosi 900°C i jest sterowana czujnikami wpływającymi na intensywność spalania paliwa pochodzącego ze źródła zewnętrznego. Syngaz wytwarzany w reaktorze oraz odlotowy gaz piecowy są silnie zanieczyszczone cząstkami sta-



## Wnioski

Na podstawie przedstawionej koncepcji elektrociepłowni syngazowej z ogniwem paliwowym MCFC i modułami ORC można stwierdzić, że:

1. Należy rozwijać badania, których celem jest wykorzystanie technologii zgazowania biomasy do produkcji energii elektrycznej w rolnictwie, ze względu na łatwą dostępność biomasy w tych obszarach.
2. Zastosowanie ogniw paliwowych, w tym szczególnie ogniw MCFC, daje możliwość efektywnego pod względem energetycznym wykorzystania zgazowanej biomasy.
3. Nadwyżkę powstającego ciepła w tego typu elektrociepłowniach należy zamieniać na energię elektryczną za pomocą modułów ORC.
4. Szczególnie korzystne jest zastosowanie w rolniczych elektrociepłowniach ogniw paliwowych MCFC, ze względu na niską emisyjność dwutlenku węgla, który produkowany na anodzie może brać udział w reakcjach chemicznych na katodzie.
5. W małych i średnich elektrociepłowniach rolniczych o mocy do ok. 1 MW można stosować gazyfikatory o złożu stałym, natomiast powyżej tej mocy korzystne jest stosowanie cyrkulacyjnych gazyfikatorów fluidalnych.

Praca została wykonana w ramach zadania badawczego nr 12.07.1979/2012, realizowanego w Instytucie Technologiczno-Przyrodniczym w Falentach, Oddział w Poznaniu.

## Bibliografia

- BOSIO B., MARRA D., ARATO E. 2010. Thermal management of the molten carbonate fuel cell plane. *Journal of Power Sources*. Vol. 195 s. 4826–4834.
- BUTLEWSKI K. 2011. Perspektywy rozwoju nowych źródeł energii w Polsce i Europie. W: *Popularyzacja prac badawczo-rozwojowych z zakresu odnawialnych źródeł energii. Seminarium naukowe*. 19.09.2011. Poznań. Koszalin. Ekspert-Sitr Sp. z o.o. s. 14–25.
- BUTLEWSKI K. 2012. Perspektywy rozwoju rolniczych elektrociepłowni biogazowych w Polsce i Europie. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 2 s. 137–147.
- CIECHANOWICZ W., SZCZUKOWSKI S. 2010. *Transformacja cywilizacji z ery ognia do ekonomii wodoru i metanolu*. Warszawa. Wydaw. WSISiZ ss. 609.
- CZEKAŁA W., PILARSKI K., DACH J., JANCZAK D., SZYMAŃSKA M. 2012. Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna*. Nr 4 s. 14–16.
- GŁASZCZKA A., WARDAL W.J., ROMANIUK W., DOMASIEWICZ T. 2010. *Biogazownie rolnicze*. Warszawa. MULTICO. ISBN 978-83-7073-432-9 ss. 75.
- GOLIMOWSKA R., GOLIMOWSKI W. 2010. Ocena wartości opałowej fazy glicerynowej oraz jej mieszanin z biomasą. *Problemy Inżynierii Rolniczej*. Nr 3 s. 103–109.

- HARYANTO A., FERNANDO S., PORDESIMO L., ADHIKARI S. 2009. Upgrading of syngas derived from biomass gasification: A thermodynamic analysis. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 33 s. 882–889.
- Ministerstwo Gospodarki 2009. Polityka energetyczna Polski do 2030 roku. Warszawa [online]. [Dostęp 20.05.2013]. Dostępny w Internecie: [www.mg.gov.pl/files/upload/8134/Polityka%20energetyczna%20ost.pdf](http://www.mg.gov.pl/files/upload/8134/Polityka%20energetyczna%20ost.pdf)
- MYCZKO A. 2010. Agro-energetic systems for synergistic effect in production and energy use in agricultural plants. W: *Building – Energy – Environment*. Odra Partnership Workshop, 15.09.2010. Zielona Góra. Uniwersytet Zielonogórski s. 33–39.
- MYCZKO A. (red.) 2011. Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Warszawa–Poznań. Wydaw. ITP. ISBN 978-83-62416-23-3 ss. 140.
- OHKUBO T., HIDESHIMA Y., SHUDO Y. 2010. Estimation of hydrogen output from a full-scale plant for production of hydrogen from biogas. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 35 s. 13021–13027.
- PISKOWSKA-WASIAK J. 2011. Oczyszczanie i przetwarzanie gazu ze zgazowania biomasy w celu wytworzenia SNG (Substitute Natural Gas). *Nafta–Gaz*. Nr 5 s.347–360.
- PORADA S. 2008. Zgazowanie biomasy. W: *Odnawialne i konwencjonalne źródła energii*. Pr. zbior. Red. M. Gołusza, J. Paruch. Kraków. Tarbonus s. 441–465.
- RYCKEBOSCH E., DRUILLON M., VERVAEREN H. 2011. Technique for transformation of biogas to biomethane. *Biomass and Bioenergy*. Vol. 35 ss. 1633–1645.
- SURYGAŁA J. 2008. *Wodór jako paliwo*. Warszawa. WNT. ISBN 978-83-204-3457-6 ss. 177.
- TOMCZYK P. 2006. MCFC versus other fuel cells – Characteristics, technologies and prospects. *Journal of Power Sources*. Vol. 160 s. 858–862.
- TOMCZYK P. 2008. Energetyka wodorowa. W: *Odnawialne i konwencjonalne źródła energii*. Pr. zbior. Red. M. Gołusza, J. Paruch. Kraków. Tarbonus s. 535–614.
- STAINFORTH J., KENDALL K. 1998. Biogas powering a small tubular solid oxide fuel cell. *Journal of Power Sources*. Vol. 71 s. 275–277.
- SZARGUT J., ZIĘBIK A. 2007. *Skojarzone wytwarzanie ciepła i elektryczności – elektrociepłownie*. Katowice. PAN. ISBN 978-83-60716-17-5 ss. 217.
- WATANABE T., YOSHIYUKI I., MAGIKURA Y., MORITA H., YOSHIKAWA M., KAWASE M., YOSHIBA F., ASANO K. 2006. Application of molten carbonate fuel cells to various fuels. *Journal of Power Sources*. Vol. 160 s. 868–871.

*Krystian Butlewski*

## **FUEL CELLS IN AGRICULTURAL HEAT AND POWER GENERATING PLANTS**

### **Summary**

Paper presents the concept of an efficient agricultural syngas heat and power generating plant which converts the energy contained in biomass into electricity and heat energy. The recirculating, fluidized-bed reactor and high temperature, carbonate molten fuel cell (MCFC), were used. This kind of fuel cell enables efficient use, in respect of energy, the biomass available in rural area; it also contributes to reduction of carbon



dioxide emission, produced at the fuel cell anode, and takes part in a chemical reaction at the cathode. In agricultural, combined heat and power plants of the capacity above 1 MW it is preferred to use recirculating fluidized-bed reactor, which needs external energy to be supplied by another renewable energy source. The surplus of heat generated in the cooling systems and in anodic exhaust gas is to be converted into electricity by using organic ranking cycle (ORC) system.

**Key words:** agricultural heat and power plant, biomass gasification, fuel cells, ORC system

Adres do korespondencji:

dr inż. Krystian Butlewski  
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy  
Oddział w Poznaniu  
ul. Biskupińska 67, 60-463 Poznań  
tel. 61 820-33-31; e-mail: k.butlewski@itep.edu.pl

