

ANETA ZAJDA, MARIUSZ KUGLARZ, BOŻENA MROWIEC

Institut Ochrony i Inżynierii Środowiska
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

EFEKTYWNOŚĆ METANOGENEZY W WARUNKACH WSPÓLFERMENTACJI OSADÓW ŚCIEKOWYCH I BIOODPADÓW KUCHENNYCH

Streszczenie. Celem badań było określenie ilości i jakości pozyskiwanego biogazu w warunkach współfermentacji osadów ściekowych i bioodpadów kuchennych. Ponadto, celem było wyznaczenie optymalnego czasu fermentacji mezofilowej i warunków panujących w reaktorze dla uzyskania najlepszych efektów fermentacji metanowej. Badania procesu kofermentacji mieszaniny osadów ściekowych i bioodpadów kuchennych (zestawionych w stosunku wagowym 4:1) realizowano w warunkach ciągłych dla następujących czasów hydraulicznego zatrzymania w bioreaktorze (HRT): 15, 20, 25, 30 i 35 dni. Najkorzystniejsze warunki prowadzenia współfermentacji osadów ściekowych i bioodpadów kuchennych w aspekcie ilości i jakości produkowanego biogazu oraz stopnia usunięcia materii organicznej uzyskano dla HRT w zakresie od 20 dni do 30 dni. Dla HRT większego od 15 dni fermentacja metanowa przebiegała w stabilnych warunkach, a osad przefermentowany był dobrze zmineralizowany.

Słowa kluczowe: metanogeneza, kofermentacja, biogaz, biomasa, odpady biodegradowalne, osad ściekowy

Wstęp

Unia Europejska wyznaczyła trudne do osiągnięcia cele związane z redukcją emisji zanieczyszczeń, oszczędnością energii oraz udziałem odnawialnych źródeł energii w łącznej jej produkcji. Obecna wiedza i postęp technologiczny pozwalają pozyskiwać energię w postaci biogazu z różnych odpadów organicznych (KRUCZEK i IN. 2007, KRZAK 2009). Współfermentacja osadów ściekowych i organicznej frakcji odpadów komunalnych gromadzonych selektywnie nadaje nowy kierunek dla rozwoju tej technologii. Chodzi przede wszystkim o wzrost stopnia redukcji masy odpadów i większą produkcję biogazu (BRAUN i WELLINGER 2002, JĘDRZAK 2007, DERBAL i IN. 2009). Biogazownie mogą stać się dobrym uzupełnieniem krajowych mocy produkcyjnych,

a nawet gwarancją pewności dostaw energii. Jeśli wziąć pod uwagę grupę odnawialnych źródeł energii, to biogazownie są najbardziej wydajnymi instalacjami. Porównując generatory tej samej mocy, biogazownia w ciągu roku wyprodukuje czterokrotnie więcej energii niż lokalna elektrownia wiatrowa (KRZAK 2009). Zrealizowana praca miała na celu określenie ilości i jakości pozyskiwanego biogazu w warunkach współfermentacji osadu ściekowego i bioodpadów kuchennych oraz określenie optymalnego czasu fermentacji mezofilowej i warunków panujących w reaktorze dla uzyskania najlepszych efektów fermentacji metanowej.

Material i metody

Jako substraty procesu kofermentacji zastosowano nadmierny osad czynny po procesie zagęszczania oraz organiczną frakcję stałych odpadów komunalnych w formie selektywnie zbieranych odpadów kuchennych. Osad pochodził z komunalnej oczyszczalni ścieków, działającej na podstawie technologii osadu czynnego z symultanicznym usuwaniem biogenów. Próby osadu o objętości 10 dm³ pobierano co 2-3 dni, bezpośrednio po procesie zagęszczania na zagęszczarce taśmowej. Odpady zbierano z gospodarstw domowych oraz punktów gastronomicznych. Następnie je homogenizowano dla uzyskania cząstek o wymiarach nie większych niż 1-2 mm, a w razie konieczności przetrzymywano w temperaturze -15°C. Kosubstraty (osad i bioodpady) mieszano w stosunku wagowym 4:1. Proporcja ta została ustalona na podstawie wcześniej realizowanych doświadczeń. Fermentację prowadzono w dwóch bioreaktorach laboratoryjnych o pojemności 3 dm³ w temperaturze 36°C dla następujących czasów hydraulicznego zatrzymania (HRT): 15, 20, 25, 30 i 35 dni. Warunki pracy danego reaktora określano na podstawie obciążenia hydraulicznego dla poszczególnych założonych czasów zatrzymania. Reaktory były umieszczone w szafie termostatycznej, ogrzewanej powietrzem. Na zewnątrz szafy znajdował się zbiornik współpracujący z reaktorem, w którym gromadzono produkowany biogaz. W trakcie realizowanych badań wykonywano analizy fizykochemiczne wsadu fermentatorów oraz biomasy prefermentowanej. Zastosowane metody analityczne były zgodne z procedurą przedstawioną w pracy EATONA i IN. (1995).

Wyniki i dyskusja

Fermentacja metanowa materii organicznej jest wielostopniowym procesem biochemicznym, a na jego właściwy przebieg ma wpływ wiele czynników środowiskowych i parametrów technologicznych. Zasadniczym efektem właściwie przebiegającej fermentacji jest pozyskanie możliwie największej ilości biogazu o dużej zawartości metanu oraz dobry efekt mineralizacji fermentatu. Sporządzana mieszanka osadu i odpadów kuchennych (4:1) poddawana procesowi kofermentacji metanowej charakteryzowała się średnią zawartością suchej masy na poziomie 91,7 g/dm³, a substancje organiczne stanowiły średnio 75,8 g_{s.m.o.}/dm³. Zmiany zawartości suchej masy i suchej masy organicznej po procesie fermentacji przedstawiono w tabeli 1.

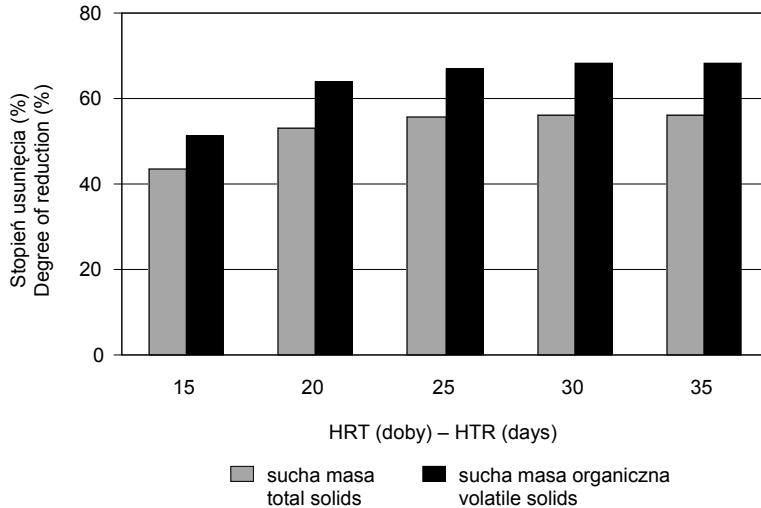
Tabela 1. Sucha masa i sucha masa organiczna fermentatu
 Table 1. Total solids and volatile solids of the digestate

Oznaczenia Indicator	Czas hydraulicznego zatrzymania, HRT (d) Hydraulic retention time, HRT (d)				
	15	20	25	30	35
Sucha masa (s.m.) (g/dm ³) Total solids, TS (g/dm ³)	51,79	43,10	40,62	40,36	40,37
Sucha masa org. (s.m.o.) (g/dm ³) Volatile solids, VS (g/dm ³)	37,06	27,49	25,14	24,07	24,05
Substancje organiczne (% s.m.) Organic matter (% TS)	71,56	63,78	61,89	59,64	59,58
Substancje mineralne (% s.m.) Mineral matter (% TS)	28,44	36,22	38,11	40,36	40,42

Przyjmuje się, że uzyskanie sprawności fermentacji na poziomie 50% redukcji materii organicznej jest technicznie opłacalne (HEIDRICH i IN. 1983). W przeprowadzonych badaniach uzyskano redukcję masy organicznej w zakresie 51,1% do 68,3% (rys. 1). Wartości powyżej 60% redukcji były uzyskiwane już dla HRT 20 dni, a przeciętny czas fermentacji mezofilowej kształtuje się w zakresie 25 dni do 30 dni (HEIDRICH i IN. 1983, DYMACEWSKI i SOZAŃSKI 1995, BIEŃ 2007). Na wysoki stopień redukcji masy organicznej w istotnym stopniu wpłynął 20-procentowy udział bioodpadów kuchennych. Zgodnie z DOHANOYOS i IN. (2004) oraz JĘDRCZAKIEM (2007) dodatek odpadów kuchennych wpływa korzystnie na efektywność przemian biochemicznych, głównie poprzez podniesienie stosunku C:N mieszaniny poddawanej fermentacji.

Jednym z podstawowych analizowanych parametrów w trakcie realizowanego procesu kofermentacji była ilość powstającego biogazu. Dobowa produkcja biogazu odnotowana podczas eksperymentu oraz zawartość metanu w generowanym biogazie została przedstawiona w tabeli 2. Dla najkrótszego HRT (15 d) uzyskano najniższą produkcję biogazu wynoszącą tylko 0,42 dm³/dm³·d. Maksymalną produkcję biogazu uzyskano w przypadku HRT 20 d, która wynosiła 2,14 dm³/dm³·d. Wzrost czasu fermentacji powodował obniżanie się wydajności procesu i po 35 dobach fermentacji produkcja obniżyła się do wartości 1,12 dm³/dm³·d.

O ile ze wzrostem HRT dobowa produkcja biogazu obniżała się, to jednostkowa produkcja biogazu dla HRT w zakresie 20-30 dni kształtowała się na stałym poziomie 0,57 m³/kg_{s.m.o.}. DERBAL i IN. (2009) uzyskali dla HRT 27 dni jednostkową produkcję biogazu w zakresie 0,12 m³/kg_{s.m.o.} do 0,45 m³/kg_{s.m.o.}. W badaniach przeprowadzonych przez SOSNOWSKIEGO i IN. (2003) produkcja ta kształtowała się na poziomie 0,43 m³/kg_{s.m.o.} dla wsadu fermentatora składającego się w 75% obj. z osadu ściekowego i 25% obj. z selektywnie zbieranej organicznej frakcji odpadów komunalnych. Średnia dobowa i jednostkowa produkcja biogazu w badaniach własnych została przedstawiona na rysunku 2.

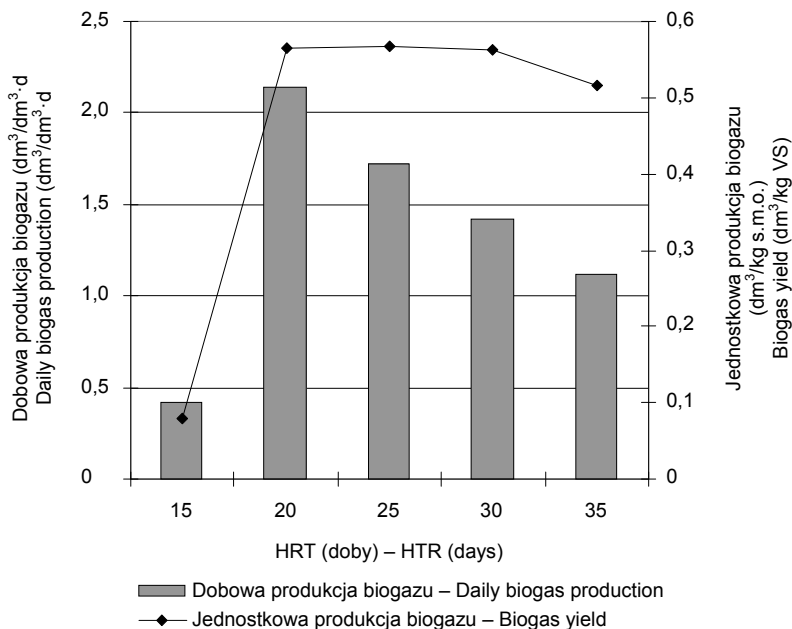


Rys. 1. Stopień usunięcia materii organicznej w zależności od wartości HRT
 Fig. 1. Total solids and volatile matter reduction in dependence of HRT value

Tabela 2. Produkcja biogazu i zawartość metanu
 Table 2. Daily biogas production and CH₄ content

Oznaczenie Indicator	Czas hydraulicznego zatrzymania, HRT (d) Hydraulic retention time, HRT (d)									
	15		20		25		30		35	
	zakres wartości range of value	wartość średnia average value	zakres wartości range of value	wartość średnia average value	zakres wartości range of value	wartość średnia average value	zakres wartości range of value	wartość średnia average value	zakres wartości range of value	wartość średnia average value
Produkcja biogazu (dm ³ /dm ³ ·d) ÷ Biogas production (dm ³ /dm ³ ·d)	0,40 ÷ 0,45	0,42	2,00 ÷ 2,21	2,14	1,60 ÷ 1,84	1,72	1,34 ÷ 1,55	1,42	1,05 ÷ 1,18	1,12
Udział CH ₄ (% obj.) CH ₄ content (% vol.)	60		66		67		66		67	

W stabilnych warunkach fermentacji metanowej, tj. dla HRT 20 dni do 35 dni uzyskano praktycznie stałą zawartość metanu w biogazie, wynoszącą od 66% obj. do 67% obj. (tab. 2). Taka zawartość metanu w biogazie jest uważana za przeciętną wartość w przypadku fermentacji metanowej osadów ściekowych (DYMACEWSKI i SOZAŃSKI 1995, BIEN 2007). W przypadku najmniejszej produkcji gazu fermentacyjnego (HRT 15 d)



Rys. 2. Produkcja biogazu w zależności od wartości HRT
 Fig. 2. Biogas production in dependence of HRT value

stwierdzono również najmniejszy udział metanu, tj. 60% obj. Jednakże wcześniej realizowane badania własne wyłącznie dla osadu ściekowego (nadmiernego osadu czynnego) wykazały średnią zawartość metanu w biogazie na poziomie 56% obj. Zgodnie ze zdaniem BURACZEWSKIEGO (1989) i HARTMANA (1996) uzyskany wzrost zawartości metanu w biogazie mniej więcej o 10% potwierdza, że dodatek 20% łatwo biodegradowalnych substancji organicznych (białek i tłuszczów) w postaci bioodpadów kuchennych przyczynił się bezpośrednio do wzrostu wartości opałowej pozyskiwanego biogazu. DERBAL i IN. (2009) w podobnych warunkach fermentacji uzyskali biogaz o zawartości metanu w zakresie 60,3-68,1%.

W dalszej kolejności analizowano parametry jakościowe cieczy osadowej fermentatu, które jednocześnie informowały o warunkach przebiegu procesu fermentacji – tabela 3. Wartość pH cieczy osadowej wzrosła wraz z wydłużaniem wartości HRT. Wartość minimalną pH oznaczono dla HRT 15 dni na poziomie 4,93. Dla HRT 20 d i kolejnych analizowanych, wartość pH cieczy utrzymywała się w zakresie powyżej 7. Wartość największą oznaczono dla próby po 35 dobach fermentacji (pH 7,98). Potencjał oksydacyjno-redukcyjny (ORP) obniżał się ze wzrostem czasu zatrzymania biomasy w reaktorze, co świadczyło o pogłębiających się warunkach redukcyjnych. Od 20. do 35. doby fermentacji mieścił się w zakresie od -315 mV do -335 mV. Wyjątek stanowiła próba po HRT 30 d, gdzie oznaczono wartość ORP na poziomie -291 mV. Zawartość lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) po 15 d procesu wynosiła 7570 mg CH₃COOH w 1 dm³, jednak dla HRT od 20 d do 35 d ich zawartość znacząco się zmniejszyła i mieściła w zakresie 953-1294 mg CH₃COOH w 1 dm³. Najmniejszą wartość zasadowości

Tabela 3. Parametry fizyko-chemiczne odcieku pofermentacyjnego
 Table 3. Physical and chemical properties of the digestate liquor

Oznaczenia Indicator	Czas hydraulicznego zatrzymania, HRT (d) Hydraulic retention time, HRT (d)				
	15	20	25	30	35
Obciążenie hydrauliczne (kg s.m.o./m ³ ·d) Hydraulic loading rate (kg VS/m ³ ·d)	5,06	3,79	3,03	2,53	2,17
pH (-)	4,93	7,53	7,84	7,93	7,98
ORP (mV)	-139	-315	-322	-291	-335
LKT (mg CH ₃ COOH w 1 dm ³) VFA (mgCH ₃ COOH in 1 dm ³)	7 570	1 039	1 043	953	1 294
Zasadowość (mg CaCO ₃ w 1 dm ³) Alkalinity (mg CaCO ₃ in 1 dm ³)	3 935	6 543	7 464	6 747	6 465
ChZT (mg O ₂ w 1 dm ³) COD (mg O ₂ in 1 dm ³)	24 025	5 332	4 731	3 350	2 800
Azot amonowy (mg N-NH ₃ w 1 dm ³) Ammonia (mg N-NH ₃ in 1 dm ³)	1 214	1 274	1 273	1 300	1 401

stwierdzono w przypadku najkrótszego HRT na poziomie 3935 mg CaCO₃ w 1 dm³. Dla kolejnych badanych prób parametr ten utrzymywał się w przedziale od 6543 mg CaCO₃/dm³ do 7464 mg CaCO₃ w 1 dm³. Wartości ChZT cieczy osadowej zmniejszały się ze wzrostem czasu zatrzymania. Wartość ekstremalną oznaczono dla próby o HRT 15 d – wyniosła ona 24 025 mg O₂ w 1 dm³. Przy czasie fermentacji 35 dni uzyskano wartość ChZT prawie dziesięć razy niższą – 2800 mg O₂ w 1 dm³.

Korzystny dla przebiegu fermentacji metanowej skład mieszaniny potwierdziły również oznaczenia azotu amonowego. Zawartość azotu w formie amonowej (N-NH₃) mieściła się w zakresie 1,2 g/dm³ do 1,4 g/dm³, czyli zgodnie z JĘDRZAKIEM (2007) oraz CHEN i IN. (2008) poniżej zakresu stężeń 1,7 g N-NH₃ w 1 dm³ do 14 g N-NH₃ w 1 dm³, wywołujących działanie inhibujące dla metanogenezy. Załamanie procesu fermentacji metanowej zaobserwowano w przypadku najkrótszego przyjętego HRT = 15 d. Wskazywały na to bezpośrednio podstawowe oznaczane parametry, tj. pH wynoszące w tym przypadku 4,93 i stężenie lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) – 7570 mg CH₃COOH w 1 dm³. Realizacja procesu w warunkach fermentacji kwaśnej, przy stężeniu LKT powyżej 2000 mg CH₃COOH w 1 dm³ (DYMACEWSKI i SOZAŃSKI 1995, CALLAGHAN i IN. 2002, BIEŃ 2007), inhibuje aktywność bakterii metanogennych, co i w tym przypadku potwierdziło taki efekt i doprowadziło do najmniejszej produkcji biogazu (rys. 2) o najmniejszej zawartości metanu (tab. 2). Zjawisko to było spowodowane zbyt wysokim obciążeniem reaktora, tj. powyżej 5 kg s.m.o. w 1 m³ na dobę. Według MIKSCHA (2000) obciążenie reaktora materia organiczną nie powinno przekraczać wartości 4,8 kg s.m.o. w 1 m³ na dobę, natomiast według HEIDRICHA i IN. (1983) 2,25 kg s.m.o. w 1 m³ na dobę.

Wnioski

Wprowadzenie 20% bioodpadów kuchennych do osadów ściekowych miało korzystny wpływ na przebieg i efektywność mezofilowej fermentacji metanowej. Najkorzystniejsze warunki prowadzenia współfermentacji osadów ściekowych i bioodpadów kuchennych w aspekcie ilości i jakości produkowanego biogazu oraz stopnia usunięcia materii organicznej uzyskano dla HRT w zakresie od 20 do 30 d. Dla HRT większego od 15 dni fermentacja metanowa przebiegała w stabilnych warunkach, a osad prefermentowany był dobrze zmineralizowany.

Literatura

- BIEŃ J., 2007. *Osady ściekowe teoria i praktyka*. Wyd. PCz, Częstochowa.
- BRAUN R., WELLINGER A., 2002. Potential of co-digestion, IEA Bioenergy (Task 37).
- BURACZEWSKI G., 1989. *Fermentacja metanowa*. PWN, Warszawa.
- CALLAGHAN F.J., WASE D.A.J., THAYANITHY K., FOSTER C.F., 2002. Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure. *Biomass Bioenerg.* 22, 1: 71-77.
- CHEN Y., CHENG J.J., CREAMER K.S., 2008. Inhibition of anaerobic digestion: A review. *Biore-sour. Technol.* 99, 10: 4044-4064.
- DERBAL K., BENCHEIKH-LEHOCINE M., CECCHI F., MENIAI A.H., PAVAN P., 2009. Application of the IWA ADM1 model to simulate anaerobic co-digestion of organic waste with waste activated sludge in mesophilic condition. *Bioresour. Technol.* 100: 1539-1543.
- DOHANYOS M., ZABRANSKA J., KUTIL J., JENICEK P., 2004. Improvement of anaerobic digestion of sewage. *IWA Publishing* 49, 10: 89-96.
- DYMACZEWSKI Z., SOZAŃSKI M., 1995. *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*. Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Poznań.
- EATON A.D., CLESCERI L.S., GREENBERG A.E., 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. American Public Health Association, Washington DC, USA.
- HARTMANN L., 1996. *Biologiczne oczyszczanie ścieków*. Wyd. Instal. Pol., Warszawa.
- HEIDRICH Z., OSUCH-PAJDIŃSKA E., ROMAN M., TABERNACKI J., 1983. *Przykłady obliczeń z wodociągów i kanalizacji*. WSiP, Warszawa.
- JĘDRCAK A., 2007. *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- KRUCZEK S., SKRZYPCZAK G., MURASZKOWSKI R., MICHALIK G., 2007. *Biogaz i sposoby jego wykorzystania*. Vulcan Power Sp. z o.o., Wrocław.
- KRZAK J., 2009. Biogazownie w Polsce – niedocenione źródło energii. *Biuro analiz sejmowych – zagadnienia społeczno-gospodarcze* 4: 51.
- MIKSCH K., 2000. *Biotechnologia ścieków*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- SOSNOWSKI P., WIECZOREK A., LEDAKOWICZ S., 2003. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste. *Adv. Environ. Res.* 7: 609-616.

METHANOGENESIS EFFICIENCY IN THE CONDITIONS OF SEWAGE SLUDGE AND KITCHEN BIOWASTE CO-DIGESTION

Summary. The aim of the study was to establish the quantity and quality of the biogas produced in the conditions of mesophilic anaerobic sewage sludge and kitchen biowaste co-digestion, as well as established the most appropriate digestion time, ensuring stable conditions and the effectiveness of the process. The feedstock comprised sewage sludge and kitchen biowaste mixed at the weight ratio of 4:1. The process was carried out in a constant mode for the following hydraulic retention times (HRT): 15, 20, 25, 30 and 35 days. It was established that for the HRT in the range of 20-30 days, the process of anaerobic sewage sludge and kitchen biowaste co-digestion exhibited the most appropriate conditions in terms of biogas production parameters, CH₄ content in the biogas produced as well as degrees of organic matter bioconversion. For the HRT value ≥ 20 days, the process exhibited stable conditions and the digestate was characterized by a high degree of mineralization.

Key words: methanogenesis, co-digestion, biogas, biomass, biodegradable wastes, sewage sludge

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Mariusz Kuglarz, Instytut Ochrony i Inżynierii Środowiska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, Poland, e-mail: mkuglarz@ath.bielsko.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

6.07.2011

Do cytowania – For citation:

*Zajda A., Kuglarz M., Mrowiec B., 2011. Efektywność metanogenezy w warunkach współfermentacji osadów ściekowych i bioodpadów kuchennych. *Nauka Przyr. Technol.* 5, 4, #62.*