



Wpływ sposobu prowadzenia fermentacji osadów ściekowych na produkcję biogazu

Lidia Dąbrowska
Politechnika Częstochowska

1. Wstęp

Proces fermentacji osadów ściekowych prowadzony jest przede wszystkim w warunkach mezofilowych (30–42°C). Fermentacja mezofilowa zapewnia dobrą stabilizację osadów, ale bez dostatecznej higienizacji [2]. Lepsze rezultaty w obniżaniu poziomu patogenów daje fermentacja termofilowa (50–60°C) [3, 8]. Prowadzenie stabilizacji w warunkach termofilowych umożliwi również skrócenie czasu fermentacji. Jednak proces fermentacji termofilowej w porównaniu z mezofilowym jest bardziej wrażliwy na niewielkie zmiany parametrów prowadzenia procesu i wymaga większego nakładu energii na podgrzanie osadów ściekowych do odpowiedniej temperatury.

Prawidłowo prowadzona fermentacja metanowa powinna zapewnić uzyskanie ustabilizowanych pod względem biochemicznym osadów ściekowych i produkcję wysokokalorycznego biogazu. Hydroliza jest uznawana jako etap limitujący szybkość fermentacji osadów [1, 7]. Dlatego przyspieszenie przemiany związków organicznych zawartych w osadach w formy rozpuszczalne powoduje znaczną poprawę efektywności przebiegu następnych faz fermentacji. Zwiększenie stopnia przefermentowania osadów ściekowych oraz produkcji biogazu można uzyskać dzięki zastosowaniu różnych metod: mechanicznych (ultradźwięki, homogenizacja, wysokie ciśnienie), termicznych, chemicznych (alkalia, utlenianie ozonem) i biologicznych (enzymy). Jednakże stosowanie metod chemicznych oraz biologicznych jest nieopłacalne z ekonomicznego punktu widzenia [10].

Celem przeprowadzonych badań było porównanie efektywności procesów stabilizacji beztlenowej osadów ściekowych: metanowej fermentacji mezofilowej, termofilowej i mezofilowej poprzedzonej hydrolizą termofilową w obniżeniu zawartości substancji organicznych w osadach ściekowych i produkcji biogazu (metanu).

2. Materiał badawczy

Osady pobrano z miejskiej, mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków komunalnych. Około 20% objętościowo oczyszczanych ścieków stanowią ścieki przemysłowe. Proces oczyszczania ścieków prowadzony jest metodą osadu czynnego przy uwzględnieniu nityfikacji, denityfikacji, biologicznej i chemicznej defosfatacji. Fermentacja mezofilowa osadów ściekowych wydzielonych w osadnikach, prowadzona jest w zamkniętych komorach fermentacyjnych. Ustabilizowane osady są odwadniane mechanicznie na prasach taśmowych, a następnie suszone w suszarce kolumnowej. Do badań pobrano jednorazowo: mieszaninę osadów wstępnego i nadmiernego (W+N) kierowaną do komory fermentacji oraz osad przefermentowany (F) odprowadzany z zamkniętej komory fermentacji.

3. Przebieg badań i stosowane metody analityczne

3.1. Fermentacja metanowa

Badania przeprowadzono w dwóch etapach: pierwszy to fermentacja termofilowa i kontrolna mezofilowa oraz drugi to fermentacja mezofilowa poprzedzona hydrolizą termofilową i mezofilowa kontrolna. Wykorzystano szklane bioreaktory o pojemności 1,0 dm³, zamknięte gumową membraną, dostosowaną do wielokrotnego pobierania próbek biogazu.

Etap pierwszy rozpoczęto od przygotowania inokulum. W celu rozwinięcia hodowli beztlenowych mikroorganizmów termofilowych bioreaktory napełniono osadem przefermentowanym (F) do objętości 0,65 dm³ i umieszczono w cieplarni w temperaturze 55±1°C. Począwszy od piątego dnia inkubacji hodowlę zasilano w odstępach 48 godzinnych 1 cm³ pożywki zalecanej do hodowli mikroorganizmów fermentujących [13]. Skład pożywki uzupełniono dodatkowo glukozą w ilości 200 g/dm³. Słuszność takiego postępowania potwierdzają badania [14]. Inkubację prowadzono przez 30 dni. Tak przygotowany osad zmieszano w stosunku

objętościowym 1:10 z osadem przefermentowanym pobranym z oczyszczalni otrzymując w ten sposób inokulum, które użyto w etapie pierwszym jako materiał zaszczipiający (F') dla przeprowadzenia zarówno procesu fermentacji termofilowej, jak i kontrolnej mezofilowej. Inokulum (F') zmieszano z mieszaniną osadów wstępnego i nadmiernego (W+N) w stosunku objętościowym 2:1 i otrzymaną mieszaniną (W+N+F') napełniono bioreaktory w ilości 0,65 dm³. Dziesięć bioreaktorów umieszczono w cieplarni w temperaturze 55±1°C, dziesięć w temperaturze 37±1°C. Fermentację osadów prowadzono przez 14 dób.

Drugi etap badań rozpoczęto od przeprowadzenia w bioreaktorach hydrolizy mieszaniny osadów wstępnego z nadmiernym w temperaturze 55±1°C w czasie 4 dób. Po procesie hydrolizy osady (W+N)_H zmieszano z inokulum w stosunku objętościowym 1:2, które w tym etapie stanowił osad przefermentowany (F) pobrany bezpośrednio z oczyszczalni. Uzyskaną mieszaniną osadów ((W+N)_H+F) napełniono 10 bioreaktorów w ilości 0,65 dm³ i przeprowadzono fermentację mezofilową w temp. 37±1°C w okresie 14 dób. Kontrolę dla procesu stanowiła fermentacja mezofilowa osadów niehydrolizowanych (W+N+F).

3.2. Wskaźniki fizyczno-chemiczne osadów

Zarówno przed, jak i po fermentacji określono wybrane właściwości osadów: uwodnienie, suchą pozostałość, straty po prażeniu – metodą bezpośrednią wagową, a w cieczach osadowych wydzielonych z osadów podczas wirowania: pH – potencjometrycznie, zasadowość – miareczkowo, lotne kwasy tłuszczowe LKT – bezpośredniej destylacji, ogólny węgiel organiczny OWO – spektrofotometrycznie w podczerwieni (analyzer węgla multi N/C firmy Analytik Jena), jony metali ciężkich: cynk, miedź, nikiel, ołów, kadm i chrom – metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (spektrometr novAA 400 firmy Analytik Jena).

3.3. Ilość i skład biogazu

Manometryczny pomiar ilości powstającego biogazu prowadzono w odstępach 24-godzinnych wg procedury opisanej w [9]. Skład biogazu kontrolowano w 1, 3, 5, 7, 10 i 14 dobie pobierając gaz i określając jego skład metodą chromatografii gazowej (chromatograf gazowy z detektorem ciepłno-przewodnościowym TCD, model Agilent GC 6890N firmy Agilent Technologies).

Do opisu produkcji biogazu w bioreaktorach wykorzystano zmodyfikowane równanie Gompertza [16]:

$$M(t) = M_{\max} \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{K \cdot e}{M_{\max}} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

gdzie:

M_{\max} – maksymalna produkcja biogazu wyznaczona doświadczalnie, cm^3 ,
 K – szybkość wytwarzania biogazu w intensywnej fazie wzrostu mieszanej populacji mikroorganizmów, cm^3/d ,
 t – czas fermentacji, d,
 λ – faza opóźnienia w wytwarzaniu biogazu – lag faza, d,
 e – stała 2,718.

Estymację nieliniową przeprowadzono metodą Newtona – Gaussa przy użyciu programu STATISTICA 10.

4. Omówienie i dyskusja wyników

4.1. Wybrane właściwości osadów ściekowych

Wybrane właściwości mieszanin osadów przed i po przeprowadzonych fermentacjach metanowych: termofilowej, mezofilowej i mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Dla niezakłóconego przebiegu fermentacji metanowej należy utrzymywać odpowiednie stężenie jonów wodorowych. Wartość pH cieczy osadowej decyduje o prawidłowym rozwoju mikroorganizmów odpowiedzialnych za proces fermentacji. Najbardziej wrażliwe na zmiany pH są metanogeny, mniej bakterie acidogenne. Wartości pH cieczy osadowych podczas prowadzonych fermentacji utrzymywały się na poziomie 7,8–8,0. Były wyższe od zalecanych 6,8–7,4 [11], ale mieszczące się w wartościach granicznych 6,4–8,5 [6].

Wartość ilorazu LKT do zasadowości (wyrażonych odpowiednio w $\text{mg CH}_3\text{COOH}/\text{dm}^3$ i $\text{mg CaCO}_3/\text{dm}^3$) podczas fermentacji termofilowej zmieniła się z 0,34 do 0,13, natomiast podczas mezofilowej do 0,09. Przy niezakłóconym przebiegu fermentacji wartość ta nie powinna przekraczać 0,3 [6]. Wyższa wartość wskaźnika podczas fermentacji termofilowej była spowodowana wyższym stężeniem LKT. Potwierdzają to badania [12, 15]. Podczas fermentacji mezofilowej osadów wstępnie hydro-

lizowanych wartość LKT/zasadowości zmniejszyła się z 0,44 do 0,05. Początkowa wysoka wartość ilorazu LKT do zasadowości nie spowodowała zakłócenia procesu fermentacji.

W cieczy osadowej w 14. dobie fermentacji termofilowej stwierdzono wysoką zawartość OWO – 1008 mg C/dm³. Podczas fermentacji mezofilowej zarówno substratu hydrolizowanego, jak i niehydrolizowanego zawartość OWO zmalała. Po fermentacji osadów wstępnie hydrolizowanych wyniosła 452 mg C/dm³, niehydrolizowanych 298 i 395 mg C/dm³. Świadczyło to zużyciu łatwo dostępnego substratu organicznego. Biodegradację związków organicznych potwierdziło obniżenie wartości wskaźnika straty po prażeniu oraz wzrost uwodnienia osadów.

Tabela 1. Wybrane właściwości osadów (W+N+F') przed fermentacją i po termofilowej i mezofilowej fermentacji

Table 1. The chosen physicochemical indexes of sludges (W+N+F') before digestion and after thermophilic and mesophilic digestion

Wskaźniki	Jedn.	Przed fermentacją	Po fermentacji termofilowej	Po fermentacji mezofilowej
pH	–	7,80	8,02	7,76
Zasadowość	mg/dm ³	2150,0	3810,0	3580,0
LKT	mg/dm ³	736,0	503,0	329,0
OWO	mgC/dm ³	530,0	1008,0	298,0
Cynk	mg/dm ³	0,156	0,572	0,170
Miedź	mg/dm ³	0,045	0,097	0,061
Nikiel	mg/dm ³	0,083	0,096	0,068
Ołów	mg/dm ³	0,040	0,035	0,028
Kadm	mg/dm ³	0,006	0,014	0,010
Chrom	mg/dm ³	0,068	0,063	0,052
Uwodnienie	%	97,44	98,07	98,10
Sucha pozostałość	g/dm ³	25,62	19,28	18,95
Straty po prażeniu (subst. organicz.)	g/dm ³	17,41	11,02	10,72
	%	68,0	57,2	56,6

Tabela 2. Wybrane właściwości osadów wstępnie hydrolizowanych ((W+N)_H+F) i niehydrolizowanych (W+N+F) przed i po fermentacji mezofilowej

Table 2. The chosen physicochemical indexes of preliminary hydrolyzed ((W+N)_H+F) and non-hydrolyzed (W+N+F) sludges before and after mesophilic digestion

Wskaźniki	Jedn.	Przed fermentacją osadów		Po fermentacji osadów	
		(W+N) _H +F	W+N+F	(W+N) _H +F	W+N+F
pH	–	7,84	7,86	7,85	8,03
Zasadowość	mg/dm ³	2840,0	2510,0	4420,0	4450,0
LKT	mg/dm ³	1250,0	565,0	225,0	350,0
OWO	mgC/dm ³	1630,0	583,0	452,0	395,0
Cynk	mg/dm ³	1,294	0,514	0,770	0,611
Miedź	mg/dm ³	0,148	0,090	0,118	0,112
Nikiel	mg/dm ³	0,226	0,158	0,098	0,121
Ołów	mg/dm ³	0,098	0,076	0,078	0,083
Kadm	mg/dm ³	0,026	0,022	0,023	0,028
Chrom	mg/dm ³	0,254	0,210	0,124	0,150
Uwodnienie	%	97,03	96,83	97,68	97,63
Sucha pozost.	g/dm ³	29,68	31,67	23,21	23,69
Straty po prażeniu	g/dm ³	19,44	20,84	13,17	13,52
	%	65,5	65,8	56,7	57,1

Podczas fermentacji termofilowej obniżenie zawartości substancji organicznych uzyskano na poziomie 37%, podczas mezofilowej – 38%. Podczas procesu wstępnej hydrolizy termofilowej osadów uzyskano 9% obniżenie zawartości substancji organicznych, po czym następnie podczas fermentacji mezofilowej – 32%.

Negatywny wpływ metali ciężkich na przebieg fermentacji metabolicznej zależy od ich stężenia w masie osadów, odczynu fermentującej biomasy, interakcji różnych jonów metali i ich stopienia utlenienia. Najbardziej toksyczne są metale w formie rozpuszczonej, najmniej w postaci wytrąconych osadów. Stężenia jonów metali ciężkich w cieczach osadowych utrzymywały się na niskim poziomie. Podczas fermentacji termofi-

lowej stężenie cynku i miedzi wzrosło i było wyższe niż podczas mezofilowej, jednak w przypadku cynku nie przekroczyło wartości $0,6 \text{ mg/dm}^3$, miedzi $0,1 \text{ mg/dm}^3$. Stężenia pozostałych metali: niklu, ołowiu, kadmu i chromu zmieniały się w niewielkim zakresie. Również podczas fermentacji mezofilowej nie stwierdzono istotnych różnic w zmianach stężeń. Stężenie cynku było poniżej $0,2 \text{ mg/dm}^3$, a pozostałych metali poniżej $0,1 \text{ mg/dm}^3$ (tabela 1). W przypadku osadów wstępnie hydrolizowanych stężenia metali w cieczach osadowych przed fermentacją były wyższe niż osadów niehydrolizowanych (tabela 2). W trakcie fermentacji stwierdzono obniżenie stężenia metali. Rozpuszczalne związki metali, które powstają w wyniku mineralizacji materii organicznej, przedostają się do cieczy osadowej, mogą być zaadsorbowane między innymi przez węglany, tlenki żelaza i manganu, związki humusowe, frakcję ilastą. Podczas fermentacji metanowej w obecności jonów siarczkowych zachodzą również reakcje strącania metali (z wyjątkiem chromu) i powstają trudno rozpuszczalne siarczki metali, a więc postać praktycznie niedostępna dla mikroorganizmów [5, 8].

4.2. Produkcja i skład biogazu

Dobową produkcję biogazu podczas termofilowej i mezofilowej fermentacji metanowej w cm^3 przeliczoną na dm^3 stabilizowanych osadów niehydrolizowanych ($W+N+F^\circ$), ($W+N+F$) oraz wstępnie hydrolizowanych w temperaturze 55°C ($(W+N)_H+F$) przedstawiono w tabeli 3.

W pierwszych czterech dobach stabilizacji więcej biogazu powstawało podczas fermentacji mezofilowej niż podczas termofilowej, odpowiednio $620\text{--}1033 \text{ cm}^3$ oraz $568\text{--}924 \text{ cm}^3$ z 1 dm^3 stabilizowanych osadów ściekowych. W kolejnych dobach prowadzenia fermentacji ilość wytwarzanego biogazu była większa podczas fermentacji termofilowej. Największą produkcję biogazu podczas fermentacji termofilowej uzyskano w piątej dobie stabilizacji – $1116 \text{ cm}^3/\text{dm}^3$. Sumarycznie w trakcie 14-dobowej fermentacji termofilowej osadów uzyskano 6462 cm^3 , natomiast podczas mezofilowej 6082 cm^3 biogazu z 1 dm^3 stabilizowanych osadów.

Ilość biogazu z 1 grama usuniętej suchej masy organicznej po fermentacji termofilowej wyniosła $1,01 \text{ dm}^3$, po mezofilowej $0,91 \text{ dm}^3$. Wartości podawane w [8] dla fermentacji mezofilowej wynoszą $0,9\text{--}0,95 \text{ dm}^3/\text{g}$ usuniętej suchej masy organicznej.

Tabela 3. Ilość biogazu (cm^3/dm^3 osadów) powstającego podczas fermentacji termofilowej i mezofilowej osadów i fermentacji mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych

Table 3. The amount of biogas (cm^3/dm^3 of sludge) produced during thermophilic and mesophilic digestion of sludge and mesophilic digestion of preliminary hydrolyzed sludge

Doba	Ilość biogazu (cm^3/dm^3) podczas fermentacji			
	termofilowej osadów W+N+F'	mezofilowej osadów W+N+F'	mezofilowej osadów (W+N) _H +F	mezofilowej osadów W+N+F
1	876	620	930	565
2	610	935	920	648
3	568	1033	930	710
4	924	980	1180	920
5	1116	760	1070	1072
6	630	394	514	683
7	444	288	343	334
8	354	222	310	275
9	324	210	243	200
10	192	180	220	199
11	138	132	203	155
12	108	120	151	120
13	98	108	109	92
14	80	102	74	66
Ogółem	6462	6082	7197	6039

Zawartość CH_4 w biogazie podczas prowadzenia fermentacji mezofilowej osadów, poza pierwszą dobą, wynosiła 59–64%, natomiast podczas fermentacji termofilowej 57–62% (tabela 4). Wyższą produkcję biogazu podczas fermentacji termofilowej w porównaniu z mezofilową, ale o niższej zawartości metanu w biogazie potwierdzają badania [12].

Tabela 4. Zawartość CH₄ i CO₂ w biogazie podczas fermentacji termofilowej i mezofilowej osadów (W+N+F')

Table 4. Content of CH₄ and CO₂ in biogas during thermophilic and mesophilic digestion of sludge (W+N+F')

Skład biogazu	Fermentacja termofilowa osadów (W+N+F')					
	1 d	3 d	5 d	7 d	10 d	14 d
CH ₄ , %	46,4	56,6	61,5	62,3	59,0	59,2
CO ₂ , %	37,6	36,7	32,7	33,5	33,8	34,4
	Fermentacja mezofilowa osadów (W+N+F')					
CH ₄ , %	43,8	62,8	64,3	63,0	60,2	59,4
CO ₂ , %	36,8	31,7	32,4	33,5	35,1	33,8

Podczas fermentacji mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych ilość produkowanego biogazu wzrastała systematycznie w znaczących ilościach w pięciu pierwszych dobach procesu. Największą ilość biogazu uzyskano w czwartej dobie fermentacji – 1180 cm³. Ogółem podczas 14-dobowej fermentacji pozyskano 7197 cm³ biogazu. Jednostkowa produkcja biogazu wyniosła 1,15 dm³ z 1 grama usuniętej suchej masy organicznej osadów. Podczas fermentacji osadów niehydrolizowanych ilość wytworzonego biogazu wyniosła 6039 cm³. Różnica w uzyskanej ilości biogazu, szczególnie w pierwszych dobach fermentacji, wynikała z większej zawartości substratu organicznego w cieczy osadów wstępnie hydrolizowanych. Jednostkowa produkcja biogazu z 1 grama usuniętej suchej masy organicznej niehydrolizowanych osadów wyniosła odpowiednio 0,83 dm³. Ilość CH₄ w biogazie wytworzonym podczas obu fermentacji, poza pierwszą dobą, utrzymywała się w zakresie 60–64% (tabela 5).

Do opisu produkcji biogazu zastosowano zmodyfikowany model Gompertza. Otrzymano funkcje opisujące produkcję biogazu podczas fermentacji termofilowej oraz mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych i niehydrolizowanych:

fermentacja termofilowa osadów W+N+F'

$$M(t) = 6462 \cdot \exp \left\{ - \exp \left[\frac{902 \cdot e}{6462} (0,50 - t) + 1 \right] \right\}$$

fermentacja mezofilowa osadów W+N+F'

$$M(t) = 6084 \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{980 \cdot e}{6084}(0,44 - t) + 1\right]\right\}$$

fermentacja mezofilowa osadów (W+N)_H+F

$$M(t) = 7197 \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{1114 \cdot e}{7197}(0,43 - t) + 1\right]\right\}$$

fermentacja mezofilowa osadów W+N+F

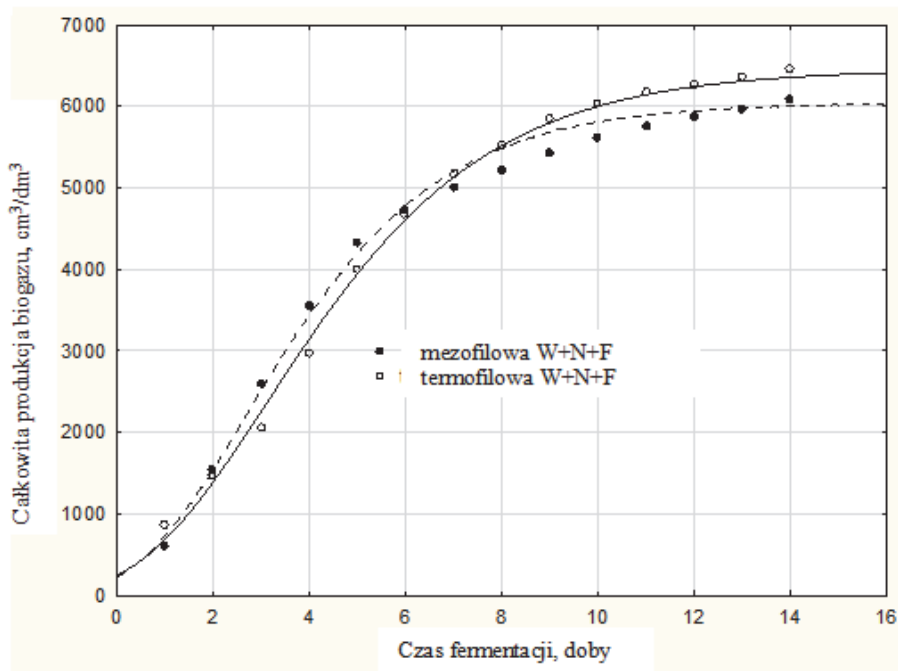
$$M(t) = 6039 \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{865 \cdot e}{6039}(0,57 - t) + 1\right]\right\}$$

Uzyskane krzywe przedstawiono na rys. 1 i 2.

Tabela 5. Zawartość CH₄ i CO₂ w biogazie podczas fermentacji mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych ((W+N)_H+F) i niehydrolizowanych (W+N+F)

Table 5. Content of CH₄ and CO₂ in biogas during mesophilic digestion of preliminary hydrolyzed and non-hydrolyzed sludge

Skład biogazu	Fermentacja mezofilowa osadów (W+N) _H +F					
	1 d	3 d	5 d	7 d	10 d	14 d
CH ₄ , %	32,8	60,8	64,3	63,2	61,9	62,3
CO ₂ , %	32,4	30,5	29,2	29,8	32,2	30,1
	Fermentacja mezofilowa osadów (W+N+F)					
CH ₄ , %	42,6	61,6	64,0	60,5	59,5	61,5
CO ₂ , %	35,8	30,5	27,8	33,7	32,6	28,6

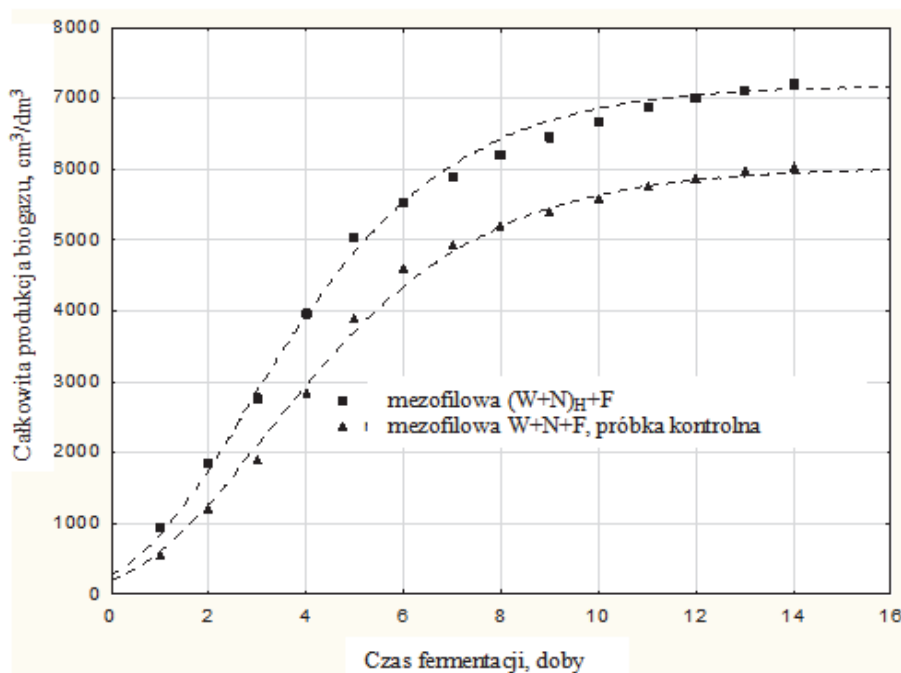


Rys. 1. Przebieg produkcji biogazu podczas fermentacji termofilowej i mezofilowej osadów (W+N+F')

Fig. 1. Estimation of biogas production during sludge (W+N+F') thermophilic and mesophilic digestion

Współczynniki determinacji R^2 równe 0,99 wskazują, że dobrane funkcje odpowiadają rzeczywistym przebiegom produkcji biogazu obserwowanym podczas fermentacji. Postaci funkcji wskazują, że w początkowej fazie (10–14 godzin) proces przebiegał z pewnym opóźnieniem charakterystycznym dla procesu fermentacji, w którym ilość inokulum w stosunku do ilości substratu mogła być zbyt mała.

Większa wartość współczynnika szybkości wytwarzania biogazu w intensywnej fazie wzrostu mieszanej populacji drobnoustrojów ($1114 \text{ cm}^3/\text{d}$) podczas stabilizacji osadów wstępnie hydrolizowanych w stosunku do osadów niehydrolizowanych ($865 \text{ cm}^3/\text{d}$) potwierdziła możliwość uzyskania większej produkcji biogazu i tym samym korzystniejsze prowadzenie fermentacji mezofilowej osadów, które były wstępnie hydrolizowane w temperaturze 55°C .



Rys. 2. Estymacja produkcji biogazu podczas fermentacji mezofilowej osadów wstępnie hydrolizowanych ((W+N)_H+F) i niehydrolizowanych (W+N+F)

Fig. 2. Estimation of biogas production during mesophilic digestion of preliminary hydrolyzed sewage sludge ((W+N)_H+F) and non-hydrolyzed sludge (W+N+F)

5. Wnioski

- Podczas fermentacji mezofilowej poprzedzonej hydrolizą termofilową (55°C) uzyskano większą produkcję biogazu niż podczas mezofilowej osadów niehydrolizowanych czy też fermentacji termofilowej, odpowiednio 1,15; 0,91–0,83; 1,01 dm³ biogazu z 1 g usuniętej suchej masy organicznej.
- Korzystniejsze prowadzenie fermentacji mezofilowej osadów, które były wstępnie hydrolizowane w temperaturze 55°C potwierdziła wyznaczona z równania Gompertza największa dla tej fermentacji szybkość wytwarzania biogazu w intensywnej fazie wzrostu mieszanej populacji mikroorganizmów.

- Średnia zawartość metanu w biogazie podczas fermentacji mezofilowej poprzedzonej hydrolizą termofilową utrzymywała się w zakresie 61–64%, natomiast podczas fermentacji termofilowej i mezofilowej osadów niehydrolizowanych odpowiednio 57–62% i 59–64%.
- W cieczach osadowych podczas procesu metanowej fermentacji mezofilowej (zarówno osadów wstępnie hydrolizowanych, jak i niehydrolizowanych) oraz fermentacji termofilowej jony metali ciężkich: cynku, miedzi, niklu, ołowiu, kadmu i chromu występowały w niskich stężeniach. Metale te związane były w osadach.

Badania wykonano w ramach realizacji pracy BS-PB-402-301/2011

Literatura

1. **Appels L., Baeyens J., Degreve J., Dewil R.:** *Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge.* Progress in Energy and Combustion Science, 34, 755–781 (2008).
2. **Bartoszewski K., Kurbiel J.:** *Oczyszczanie ścieków komunalnych i przemysłowych w wielkich miastach.* [w:] Gospodarka komunalna w miastach, pod red. R. Zarzyckiego, PAN, Łódź, 189–213 (2001).
3. **Carballa M., Omil F., Lema J.M.:** *Influence of different pretreatments on anaerobically digested sludge characteristics: Suitability for final disposal.* Water, Air and Soil Pollution, 199, 311–321 (2009).
4. **Carrère H., Dumas C., Battimelli A., Batstone D.J., Delgenès J.P., Steyer J.P., Ferrer I.:** *Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review.* Journal of Hazardous Materials, 183, 1–15 (2010).
5. **Chen Y., Cheng J.J., Creamer K.:** *Inhibition of anaerobic digestion process: A review.* Bioresource Technology, 99, 4044–4064 (2008).
6. **Dymaczewski Z., Oleszkiewicz J.A., Sozański M.M. (red.):** *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków.* Wyd. PZITS, Poznań (1997).
7. **Haled A., Arched M., Anjou M., Manhood T., Dawson L.:** *The anaerobic digestion of solid organic waste.* Waste Management, 31, 1737–1744 (2011).
8. **Heinrich Z., Nieścier A.:** *Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych.* Seria: Wodociągi i Kanalizacja, 4, Wyd. PZITS, Warszawa (1999).
9. **Janosz-Rajczyk M. (red.):** *Badania wybranych procesów oczyszczania ścieków.* Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa (2008).
10. **Ledakowicz S., Krzystek L.:** *Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego.* Prace Przeglądowe, Biotechnologia, 70, 165–183 (2005).

11. **Malina J.F., Jr., Poland F.G.:** *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes.* (Vol. 7), Technomic, Publishing Co., Lancaster (1992).
12. **Nges I.A., Liu J.:** *Effects of solid retention time on anaerobic digestion of dewatered-sewage sludge in mesophilic and thermophilic conditions.* *Renewable Energy*, 35, 2200–2206 (2010).
13. **Norma PN-EN ISO 11734:** *Jakość wody. Oznaczanie „całkowitej” biodegradacji beztlenowej związków organicznych w osadzie przefermentowanym* (2003).
14. **Ortega L., Barrington S., Guiot S.R.:** *Thermophilic adaptation of a mesophilic anaerobic sludge for food waste treatment.* *Journal of Environmental Management*, 88, 517–525 (2008).
15. **Song Y.C., Kwon S.J., Woo J.H.:** *Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic – and thermophilic digestion of sewage sludge.* *Water Research*, 38, 1653–1662 (2004).
16. **Zhu B., Gikas P., Zhang R., Lord J., Jenkins B., Li X.:** *Characteristics and biogas production potential of municipal solid wastes pretreated with a rotary drum reactor.* *Bioresource Technology*, 100, 1122–1129 (2009).

Influence of Different Digestion of Sewage Sludge on Biogas Production

Abstract

The aim of this study was to determine the influence of different processes of biochemical stabilization of sewage sludge on the following: biogas production, decomposition of organic matter, transfer of heavy metal ions to the liquid phase of sludge. The stabilization processes of interest in this work were: methane thermophilic digestion (55°C), mesophilic digestion (37°C), mesophilic digestion of thermophilically hydrolyzed sludge. To characterize biogas production in bioreactors, modified Gompertz equation was used.

Higher biogas yields were obtained during thermophilic digestion, compared to the yields obtained under mesophilic conditions – 1.01 and 0.91 dm³ from 1 g of the removed dry organic matter of sludge, respectively. Mesophilic digestion of thermophilically hydrolyzed sludge provided the highest biogas production, approximately 1.15 dm³ from 1 g of the removed dried organic matter of sludge. A comparable degree of organic matter degradation was observed for all digestion processes, 35–41%. CH₄ content in biogas during sludge mesophilic digestion, excluding 1st day, amounted to 59–64%, while

during thermophilic digestion – 57–62%. Higher value of biogas production velocity coefficient while intensive growth phase of mixed microbes population ($1.11 \text{ dm}^3/\text{d}$), during preliminary hydrolyzed sludge stabilization, in comparison to non-hydrolyzed sludge ($0.87 \text{ dm}^3/\text{d}$), indicates the possibility of obtaining higher biogas production. Therefore it would be more beneficial to conduct mesophilic digestion of sludge which was preliminarily hydrolyzed at temperature of 55°C .

The application of thermophilic digestion did not significantly influence the release of heavy metal ions to the stabilized sludge liquid. The concentration of zinc in the liquid was below $0.8 \text{ mg}/\text{dm}^3$ during digestion. The concentration of the other metals was below $0.2 \text{ mg}/\text{dm}^3$ for all digestion processes.

Słowa kluczowe:

biogaz, osady ściekowe, hydroliza termofilowa, fermentacja

Keywords:

biogas, sewage sludge, digestion, thermophilic hydrolysis, digestion