

**MONIKA SUCHOWSKA-KISIELEWICZ\***

**PRODUKCJI BIOWODORU Z ODPADÓW  
W WARUNKACH FERMENTACJI**

*Streszczenie*

*Aktualnie zauważalny jest dynamiczny wzrost wykorzystywania wodoru na świecie wynoszący około 12% rocznie. Przewiduje się, że do 2025 roku wzrośnie on o około 8-10%. Wykorzystywane obecnie metody produkcji wodoru są bardzo energochłonne. W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy w zakresie efektywności, wyzwań i perspektyw produkcji wodoru z odpadów w warunkach ciemnej fermentacji.*

Słowa kluczowe: biowodór, wstępne przetwarzanie odpadów, fermentacja

**WPROWADZENIE**

Kryzys energetyczny, postępująca degradacja środowiska oraz wyczerpywanie naturalnych źródeł energii przyczyniły się do wyznaczenia nowych kierunków działań w sektorze energetycznym. Odzwierciedleniem tego są stawiane przez Unie Europejską wymagania dotyczące poprawy warunków energetycznych w krajach członkowskich [Polityka energetyczna Polski do 2030, 2009]. Głównym celem działań wytyczonych przez UE jest zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub> i wykorzystywania paliw kopalnianych oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego krajów. W ramach tych założeń Unia Europejska zobowiązała kraje członkowskie do:

- zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do roku 1990,
- zmniejszenia zużycia energii o 20% w porównaniu z prognozami dla UE na 2020 r.,
- zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii do 20% całkowitego zużycia energii w UE, w tym zwiększenie wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) w transporcie do 10%.

W Polsce i Europie biomasa stanowi jedno z najważniejszych źródeł OZE. Według definicji Unii Europejskiej, biomasa oznacza podatne na rozkład biolo-

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska

giczny frakcje produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolnego (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich [Dyrektywa 2001/77/WE, Gua i in. 2010].

Wykorzystywanie odpadów jako źródła energii odnawialnej umożliwia zarówno wypełnienie zobowiązań Polski dotyczących poprawy warunków energetycznych kraju oraz zmniejszenia ilości odpadów biodegradowalnych odprowadzanych na składowisko [Dyrektywa 1999/31/WE, Ustawa o odpadach 21 kwietnia 2001 z póź.zm.]. Pozyskiwanie energii z odpadów zmniejsza wykorzystanie energetyczne biomasy pochodzącej z sektora rolniczego i leśnego, która wzbudza kontrowersje związane z obawami zachwiania różnorodności biologicznej oraz negatywnego wpływu na sektor żywnościowy.

Szczególnie atrakcyjnym źródłem energii pochodzącej z odpadów jest wodór. Wodór może być wykorzystywany zarówno jako paliwo do silników spalinowych oraz po oczyszczeniu do produkcji energii w ogniwach paliwowych. Zainteresowanie wodorem wynika z wysokiej energii jego spalania na jednostkę masy oraz z braku ubocznych produktów jego użytkowania (produktem spalania wodoru jest woda) [Suchowska-Kisielewicz i in. 2010]. Wartość opałowa wodoru wynosi 120 MJ/kg, podczas gdy dla metanu, bioetanolu i estru masłowego kwasów tłuszczowych 55,5; 26,7 i 37,7 MJ/kg, odpowiednio.

## PRODUKCJA BIOWODORU

Aktualnie zauważalny jest dynamiczny wzrost wykorzystywania wodoru na świecie wynoszący około 12% rocznie. Przewiduje się, że do 2025 roku udział wodoru w całkowitej produkcji energii będzie wynosił około 8-10% [Pandu i Joseph 2012].

Wykorzystywane obecnie metody produkcji wodoru oparte o elektrolizę wody i termokatalizę związków bogatych w wodór są bardzo energochłonne [Mathews i Wang 2009]. Konwencjonalna produkcja wodoru gazowego wymaga stosowania wysokich temperatur przekraczających nawet 840°C. Produkcja wodoru w wyniku elektrolizy wody wymaga dużego udziału prądu stanowiącego około 80% całkowitych kosztów produkcji. Opłacalność elektrolizy wody uzależniona jest więc od cen prądu występujących w danej lokalizacji inwestycji [Pandu i Joseph 2012].

Produkcja wodoru na drodze biologicznej jest procesem znacznie mniej energo- i kosztochłonym [Suchowska-Kisielewicz i in. 2010].

Spośród wielu metod produkcji biowodoru na drodze biologicznej (biofotoliza wody przy wykorzystaniu alg i cyjanobakterii, fotofermentacja substratów organicznych przez fotosyntezujące bakterie, ciemna fermentacja materii organicznej) najbardziej praktyczną metodą jest ciemna fermentacja. Wnika to mię-

dzy innymi z faktu, że nie wymaga ona zewnętrznego źródła energii oraz światła [Yasin i in., 2013, Elbeshbishy i in., 2011b, Hallenback i Ghosh 2009].

Do produkcji biowodoru w warunkach fermentacji mogą być wykorzystywane zarówno ścieki komunalne, przemysłowe oraz odpady. Odpady organiczne uważane są za jedne z lepszych substratów do produkcji biowodoru z powodu ich niskich cen oraz względnie prostych zabiegów eksploatacyjnych wymaganych w trakcie prowadzenia procesu ich fermentacji.

Podczas przebiegu procesu fermentacji jednocześnie przebiegają biochemiczne procesy wytwarzania i zużywania wodoru.

Beztlenowy proces konwersji substratu organicznego do wodoru odbywa się zgodnie z reakcjami przedstawionymi poniżej. Wyróżniamy dwa szlaki metaboliczne produkcji wodoru [Singhal i Singh 2014]:

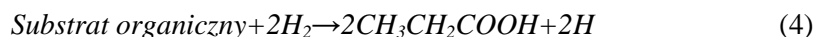
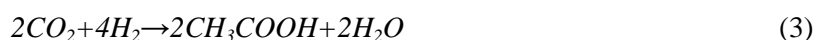
#### Szlak octanowy



#### Szlak masłowy



Konsumpcja wodoru przy współdziałaniu różnych grup mikroorganizmów przebiega zgodnie z równaniami (3) i (4):



Mikroorganizmy beztlenowe produkujące wodór z substratów organicznych, głównie węglowodanów, należą do rodziny *Streptococcaceae*, *Sporolactobacillaceae*, *Lachnospiraceae*, *Thermoanaerobacteriaceae*, *Clostridiaceae*.

Wielkość produkcji biowodoru zależy od wielu czynników. Duży wpływ mają parametry technologiczne, do których zaliczmy: rodzaj substratu, rodzaj mikroorganizmów biorących udział w procesie, wartość pH, stężenie LKT, temperatura, parcjalne ciśnienie wodoru, hydrauliczny czas zatrzymania, obciążenie komory ładunkiem organicznym, podatność substratu na rozkład biologiczny, iloraz C/N [Jędrzejewska-Cicińska i in. 2007].

Optymalny iloraz C/N powinien mieścić się w przedziale 20-21 [Kim i in. 2010].

Uzyskanie odpowiedniego poziomu udziału węgla organicznego do azotu jest istotne z punktu widzenia stymulacji aktywności metabolicznej bakterii produkujących biowodór [Nazlina i in., 2013, Kim i in. 2010]. W praktyce w celu

utrzymania pożądanego wartości ilorazu proces fermentacji prowadzi się z innymi ko-substratami. Często wykorzystywanym kosubstratem są osady ściekowe.

Ważnym czynnikiem limitującym wielkość produkcji biowodoru jest szybkość hydrolizy substratów. Uzależniona jest ona od podatności substratu na rozkład biologiczny oraz zawartości wilgoci w substracie. Zgodnie z badaniami Lay i in. (2003) szybkość hydrolizy węglowodanów jest około 20 razy większa niż tłuszczu czy białka.

#### EFEKTYWNOŚĆ PRODUKCJI BIOWODORU W WARUNKACH FERMENTACJI CIEMNEJ

W tabeli 1 przedstawiono wydajność produkcji biowodoru wyrażoną w molH<sub>2</sub>/mol C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> prowadzoną w warunkach beztlenowych (w reaktorach nie przepływowych i przepływowych) w różnych warunkach substratowych i mikrobiologicznych procesu (przy udziale pojedynczych czystych szczepów bakterii lub mieszanych konsorcjów).

Tab. 1. Porównanie efektywności produkcji biowodoru dla różnych warunków prowadzenia procesu [Pandu and Joseph, 2012]

Tab.1 Comparison of biohydrogen production efficiency for different process conditions [Pandu and Joseph, 2012]

Rodzaj Procesu Type of process	Kultura Culture	Substrat Substrate	Wydajność Yield molH <sub>2</sub> /mol C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
NP	Beztlenowy osad przefermentowany Anaerobic digester sludge	Glukoza Glucose	2,18
P	Kultura mieszana Mixed culture	Glukoza Glucose	2,10
NP	<i>Bacillus coagulans</i>	Glukoza Glucose	2,28
NP	<i>Clostridia sp</i>	Glukoza Glucose	1,70
NP	Kultura mieszana Mixed culture	Glukoza Glucose	2,10
P	Osad czynny i przefermentowany Activated sludge and digested sludge	Glukoza Glucose	1,16

\* NP-reaktor nie przepływowy, Batch reactor, P – reaktor przepływowy, Continuous reactor

Analizując dane przedstawione w tabeli 1 można stwierdzić, że jednostkowa produkcja biowodoru prowadzona w różnych warunkach mikrobiologicznych

waha się w wąskim zakresie 1,16-2,18 molH<sub>2</sub>/mol C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>. W praktyce zaleca się produkcję biowodoru przy wykorzystaniu mieszanych kultur bakterii. Związane jest to przede wszystkim z mniejszymi wymaganiami operacyjnymi prowadzenia procesu, mniejszym zakresem kontroli procesu oraz szerszym spektrum rozkładanych substratów [Elbeshbishy i in. 2011a].

Produkcja biowodoru w reaktorach z mieszanymi kulturami bakterii wymaga jednak eliminacji z inokulum kultur bakterii konsumujących wodór (mikroorganizmy metanogenne i homoacetogenne) [Li i Fang 2007].

Jest to możliwe dzięki zastosowaniu metod wstępnego przetwarzania inokulum, co prowadzi do zmniejszenia aktywności tych bakterii przy jednoczesnym zachowaniu funkcji bakterii produkujących wodór tj. *Clostridium* i *Enterobacter*. Jak wykazali Kim i in. [2009], można uniknąć negatywnego wpływu bakterii konsumujących wodór nie stosując inokulum. W badaniach autorzy uzyskali wysoką produkcję biowodoru z odpadów organicznych po wstępnej termicznej dezintegracji. Również Elbeshbishy i in. [2011a, 2011b] wykazali wysoką efektywność produkcji biowodoru bez zastosowania inokulum.

Do powszechnie stosowanych metod wstępnego przetwarzania zaliczamy: wstępne przetwarzanie mechaniczne, procesy dezintegracji: ultradźwiękowej, chemicznej, termicznej i termo-chemicznej [Elbeshbishy i in. 2011b] oraz przetwarzanie enzymatyczne i tlenowe [Mshandete i in. 2008, Charles i in. 2009].

W literaturze jest wiele informacji na temat wpływu różnych metod wstępnego przetwarzania substratów na intensyfikację produkcji biogazu [Nah i in. 2000, Lin i in. 1997, Bougrier i in. 2008]. Badań na temat wpływu tych metod na efektywność produkcji biowodoru w różnych układach technologicznych jest niewiele.

Efektywność różnych metod wstępnego przetwarzania substratów i inokulum na produkcję biowodoru zależy między innymi od rodzaju przetwarzanego substratu, zastosowanych kultur bakterii oraz konfiguracji technologicznej procesu.

### WSTĘPNE PRZETWARZANIE SUBSTRATU

Spośród wielu przebadanych metod wstępnego przetwarzania dezintegracja chemiczna jest metodą najczęściej wskazywaną jako technologia najbardziej efektywna. Sprawność jej wzrasta przy połączeniu z innymi metodami dezintegracji. Elbeshbishy i in. [2011b] wykazali, że efektywność produkcji biowodoru po zastosowaniu wstępnego przetworzenia za pomocą kwaśnej dezintegracji i ultrasonifikacji wzrosła o 62% w stosunku do odpadu nieprzetworzonego i była wyższa o 38% i 52% niż po oddzielnie prowadzonych procesach: ultrasonifikacji i dezintegracji kwaśnej, odpowiednio.

W tabeli 2 zestawiono efektywność produkcji biowodoru przy wykorzystaniu

różnych technik wstępnego przetwarzania substratów [Pandu i Joseph 2012].

Tab. 2. Porównanie wielkości produkcji biowodoru w różnych warunków wstępnego przetwarzania substratu [Pandu i Joseph, 2012]

Tab.2 Comparison of biohydrogen yield by different pretreatment methods [Pandu and Joseph, 2012]

Inokulum Inoculum	Substrat Substrate	Metoda Method	$Q_{jH_2}$	Optymalna metoda Optimal method
osad beztlenowy, anaerobi sludge	morskie kultury, bakterii sea water culture	K, Z, T	1,2 <sup>1)</sup>	T
przetworzone odpady mleczarskie, dairy manure wastes	przetworzone odpady mleczarskie, dairy ma- nure wastes	K, Z, PCZ	32 <sup>2)</sup>	K
osad przefermentowany, digested sludge	glukoza, glucose	K, T, O	1,8 <sup>3)</sup>	T
obornik, cattle manure sludge	glukoza, glucose	K, T, ZiR	1,0 <sup>3)</sup>	K
<i>Clostridium biferm- tans</i>	osady ściekowe, wastewater sludge	ZiR, So, K, SiI	2,1 <sup>4)</sup>	ZiR
<i>Clostridium biferm- tans</i>	osady ściekowe, waste- water sludge	ZiR, So, KiS	4,1 <sup>5)</sup>	ZiR
<i>Pseudomonas sp.</i>	Odpady, waste	S, So, M	15 <sup>6)</sup>	S
mieszane kultury beztlenowe, anaerobic mixed microflora	glukoza, glucose	T, Z, K	1,4 <sup>7)</sup>	T

$Q_{jH_2}$ -jednostkowa produkcja wodoru, <sup>1)</sup> molH<sub>2</sub>/ mol sucrose, <sup>2)</sup> mlH<sub>2</sub> g/ TVS, <sup>3)</sup> molH<sub>2</sub>/mol C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub>, <sup>4)</sup> mmol H<sub>2</sub>/gCOD, <sup>5)</sup> g/kgsm, <sup>6)</sup> ml/gTCOD, <sup>7)</sup> L

K – kwaśna, acide, Z – zasadowa, alkali, T-termiczna, heat-shock, PCZ- promieniowanie podczerwieni, infrared radiation, O-tlenowe, aeration, ZiR – zamrażanie i rozmrażanie, freezing and thawing, SiR – sterylizacja i inhibicja metanogenezy, sterilization and methanogenic inhibitor, So – sonifikacja, sonification, KiS – zakwaszanie i sterylizacja, acidification and sterilization. M – mikrofale, microwave

Analizując dane przedstawione w tabeli 2 można stwierdzić, że zróżnicowany udział węglowodanów, tłuszczu, białka, celulozy i hemicelulozy zawartych w substratach skutkuje dużym zróżnicowaniem efektywności poszczególnych metod dezintegracji. Duży wpływ ma również rodzaj zastosowanego inokulum (tab. 2).

Potwierdzają to badania Fang i in. [2006], którzy uzyskali wysoką produkcję jednostkową biowodoru z ryżu (na poziomie 2,79 mmol H<sub>2</sub>/l) podczas gdy Lee

i in. (2008) osiągnęli produkcję wodoru na poziomie 18,4 mmol H<sub>2</sub>/ld z substratu teoretycznie trudnoodatnego na rozkład biologiczny tj. z odpadów kuchenny bogatych w tłuszcze, białka i celulozę (Nazilia i in., 2013).

W celu optymalizacji procesu dezintegracji substratów odpadowych należy prowadzić badania w kierunku rozpoznania biochemicznych podstaw procesu i określenia ekonomicznie uzasadnionych rozwiązań.

### OPTIMALIZACJA PROCESU

Istotnym aspektem związanym ze zwiększeniem opłacalności produkcji biowodoru jest ustalenie odpowiednich rozwiązań technicznych i technologicznych fermentacji pozwalających na osiągnięcie pożądanej efektywności [Pandu and Joseph 2012, Hallenback and Gosh 2009]. Należy jednak pamiętać, że zastosowanie nawet najbardziej optymalnych rozwiązań nie zmieni ograniczeń metabolicznych mikroorganizmów warunkujących molową wydajność produkcji wodoru, która w przypadku *Enterobacteraceae* wynosi 2 mol H<sub>2</sub>/mol glukozy, a mikroorganizmów *Clostridia* – 4 mole H<sub>2</sub>/mol glukozy. Produkcja biowodoru w warunkach technicznych wymaga molowej wydajności wodoru zbliżonej do stechiometrycznej wynosi około 12 moli H<sub>2</sub>/mol glukozy.

Tak wysoką wydajność można uzyskać stosując dwustopniowy proces produkcji biowodoru. W pierwszym stopniu biowodór produkowany jest w warunkach beztlenowych, a w drugim na drodze zgazowania pozostałych nierozłożonych organicznych produktów pośrednich [Hallenback and Gosh 2009].

Inną metodą, która istotnie zwiększa opłacalność procesu produkcji biowodoru jest dwustopniowy proces wodorowo-metanowy.

Do zalet dwustopniowej wodorowo-metanowej fermentacji zaliczamy wysoki poziom rozpuszczania substratów organicznych zawartych w odpadach oraz wysoką tolerancję na duże obciążenia ładunkiem organicznym reaktorów. Zgodnie z badaniami Uneo i in. [2007], produkcja biowodoru i metanu z odpadów kuchennych uzyskana z bioreaktora wodorowo-metanowego wyniosła 5,4 i 6,1 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>/d, odpowiednio, przy jednoczesnej całkowitej redukcji ChZT na poziomie 80%.

## Wyzwania i perspektywy w produkcji biowodoru

Komercyjne stosowanie produkcji biowodoru wymaga udoskonalenia w kierunku zwiększenia wydajności oraz szybkości produkcji [Hallenback i Ghosh 2009]. Niska produkcja biowodoru na poziomie 1-2 molH<sub>2</sub>/molC<sub>6</sub>H<sub>12</sub>O<sub>6</sub> związana jest przede wszystkim z wolną konwersją substratu organicznego w wodór. Nawet w optymalnych warunkach prowadzenia procesu fermentacji aż 60-70% substratu organicznego pozostaje nie w pełni rozłożona [Pandu i Joseph 2012].

Limitującym czynnikiem produkcji biowodoru jest szybkość hydrolizy poszczególnych składników organicznych odpadów, którą można stymulować dzięki stosowaniu technik wstępnego przetwarzania substratów oraz wrażliwość na obecność tlenu i wysokiego ciśnienia parcjalego wodoru hydrogenaz – enzymów wykorzystywanych przez bakterie produkujące biowodór.

Do istotnych wyzwań związanych z optymalizacją i komercjalizacją procesu produkcji biowodoru z odpadów w warunkach fermentacji zaliczane są:

- wzrost wiedzy w zakresie metabolizmu bakterii produkujących wodór i granicznych poziomów parcjalego ciśnienia wodoru dla tych bakterii
- rozwój nowych technologii produkcji biowodoru łączących tradycyjne techniki z innymi umożliwiającymi zwiększenie opłacalności procesu.

## LITERATURA

1. POLITYKA ENERGETYCZNA POLSKI DO 2030 ROKU, Warszawa 10 listopada, 2009.
2. DYREKTYWA 2001/77/WE PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY Z DNIA 27 WRZEŚNIA 2001 ROKU w sprawie wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych.
3. GUO X. M., TRABLY E., LATRILLE E., H. C., STEYER J. P.; 2010. Hydrogen production from agricultural waste by dark fermentation: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35: 10660-10673.
4. DYREKTYWA RADY 1999/31/WE Z DNIA 26 KWIETNIA 1999 ROKU w sprawie składowania odpadów.
5. USTAWA O ODPADACH 21 KWIETNIA 2001 z póź.zm.
6. SUCHOWSKA-KISIELEWICZ M., MYSZOGRAJ S.; 2011. Produkcja biowodoru w procesach biologicznych. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego. Inżynieria Środowiska*, Nr 144, 18-25.
7. PANDU K., JOSEPH S.; 2012. Comparison and limitations of biohydrogen production processes, *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, Nr 2, 342-356.



8. MATHEWS J., WANG G.;2009. Metabolic pathway engineering for enhanced biohydrogen production, *International Journal of Hydrogen*, Nr 34, 7404-7416.
9. JĘDRZEJEWSKA-CICIŃSKA M., KOZAK K., KRZEMIENIEWSKI M., 2007. Innowacyjna technologia konwersji biodegradowalnych odpadów z przemysłu mleczarskiego (serwatka) do wysokoenergetycznych paliw gazowych (wodór, metan), *Energetyka i Ekologia*, Nr 4, 296-299.
10. YASIN N.H.M., MUMTAZ T., HASSAN M.A.N, RAHMAN A.A.; 2013. Food waste and food processing waste for biohydrogen production: A review *Journal of Environmental Management*, Nr 130, 375–385.
11. ELBESHISHY E., HAFEZ H., DHAR B., R., NAKHLA G.; 2011b. Single and combined effect of various pretreatment methods for biohydrogen production from food waste, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr 36, 11379-11387.
12. HALLENBACK P.C., GOSH D.; 2009. Advances in fermentative biohydrogen production: the way forward?, *Trends in Biotechnology*, ss. 287-297.
13. SINGHAL Y., SINGH R.;21014. Effect of microwave pretreatment of mixed culture on biohydrogen production from waste of sweetproduced from *Benincasa hispida*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr 39, 7534-7540.
14. KIM, D.H., KIM, S.H., KIM, K.Y., SHIN, H.S.; 2010. Experience of a pilot-scale hydrogenproducing anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) treating food waste, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr 35, 1590-1594.
15. NAZLINA H., M., Y., TABASSUM M., MOHD A., H, NOR A.A.,R., 2013. Food waste and food processing waste for biohydrogen production, *Journal of Environmental Management*, Nr 130, 375-385.
16. LAY, J.J., FAN, K.S., CHANG, J., KU, C.H., 2003. Influence of chemical nature of organic wastes on their conversion to hydrogen by heat-shock digested sludge, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr 28, 1361-1367.
17. ELBESHISHY, E., HAFEZ, H., NAKHLA, G.; 2011a. Ultrasonication for biohydrogen production from food waste, *International Journal of Hydrogen Energy*, Nr 36, 2896-2903.
18. LI C.L., FANG H.H.P.; 2007. Fermentative hydrogen production from wastewater and solid wastes by mixed cultures. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Nr 37, 1-39.
19. MSHANDETE A., M., BJÖRNSSON L., KIVAISI A., K., RUBINDA-MAYUGI M.S.T., MATTIASSON B.;2008. Effect of aerobic pretreatment on production of hydrolases and volatile fatty acids during an-

- aerobic digestion of solid sisal leaf decortication residues. *African Journal of Biochemistry Research*, NR 5, 111-119.
20. CHARLES, W. , WALKER, LEE AND CORD-RUWISCH, R.; 2009. Effect of pre-aeration and inoculum on the start-up of batch thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste, *Bioresource Technology*, NR 100, 2329-2335.
  21. NAH I.W., KANG Y.W., HWANG K.Y., SONG W.K.; 2000. Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process, *Water Research*, NR 34, 2362-2368.
  22. LIN J.G., CHANG C.N., CHANG S.C., 1997. Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization, *Bioresource Technology*, Nr 62, 85-90.
  23. BOUGRIER C, DELGENES JP, CARRERE H.; 2008. Effects of thermal treatments on five different waste activated sludge samples solubilisation, physical properties and anaerobic digestion, *Chemical Engineering Journal*, NR 139, 236-244.
  24. FANG, H.H.P., LI, C., ZHANG, T.; 2006. Acidophilic biohydrogen production from rice slurry. *International Journal of Hydrogen Energy*, NR 31, 683-692.
  25. LEE, Z., LI, S., LIN, J., WANG, Y., KUO, P., CHENG, S.S.; 2008. Effect of pH in fermentation of vegetable kitchen wastes on hydrogen production under a thermophilic condition, *International Journal of Hydrogen Energy*, NR 33, 5234 - 5241.
  26. UNEO, Y., FUCUI, H., GOTO, M.; 2007. Operation of a two-stage fermentation process producing hydrogen and methane from organic waste. *Environmental Science and Technology* NR 41, 1413-1419.

## **HYDROGEN PRODUCTION CONDITION FROM WASTE BY DARK FERMENTATION**

### *S u m m a r y*

*Currently, there is a noticeable dynamic increase in the use of hydrogen in the world amounting around 12% per year. It is expected that by 2025 it will increase by about 8-10%. Currently used methods of hydrogen production are very energy intensive. The article presents the current state of knowledge regarding the effectiveness, challenges and perspectives of hydrogen production from waste in conditions of dark fermentation.*

Key words: biohydrogen, pre-treatment of waste, fermentation