

Marta JĘDRZEJEWSKA-CICIŃSKA*, Krzysztof KOZAK**

Produkcja bioenergii ze ścieków przemysłu spożywczego

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono możliwości wytwarzania bioenergii ze ścieków przemysłowych. Skoncentrowano się na możliwości produkcji biowodoru, biometanu, bioetanolu oraz bioenergii elektrycznej. Omówiono podstawy biochemicznych szlaków, w oparciu o które wytwarzana jest bioenergia oraz zwrócono uwagę na produktywność energetyczną poszczególnych procesów. Głównym celem publikacji jest wskazanie, że istnieje możliwość wykorzystania ścieków z przemysłu spożywczego jako taniego surowca do produkcji bioenergii, z jednoczesnym oczyszczeniem ścieków.

SŁOWA KLUCZOWE: bioenergia, MFC, metan, wodór, etanol, biogaz, ścieki przemysłu spożywczego

Wprowadzenie

Z punktu widzenia ochrony środowiska, prawidłowe funkcjonowanie nowoczesnych społeczeństw wymaga znacznego ograniczenia postępującej degradacji środowiska, czemu z pewnością sprzyja redukcja zapotrzebowania na paliwa kopalne. Aktualne światowe zapotrzebowanie energetyczne aż w 80% realizowane jest poprzez wykorzystywanie paliw kopalnych. Prowadzi to do szybkiego zużycia ograniczonych zasobów nieodnawialnych paliw kopalnych

* Dr inż., ** Mgr inż. — Katedra Inżynierii Ochrony Środowiska, Wydział Ochrony Środowiska i Rybactwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie.

Recenzent: dr hab. Piotr TOMCZYK, prof AGH

i przede wszystkim przyczynia się do globalnych zmian klimatu z powodu emisji zanieczyszczeń uwalnianych do atmosfery w wyniku ich spalania. Rośnie zatem zainteresowanie wytwarzaniem energii odnawialnej. Biorąc pod uwagę aspekty energetyczne (energochłonność produkcji) oraz ekologiczne (ochrona środowiska), na miano paliw alternatywnych (tzw. biopaliw) zasługują tylko takie komponenty paliwowe, które wyprodukowano z udziałem energii pochodzącej z odnawialnego źródła lub na drodze przemian biochemicznych.

Dyrektywa UE (Directive 2003/30/EEC) jednoznacznie określa surowce, które można stosować jako tzw. biopaliwa. Są to bioetanol (alkohol etylowy produkowany z biomasy), biodiesel (ester metylowy produkowany z oleju roślinnego lub zwierzęcego o jakości oleju napędowego), biogaz (paliwo gazowe produkowane z biomasy), biometanol (metanol produkowany z biomasy), biodimetyloeter (dimetyloeter produkowany z biomasy), bio-ETBE (eter etylowo-t-butylowy produkowany na podstawie bioetanolu), bio-MTBE (eter metylowo-t-butylowy produkowany na bazie biometanolu), biopaliwa syntetyczne (syntetyczne węglowodory lub mieszanki syntetycznych węglowodorów, które zostały wyprodukowane z biomasy), biowodór (wodór produkowany z biomasy), czysty olej roślinny.

Ścieki i odpady z przemysłu spożywczego są idealnym surowcem do produkcji bioenergii, gdyż zawierają wysokie ładunki łatworozkładalnych zanieczyszczeń organicznych. Dodatkowo charakteryzują się wysoką zawartością wody i mikroelementów niezbędnych mikroorganizmom do życia. Produkcja bioenergii powinna zatem towarzyszyć oczyszczaniu ścieków i odwrotnie. Obie te działalności można doskonale połączyć. Wymagana jest więc zmiana obecnego kierunku eksploatacji obiektów oczyszczalni ścieków, aby oprócz kontrolowania poziomu zanieczyszczeń w ściekach istotne stało się stosowanie rozwiązań, które przy jednoczesnym, wysokim stopniu unieszkodliwienia zanieczyszczeń przyczynią się do pozyskania wartościowych produktów w postaci czystych nośników energii. W wyniku beztlenowej biodegradacji zanieczyszczeń (fermentacji) obecnych w ściekach i odpadach przemysłu spożywczego oraz poprzez odpowiednie ukierunkowanie przemian anaerobowych wytworzyć można biowodór, bioetanol oraz biogaz o wysokiej zawartości biometanu. Trwają również prace nad skonstruowaniem wydajnych układów technologicznych do produkcji bioenergii elektrycznej w specjalnych bioogniwach MFC (ang. *microbial fuel cells*).

1. Wytwarzanie ze ścieków biowodoru i biometanu

Z uwagi na czystość spalania (woda jest głównym produktem spalania wodoru) oraz stosunkowo wysoką wydajność energetyczną (122 kJ/g), wodór jest niezwykle obiecującym paliwem alternatywnym, nazywanym niejednokrotnie paliwem przyszłości. Biologiczne metody produkcji wodoru na skalę przemysłową można zakwalifikować do dwóch kategorii. Do pierwszej kategorii zalicza się tzw. fotofermentację, czyli procesy wytwarzania biowodoru przez bakterie purpurowe fotosyntetyzujące w warunkach ograniczonego dostępu tlenu cząsteczkowego z udziałem energii świetlnej. Bakterie fotosyntetyzujące zdolne

są do rozkładu zanieczyszczeń organicznych obecnych w ściekach i odpadach przemysłu spożywczego, na co jednoznacznie wskazują doniesienia literaturowe (Ni i in. 2006; Das, Veziroğlu 2001; Fascetti, Todini 1995). Preferowanym przez bakterie źródłem węgla są kwasy organiczne, głównie niskocząsteczkowe kwasy: octowy, mlekowy, masłowy i propionowy (Kapdan, Kargi 2006). Proces fotofermentacji kontrolowany jest przez bakteryjne enzymy należące do grupy hydrogenaz i nitrogenaz, a mikroorganizmy zdolne są do wykorzystywania szerokiego spektrum światła słonecznego. Przy wykorzystaniu bakterii z rodzaju *Rhodopseudomonas sp.* wydajność produkcji biowodoru ze ścieków mleczarskich wynosi 16 ml/g chlorofilu B, natomiast ze ścieków przetwórstwa owocowego aż 133 ml. Te same bakterie zdolne są do produkcji 15 mmoli H₂ z zanieczyszczeń obciążających ścieki z przetwórci trzciny cukrowej, w przeliczeniu na 1 g sm komórek bakteryjnych w ciągu 1 godziny. Maksymalna wydajność produkcji biowodoru ze ścieków gorzelnianych osiąga poziom 0,46 mmoli H₂/g sm komórek w ciągu godziny (Das, Veziroğlu 2001). Sprawność biokonwersji zanieczyszczeń obciążających ścieki z przemysłu spożywczego do biowodoru przez bakterie *Rhodobacter sphaeroides* oceniana jest na 53% (Ni i in. 2006). Bakterie purpurowe uczestniczące w procesie fotofermentacji wykazują się wysoką zdolnością konsumpcji szeregu zanieczyszczeń organicznych obecnych w ściekach przemysłu spożywczego, dlatego też mogą stanowić ogniwo w zintegrowanych systemach oczyszczalni ścieków, wspomagając nie tylko uzyskiwaną sprawność oczyszczania, ale przede wszystkim wydajność produkcji biowodoru.

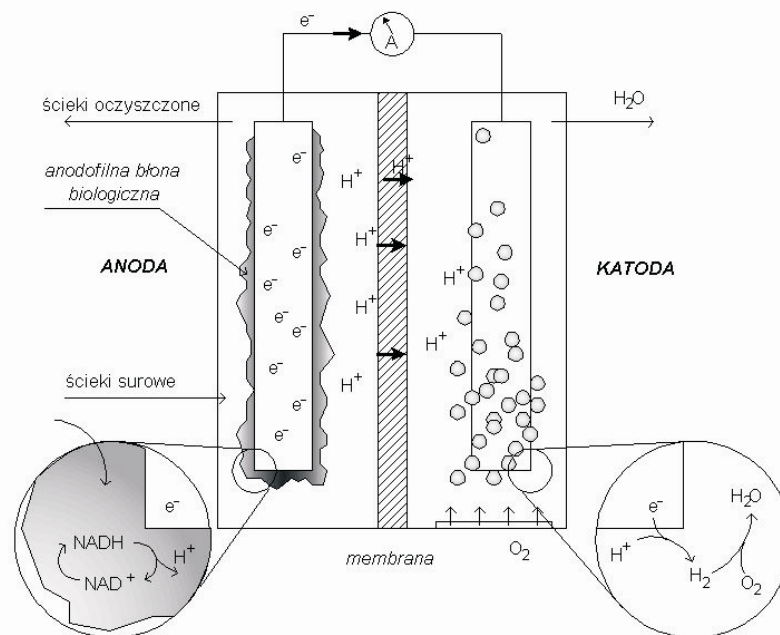
Do drugiej kategorii biologicznych metod produkcji biowodoru należą przemiany fermentacyjne przebiegające z udziałem bakterii heterotroficznych, zdolnych do rozkładu złożonych związków organicznych (głównie węglowodanów). W przemianach uczestniczą głównie bakterie należące do rodzaju *Streptococcaceae*, *Sporolactobacillaceae*, *Lachnospiraceae*, *Thermoanaerobacteriaceae*, *Clostridiaceae* (Kapdan, Kargi 2006; Angenent i in. 2004). Ukierunkowanie procesu fermentacji na produkcję biogazu o wysokiej zawartości wodoru generalnie polega na wyodrębnieniu pierwszej fazy anaerobowej biodegradacji (tzw. fermentacja kwaśna) i zahamowaniu wzrostu bakterii metanowych. Wśród metod inhibicji metanogenezy najczęściej wymienia się wstępną obróbkę termiczną beztlenowego osadu, stosowanie krótkich czasów retencji (8–12 h), utrzymywanie odczynu środowiska ściekowego na niskim poziomie (pH 5,0–6,0) (Kapdan, Kargi 2006; Smoliński, Howaniec 2006 b). Przyjmuje się, że wydajność produkcji biowodoru ze ścieków przemysłu spożywczego przy wykorzystaniu szlaków fermentacyjnych jest wysoka i wynosi 120 mmol H₂/l h (Smoliński, Howaniec 2006 b). Według innych danych efektywność wytwarzania biowodoru przez *Enterobacter cloacae* IIT ze ścieków obciążonych głównie sacharozą wynosi maksymalnie 37,03 mmol H₂/l h (Kumar, Das 1999). Ueno i in. (1996) zanotowali maksymalną wydajność generowania biowodoru ze ścieków bogatych w węglowodany na poziomie 14 mmoli/g węglowodanów. Z przeglądu literatury wynika, że produkcja wodoru z biomasy zawierającej przede wszystkim cukry proste charakteryzuje się dużo wyższą wydajnością w stosunku do innych substratów, jednakże duża część materii organicznej (ponad 60%) pozostaje w środowisku ściekowym jako niewykorzystane produkty fermentacji (głównie są to kwasy organiczne: octowy, propionowy, masłowy oraz etanol) (Oh, Logan 2005; Logan 2004).

W takiej sytuacji wydaje się korzystne konstruowanie kilkustopniowych systemów hybrydowych, w których można zwiększyć uzyskiwaną efektywność biokonwersji zanieczyszczeń organicznych do paliw gazowych. Pozostałe w ściekach niskocząsteczkowe kwasy organiczne można wykorzystywać jako łatwo przyswajalne źródło węgla w procesie produkcji biowodoru na drodze fotofermentacji lub do wytwarzania biogazu o wysokiej zawartości biometanu (Kapdan, Kargi 2006; Oh, Logan 2005; Logan 2004). Połączenie fermentacji z fotofermentacją w procesie generowania biowodoru pozwala również znacznie obniżyć zapotrzebowanie fotosyntetyzujących bakterii purpurowych na fotoenergię. Z kolei metan wytworzony w drugim etapie fermentacji może być wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej lub cieplnej. Znane jest również stosowanie metanu do wytwarzania metanolu – biokomponentu wykorzystywanego do produkcji biodisela (Smoliński, Howaniec 2006 a; Angenent i in. 2004).

2. Wytwarzanie ze ścieków energii elektrycznej

Nowatorskim rozwiązaniem, mogącym mieć wkrótce zastosowanie przemysłowe, jest biologiczna produkcja energii elektrycznej w mikrobiologicznych ogniwach paliwowych (ang. MFC – *Microbial Fuel Cell*) przebiegająca zgodnie z reakcją: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \leftrightarrow 6CO_2 + 62H_2O + \text{energia elektryczna}$ (Angenent i in. 2004). Ogniwa MFC są niezwykle obiecującą alternatywą odzyskiwania energii zgromadzonej w ściekach przemysłu spożywczego (Oh, Logan 2005).

W najprostszym tłumaczeniu ogniwo MFC stanowią dwie elektrody (anoda i katoda) oraz zbiornik mikroorganizmów zasiedlających komorę anodową (reaktor beztlenowy) wypełnioną ściekami (rys. 1). Beztlenowy, biochemiczny rozkład zanieczyszczeń obecnych w ściekach dostarcza elektronów i protonów wodorowych. Dodatkowo, mikroorganizmy odpowiedzialne są za transfer elektronów do anody. Elektrony zewnętrznym obwodem przepływają w kierunku katody. Protony migrują do katody przez przegrodę protono-wymienną, gdzie łączą się z tlenem i elektronami tworząc wodę. W praktyce funkcjonowanie ogniwa MFC jest dużo bardziej skomplikowane, a na przebieg procesów wpływa szereg czynników fizykochemicznych oraz biochemicznych. Przykładowo, w wyniku rozkładu związków organicznych powstają dodatkowe produkty fermentacji, takie jak kwasy organiczne, a wodór i elektrony otrzymywane są w ograniczonej ilości związanej z poziomem metabolizmu mikroorganizmów. Trwają prace nad zwiększeniem wydajności biodegradacji związków organicznych, aby uzyskiwana ilość protonów wodorowych była jak największa, co przekłada się na zwiększenie stopnia produkcji energii elektrycznej oraz oczyszczenia ścieków. Według Angenent i in. (2004) skład mikroflory bakteryjnej w ogniwach MFC jest różnorodny, a poszczególne konsorcja bakteryjne pełnią odmienne funkcje. Bakterie anodofilne, zdolne do transportu elektronów w kierunku elektrod, należą do rodzajów *Geobacteriaceae*, *Desulfuromonaceae*, *Alteromonadaceae*, *Enterobacteriaceae*, *Pasteurellaceae*, *Clostridiaceae*, *Aeromonadaceae*, *Comamonadaceae*.



Rys. 1. Schemat ogniwa MFC

Fig. 1. Scheme of a microbial fuel cell (MFC)

Z przeglądu literatury wynika, że ogniwa MFC w odniesieniu do obecnie stosowanych technologii generowania energii z materii organicznej charakteryzują się wieloma zaletami operacyjno-funkcjonalnymi. Przede wszystkim w ogniwach MFC ma miejsce bezpośrednia konwersja biodegradowalnych zanieczyszczeń do energii elektrycznej, co wpływa na stosunkowo wysoką wydajność procesu. Ładunek zanieczyszczeń w ściekach rzędu 0,1–10 kg ChZT/m³·d dostarcza 0,01–1,25 kW energii na każdy m³ objętości reaktora (Rabaey, Verstraete 2005). Dla porównania, w reaktorze UASB (ang. *Upflow Anaerobic Sludge Blanket reactor*) eksploatowanym przy obciążeniu 10–20 kg ChZT/m³·d, oczyszczającym ścieki z przemysłu spożywczego, wartość energetyczna generowanego metanu oceniana jest na 0,5–1 kW/m³ objętości reaktora. Technologia MFC może być eksploatowana w środowisku o niskiej temperaturze, a powstający biogaz nie wymaga oczyszczania, ponieważ w głównej mierze składa się z dwutlenku węgla uwalnianego bezpośrednio do atmosfery. Podobnie jak w innych technologiach anaerobowych, produkcja nadmiernego osadu w ogniwach MFC kształtuje się na bardzo niskim poziomie rzędu 0,07–0,22 g/g wykorzystanego substratu organicznego (Rabaey, Verstraete 2005). Zaletą ogniw MFC jest prosta i tania eksploatacja, dlatego też przewiduje się ich zastosowanie w biednych krajach afrykańskich, których nie stać na duże i nowoczesne oczyszczalnie ścieków.

Mimo znacznego zaawansowania prac badawczych nad generowaniem energii w ogniwach MFC, konieczne jest opracowanie modyfikacji prowadzących do obniżenia kosztów inwestycyjnych, jak również wprowadzenia technologicznych ulepszeń, aby wielokrotnie zwiększyć wydajność ogniw (obecnie jest to kilka miliwatów).

3. Wytwarzanie ze ścieków bioetanolu

Dyrektywa UE dotycząca biopaliw (Directive 2003/30/EEC) zastrzega, że członkowie krajów UE są zobowiązani zwiększyć zawartość tzw. biopaliw w tradycyjnie stosowanych paliwach z 2% obowiązujących obecnie do 5,75% do końca grudnia 2010 roku. Etanol, na co wskazuje wiele doniesień literaturowych, jest doskonałym bikomponentem dodawanym do paliw płynnych (Lin, Tanaka 2006; Murphy, McCarthy 2005; Nigam 1999; Ghaly, El-Taweel 1997). Rozwój technologii produkcji i zastosowania bioetanolu jako paliwa transportowego nie tylko zredukuje zapotrzebowanie na tradycyjne, nieodnawialne paliwa kopalne, lecz również pozwoli na częściowe rozwiązanie problemu zagospodarowania i oczyszczenia ścieków z przemysłu spożywczego. Emisja dwutlenku węgla ze spalania etanolu jest znacząco niższa od emisji powodowanej spalaniem paliw ropopochodnych. Według szacunków, dodatek bioetanolu w tradycyjnie stosowanych paliwach na poziomie 5% pozwoli zredukować emisję gazów cieplarnianych o 4 megatony, co odpowiada ilości zanieczyszczeń emitowanych przez milion samochodów (www.greenfuels.org). Produkcowany etanol wykorzystywać można również do produkcji wódek, win, napojów alkoholowych, w przemyśle farmaceutycznym, kosmetycznym, przy produkcji środków czyszcząco-myjących (Zafar, Owais 2006; Cheung, Anderson 1997).

Produkcja etanolu w drodze fermentacji jest procesem mikrobiologicznym, w którym złożona materia organiczna przekształcana jest w pierwszej fazie do związków prostych (monomerów), które w dalszej fazie przemian rozkładane są głównie do etanolu i dwutlenku węgla. Według danych literaturowych substratem do przemysłowej produkcji bioetanolu mogą być ścieki o wysokiej zawartości węglowodanów, pochodzące z przemysłu owocowo-warzywnego, mleczarskiego (w tym serwatka i permeaty serwatkowe) oraz cukrowniczego (Kargi, Ozmihci 2006; Lin, Tanaka 2006; Nigam 1999). Mikroorganizmy wykorzystywane do generowania alkoholu etylowego z biomasy ściekowej to najczęściej drożdże z rodzaju *Saccharomyces*, *Candida*, *Torula* (Zafar, Owais 2006; Ghaly, El-Taweel 1997). Bezpośrednia biokonwersję laktozy zawartej w ściekach i odpadach z przemysłu mleczarskiego do alkoholu etylowego można przeprowadzić z udziałem drożdży z rodzaju *Kluyveromyces* (Kargi, Ozmihci 2006; Silveira i in. 2005). Drożdże wykorzystywane do przemysłowej produkcji bioetanolu muszą być tolerancyjne wobec wahań odczynu środowiska ściekowego oraz odporne na wysokie stężenia etanolu w komorze reakcji fermentatorów. Według danych literaturowych koncentracja alkoholu etylowego na poziomie 150 g/l hamuje aktywność drożdży (Miyazawa, Kokugan 1998). Ograniczenia inhibicji biochemicznej mikroorganizmów dokonuje się za pomocą usuwania wytworzonego etanolu ze środowiska ściekowego metodą perwaporacji, fermentacji próżniowej, adsorpcji on-line z adsorbentem hydrofobowym, filtracji membranowej (Miyazawa, Kokugan 1998). Istnieje również wiele szczepów bakterii zdolnych jest do fermentacji alkoholowej węglowodanów. Wysoką wydajność generowania etanolu uzyskano wykorzystując bakterie z rodzaju *Zymomonas* (Lin, Tanaka 2006).

Z doświadczeń Kargi i Ozmihci (2006) wynika, że w wyniku fermentacji alkoholowej sproszkowanej serwatki, w której koncentracja laktozy wynosiła 25–150 g/dm³, można

uzyskać 0,35–0,54 g 10,5% etanolu na 1 g zużytego substratu (laktozy), wykorzystując szczepy drożdży *Kluyveromyces marxianus*. Ghaly i El-Taweel (1997) badali wydajność produkcji etanolu z serwatki stosując różne czasy retencji substratu w reaktorach beztlennych. Najwyższe stężenie alkoholu etylowego na poziomie 58 000 mg/dm³ (wydajność produkcji 0,471 g etanolu/g laktozy) zanotowali, gdy czas zatrzymania ścieków w komorze reakcji fermentorów wynosił 42 h, początkowe stężenie laktozy w serwatce kształtowało się na poziomie 150 g/dm³, odczyn wynosił pH 4,1–4,7, natomiast temperatura około 30°C. Podobne doświadczenie zrealizowali Longhi i in. (2004), wykorzystując serwatkę jako medium do produkcji alkoholu etylowego przez szczepy *K. marxianus*. Według Silveira i in. (2005) z permeatu po ultrafiltracji serwatki słodkiej, wykorzystując drożdże *K. marxianus*, można uzyskać stężenie etanolu na poziomie około 25 000 mg/dm³, przy początkowym stężeniu laktozy w permeacie na poziomie 50 000 mg/dm³, w temperaturze 30°C. Autorzy podkreślają, że wykorzystywanie permeatu jako substratu do produkcji alkoholu etylowego jest z ekonomicznego punktu widzenia bardziej opłacalne niż wykorzystywanie serwatki, z uwagi na mniejszą zawartość wody, którą trzeba usunąć w procesie destylacji alkoholu. Najwyższa wydajność produkcji etanolu ze ścieków przetwórstwa owocowego obciążonych głównie węglowodanami (sacharozą, glukozą, fruktozą) wynosiła 0,47 g/g wykorzystanego substratu, natomiast maksimum koncentracji produkowanego etanolu wynosiło 35,5 g/dm³ (Nigam 1999).

Teoretyczna wartość energetyczna 1 litra etanolu wynosi 21,1 MJ. Z tej samej objętości benzyny można uzyskać 32,2 MJ energii. Z uwagi na wyższą efektywność spalania etanolu oraz wyższą wartość oktanową przyjmuje się, że energetyczna wartość etanolu jako paliwa kształtuje się na poziomie 28 MJ/l (Murphy, McCarthy 2005). Zatem 1 litr etanolu może zastąpić 0,87 litra benzyny. W Brazylii roczna produkcja etanolu w drodze fermentacji biomasy przekracza 15 mln m³. W Stanach Zjednoczonych kształtuje się na poziomie 10 mln m³, a do 2010 roku planuje się zwiększyć ją do 19 mln m³. Kraje Europy wytwarzają znacznie mniej bioetanolu, około 2 mln m³ rocznie (Lin, Tanaka 2006). W Nowej Zelandii aż 1/5 uzyskiwanej w procesach przetwórstwa mleka serwatki przekształcana jest do etanolu (Silveira i in. 2005).

Główną przeszkodą dla przemysłowej produkcji alkoholu etylowego jest wysoki koszt destylacji pochłaniający zwykle 35–45% całkowitych kosztów eksploatacyjnych oraz stosunkowo duża objętość bioreaktorów fermentacyjnych. Szczególnie wysokie koszty destylacji alkoholu ponosi się przy niskiej koncentracji etanolu, co związane jest z kolei z niskim stężeniem związków organicznych (ChZT) w fermentowanych ściekach.

Podsumowanie

Podstawowym celem badań nad możliwością wykorzystania różnorodnych odpadów biodegradowalnych z przemysłu spożywczego do produkcji wysokoenergetycznych paliw gazowych jest opracowanie taniej i skutecznej technologii o wartości komercyjnej poprzez łączenie anaerobowych szlaków biochemicznych.

Ścieki z przemysłu spożywczego są niewątpliwie ogromnym rezerwuarem energii, szczególnie te obciążone wysokim ładunkiem węglowodanów. Według danych literaturowych 1 kg węglowodanów to aż 4,41 kWh energii (1,06 kg ChZT). Z takiej ilości węglowodanów można wyprodukować 0,5 l etanolu, 1,2 m³ gazowego wodoru, 0,36 m³ gazowego metanu lub 0,5 m³ biogazu, a przeciętna wydajność produkcji energii z analizowanych biokomponentów wynosi blisko 1 kWh (Rabaey, Verstraete 2005).

Literatura

- ANGENENT L.T., KARIM K., AL-DAHMAN M.H., WRENN B.A., 2004 — Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trend in Biotechnol.*, 22/9, s. 477–485.
- CHEUNG S.W., ANDERSON B.C., 1997 — Laboratory investigation of ethanol production from municipal primary wastewater solids. *Bioresource Technology*, 59, s. 81–96.
- DAS D., VEZIROĞLU T.N., 2001 – Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *Int. J. of Hydrogen Energy*, 26, s. 13–28.
- Directive 2003/30/EEC of the European Parliament and of the Council of 8 May 2003 on the promotion of the use of biofuels or other renewable fuels for transport.
- FASCETTI E., TODINI O., 1995 — *Rhodobacter sphaeroides* RV cultivation and hydrogen production in one and two-stage chemostat. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 44, s. 300–305.
- GHALY A.E., EL-TAWHEEL A.A., 1997 — Kinetic modelling of continuous production of ethanol from cheese whey. *Biomass Bioengineering*, 12/6, s. 461–472.
- KAPDAN I.K., KARGI F., 2006 — Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Tech.*, 38, s. 569–582.
- KARGI F., OZMIHCI S., 2006 — Utilization of cheese whey powder (CFWP) for ethanol fermentations: Effects of operating parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 38, s. 711–718.
- KUMAR N., DAS D., 1999 — Enhancement of hydrogen production by *Enterobacter cloacae* IIT-BT 08. *Proc. Biochem.*, 35, s. 589–594.
- LIN Y., TANAKA S., 2006 — Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 69, s. 627–642.
- Logan B.E., 2004 – Feature article: biologically extracting energy from wastewater: biohydrogen production and microbial fuel cells. *Env. Sci. Tech.*, 38/9, s. 160A–167A
- LOGAN B.E., OH S.E., KIM I.S., VAN GINKEL S., 2002 — Biological hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers. *Env. Sci. Tech.*, 36/11, s. 2530–2535.
- LONGHI L.G.S., LUVIZETTO D.J., FERREIRA L.S., RECH R., AYUB M.A.Z., SECCHI A.R., 2004 — A growth kinetic model of *Kluyveromyces marxianus* cultures on cheese whey as a substrate. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 31/1, s. 35–40.
- MIYAZAWA K.I., KOKUGAN T., 1998 — Effect of product removal by a pervaporation on ethanol fermentation. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 86/5, s. 488–493.
- MURPHY J.D., MCCARTHY K., 2005 — Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy*, 82, s. 148–166.
- NI M., LEUNG D.Y.C., LEUNG M.K.H., SUMATHY K., 2006 — An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Proc. Tech.*, 87, s. 461–472.
- NIGAM J.N., 1999 — Continuous ethanol production from pineapple cennery waste. *Journal of Biotechnology*, 72, s. 197–202.

- OH S.E., LOGAN B.E., 2005 — Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. *Wat. Res.*, 39, s. 4673–4682.
- RABEY K., VERSTRAETE W., 2005 — Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. *Trends in Biotech.* 23/6, s. 291–298.
- Silveira W.B., Passos F.J.V., Mantovani H.C., Passos F.M.L., 2005 – Ethanol production from cheese whey permeate by *Kluyveromyces marxianus* UFV-3: A flux analysis of oxido-reductive metabolism as a function of lactose concentration and oxygen levels. *Enzyme and Microbial Technology*, 36, s. 930–936.
- SMOLIŃSKI A., HOWANIEC N., 2006a — Wodór – czysty nośnik energii (cz. I). *Czysta Energia*, 7–8/57–58, s. 26–28.
- SMOLIŃSKI A., HOWANIEC N., 2006b — Wodór – czysty nośnik energii (cz. II). *Czysta Energia* 9/59, s. 28–30.
- UENO Y., OTSUKA M., MORIMOTO M., 1996 — Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microflora in chemostat culture. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, 82/2, s. 194–197.
- www.greenfuels.org
- ZAFAR S., OWAIS M., 2006 — Ethanol production from crude whey by *Kluyveromyces marxianus*. *Biochemical Engineering Journal*, 27, s. 295–298.

Marta JĘDRZEJEWSKA-CICIŃSKA, Krzysztof KOZAK

Bioenergy production from food processing wastewater

Abstract

Paper presents the technical possibilities to produce bioenergy from agricultural wastewater. It concentrates on biohydrogen, bioethanol, biomethane and biological electricity production. It discussed the bases of biochemical processes generated bioenergy and takes into consideration the efficiencies of each biological step. The main aim of this paper is to point that food processing wastewater are the cheap material to produce bioenergy with simultanic wastewaters treatment.

KEY WORDS: bioenergy, MFC, methane, ethanol, biogas, agricultural wastewater