

Katarzyna KALEMBA, Krzysztof BARBUSIŃSKI

WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI  
INSTYTUT INŻYNIERII WODY I ŚCIEKÓW  
POLITECHNIKA ŚLĄSKA

## WSPÓŁFERMENTACJA OSADÓW ŚCIEKOWYCH I ODPADU Z PRODUKCJI BIODIESLA

### CO-DIGESTION SEWAGE SLUDGE AND BY-PRODUCTS AFTER BIODIESEL PRODUCTION

*The aim of the study was to determine the possibility of co-digestion of sewage sludge and by-product from production of biofuels from vegetable oils. For this purpose, sewage sludge from municipal wastewater treatment plant and waste from biodiesel production were fermented. Waste consisted of 2,0% to 6,5% glycerol, 1 5% methanol, water from rinse of oil and catalyst residues (sulfates, fatty acids and trace amounts of soap). Co-fermentation was carried out for 28 days at mesophilic conditions (37°C). Reactors were set for collection of biogas. The measurement of composition of produced biogas was made. The samples contained 2, 3, 5, 10 and 15% of waste. A control sample contained sludge without addition of co-substrate. After co-digestion the impact of co-substrate on the efficiency and stability of the process was estimated. Filtration properties (capillary suction time) before and after co-digestion was also evaluated.*

## 1. Wprowadzenie

Polska wchodząc do Unii Europejskiej zobowiązała się do przestrzegania praw obowiązujących w jej strukturach. Jednym z priorytetów polityki energetyczno-klimatycznej Unii Europejskiej są odnawialne źródła energii (OZE). Zgodnie ze strategią na rok 2020 Polska ma wytworzyć 15% energii elektrycznej z OZE. Źródła energii odnawialnej można zdefiniować jako źródła które przetwarzają energię wiatru, promieniowania słonecznego, geotermalną, fal, prądów i pływów morskich, spadku rzek oraz energię pozyskiwaną z biomasy, biogazu wysypiskowego, a także z biogazu powstałego w procesach odprowadzania lub oczyszczania ścieków albo rozkładu składowanych szczątek roślinnych i zwierzęcych [15].

Jako biomasę można określić podatne na rozkład biologiczny 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 [6].

Od 1 października 2005 r. oczyszczalnie ścieków mogą ubiegać się o zielone certyfikaty, które stanowią prawo majątkowe powstające w wyniku konwersji wydawanych świadectw pochodzenia energii z odnawialnych źródeł energii. W związku z tym stabilizacja beztlenowa osadów zyskała na znaczeniu. Biogaz otrzymywany w wyniku fermentacji beztlenowej składa się przede wszystkim z metanu (50-77%) i ditlenku węgla (ok. 40-50%). Ponadto zawiera jeszcze inne gazy, m.in. azot, siarkowodor, tlenek węgla, amoniak i tlen. Do produkcji ciepła biogaz powinien zawierać minimum 40% metanu, natomiast do produkcji energii elektrycznej, aby mógł być spalany w silnikach, powinien zawierać co najmniej 50% metanu [13]. Jedną z metod zwiększenia produkcji energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych jest współfermentacja osadów ściekowych z różnego rodzaju biomasą. Współfermentacja polega na symultanicznym, beztlenowym rozkładzie co najmniej dwóch składników pochodzących z różnych źródeł. Proces współfermentacji zachodzi w taki sam sposób jak klasyczna fermentacja, tj. w czterech następujących po sobie fazach: hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy i metanogenezy [17].

Biodiesel czyli estry metylowe kwasów tłuszczowych (FAME) powstają w wyniku procesu transestryfikacji acylogliceroli alkoholem metylowym w obecności katalizatora. Teoretycznie podczas procesu transestryfikacji powstają FAME oraz glicerol jednak w rzeczywistości proces jest trójstopniowy. Produkty końcowe można podzielić na dwie fazy ciekłe: górną zawierającą FAME oraz dolną – glicerynową, która jest mieszaniną wolnego glicerolu, mydeł, alkoholu metylowego, metanolu, resztek katalizatora oraz nieprzereagowanych monoacylogliceroli oraz diacylogliceroli [3, 14]. Współfermentacja osadów ściekowych z dolną frakcją glicerynową powstała po produkcji biodiesla jest doskonałym sposobem zarówno na utylizację odpadowego produktu ubocznego jak i na intensyfikację produkcji biogazu [1, 2, 4, 5, 10].

## 2. Substraty i metodyka badań

Do procesu współfermentacji użyto osadu ściekowego oraz produktów ubocznych z produkcji biopaliw z olejów roślinnych. Osad nadmierny zagęszczony mechanicznie pobrano z komunalnej oczyszczalni ścieków znajdującej się na terenie województwa śląskiego, pracującej w oparciu o technologię osadu czynnego. Kosubstrat uzyskano z miejsko-przemysłowej oczyszczalni ścieków znajdującej się w województwie małopolskim. W swoim składzie zawierał ok. 2,0-6,5% gliceryny (glicerol), 1-5% metanolu, wodę z płukania oleju, resztki katalizatora - siarczany, kwasy tłuszczowe oraz śladowe ilości mydeł. Charakterystykę substratów procesu fermentacji przedstawiono w tabeli 1.

Jako zaszczep użyto osad pobrany z komory fermentacyjnej pracującej w warunkach mezofilowych. W każdej z prób znajdowała się identyczna ilość zaszczepu wynosząca 50 g. Do kolejnych prób osadu dodano 8, 12, 20, 40 i 60 g odpadu (Tab. 2), co stanowiło 2, 3, 5, 10 oraz 15% udział kosubstratu w mieszaninie. Waga każdej z prób wynosiła 400 g. Próbę odniesienia stanowiła mieszanina osadów bez dodatku kosubstratu.

Tabela. 1 Charakterystyka substratów procesu fermentacji

Table 1. Characteristics of fermentation substrates

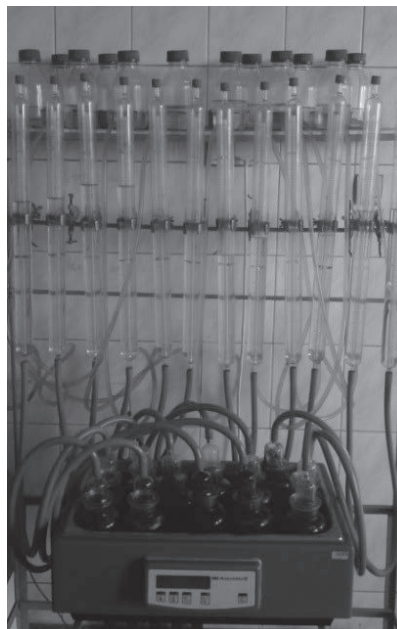
Wskaźnik	Osad	Odpad po produkcji biodiesla
pH	7,9	8,2
ChZT (mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup> )	403,5	54 496
LKT (mg CH <sub>3</sub> COOH/dm <sup>3</sup> )	18	549
Zasadowość (mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup> )	424	1195
Sucha masa ogólna (g/dm <sup>3</sup> )	42,7	21,9
Sucha masa organiczna (g/dm <sup>3</sup> )	30,4	17,9
Sucha masa mineralna (g/dm <sup>3</sup> )	12,3	4,0

Tabela. 2 Skład ilościowy mieszanin poddanych współfermentacji

Table 2. The quantitative composition of mixtures subject to co-digestion

Udział odpad/osad ściekowy, % wag.	Ilość osadu nadmiernego, g	Ilość osadu z komór fermentacyjnych, g	Ilość odpadu, g
0/100	350	50	0
2/98	342		8
3/97	338		12
5/95	330		20
10/90	310		40
15/85	290		60

Badania wykonano w Laboratorium Badań Przeróbki Osadów w Instytucie Inżynierii Wody i Ścieków Politechniki Śląskiej. Proces współfermentacji prowadzono przez 28 dób w warunkach statycznych z wykorzystaniem instalacji do fermentacji osadów. Instalacja składała się z 12 szklanych kolb (reaktorów) szczelnie połączonych z kolumnami do odbioru biogazu (Rys. 1). Pojemność każdego z reaktorów wynosiła 500 cm<sup>3</sup>. Poszczególne próby zawierające osad ściekowy i odpad były nastawiane podwójnie, dlatego każda seria badań obejmowała 6 prób różniących się procentowym udziałem odpadu. Współfermentację prowadzono w warunkach mezofilowych (37°C). W celu zapewnienia stałej temperatury reaktory umieszczono w łaźni wodnej. Kolby nie zostały wyposażone w mieszadła, dlatego ich zawartość mieszano 2 razy w ciągu doby poprzez wyciągnięcie pojedynczej kolby z łaźni wodnej oraz zamieszanie zawartości ruchem okrężnym bez odłączania zestawu do odbioru biogazu. Codziennie dokonywano odczytu objętości wyprodukowanego biogazu oraz dwa razy w tygodniu pomiaru składu wyprodukowanego biogazu.



Fot. 1 Instalacja do fermentacji osadów  
 Phot 1. Installation for fermentation of sludge

Przed oraz po zakończeniu procesu współfermentacji wykonano analizy fizykochemiczne wszystkich mieszanin oraz cieczy nadosadowych. W osadzie wykonano pomiar pH oraz oznaczono suchą masę ogólną, organiczną i mineralną oraz zmierzono czas ssania kapilarnego (Tab. 3). Zakres analiz wykonanych w cieczy nadosadowej obejmował pomiar pH oraz oznaczenie chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT), zawartości lotnych kwasów tłuszczowych (LKT), zasadowości (Z) oraz azotu amonowego (Tab. 4). W czasie badań dokonywano pomiaru objętości i składu produkowanego biogazu.

Tabela. 3 Charakterystyka fizykochemiczna mieszanin substratów  
 Table 3. Physico-chemical analysis of mixtures of substrates

Udział odpadu, % wag.	Odczyn	Sucha masa ogólna, g/dm <sup>3</sup>	Sucha masa organiczna, g/dm <sup>3</sup>	Sucha masa mineralna, g/dm <sup>3</sup>	Czas ssania kapilarnego, s
0	7,9	42,69	30,39	12,29	93
2	7,8	43,46	30,61	12,84	93
3	7,1	42,72	30,72	12,00	95
5	6,9	40,73	28,84	11,89	96
10	7,0	40,53	28,90	11,63	95
15	7,0	37,31	26,05	11,26	96

Tabela. 4 Charakterystyka fizykochemiczna cieczy nadosadowej

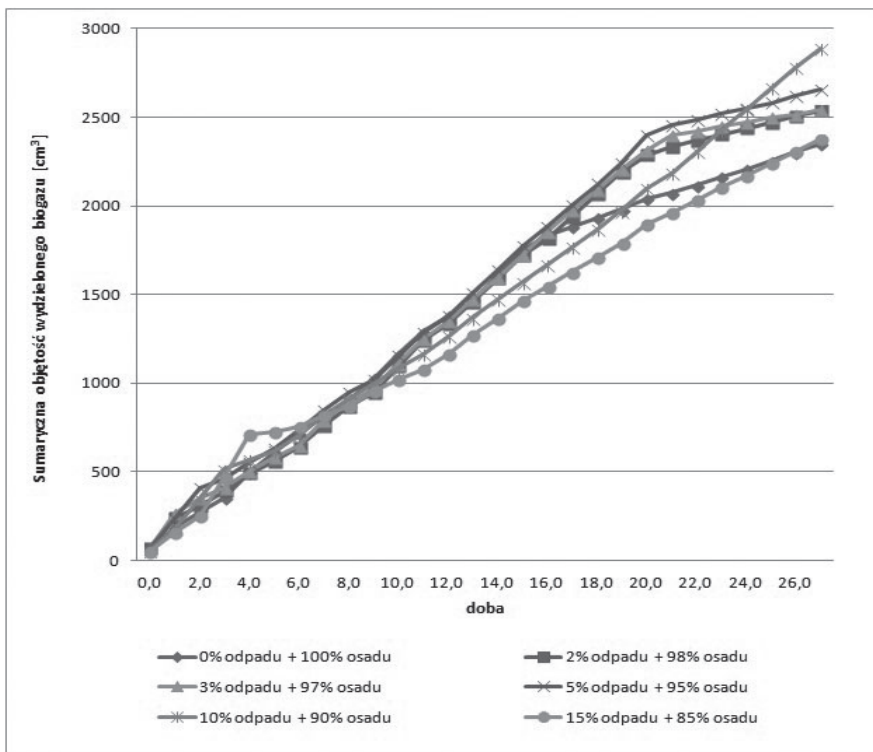
Table 4. Physico-chemical analysis of liquid sludge

Udział odpadu, % wag.	ChZT, mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	LKT, mg CH <sub>3</sub> COOH/dm <sup>3</sup>	Z, mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	LKT/Z	Azot amonowy, mg NH <sub>4</sub> /dm <sup>3</sup>
0	403,5	18	424,0	0,04	46,51
2	4 576,0	21	458,0	0,05	48,84
3	5 824,0	25	470,5	0,05	60,47
5	29 120,0	20	480,5	0,04	65,12
10	37 440,0	29	550,0	0,05	65,12
15	41 600,0	31	613,0	0,05	67,44

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Efektywność procesu współfermentacji

Ważnym wskaźnikiem określającym efektywność procesu jest ilość oraz skład wyprodukowanego biogazu. Badania dowiodły, że proces współfermentacji wpłynął korzystnie na sumaryczną objętość wyprodukowanego biogazu (Rys. 1). Największy uzysk biogazu zaobserwowano w próbie z 10% udziałem odpadu. W porównaniu do próby kontrolnej ilość biogazu powstała w tej próbie była większa o 20%. W próbie kontrolnej zanotowano najniższą objętość wyprodukowanego biogazu. Zauważono również, że w mieszaninie która w swym składzie zawierała 15% kosubstratu osiągnięto podobną produkcję biogazu co w próbie kontrolnej. Wywnioskowano zatem, że taki udział produktu ubocznego w mieszaninie wpływa hamująco na rozkład substancji organicznych, a w konsekwencji na produkcję biogazu. Obliczono również jednostkową produkcję biogazu w oparciu o ilość suchej masy organicznej doprowadzonej do reaktorów oraz zmierzono skład biogazu (Tab. 5).



Rys. 1 Wpływ kosubstratu na sumę wydzielanego biogazu  
 Fig 1. The influence of co-substrate on the amount of emitted biogas

Tabela. 5 Charakterystyka fizykochemiczna mieszanin substratów  
 Table 5. Physico-chemical analysis of mixtures of substrates

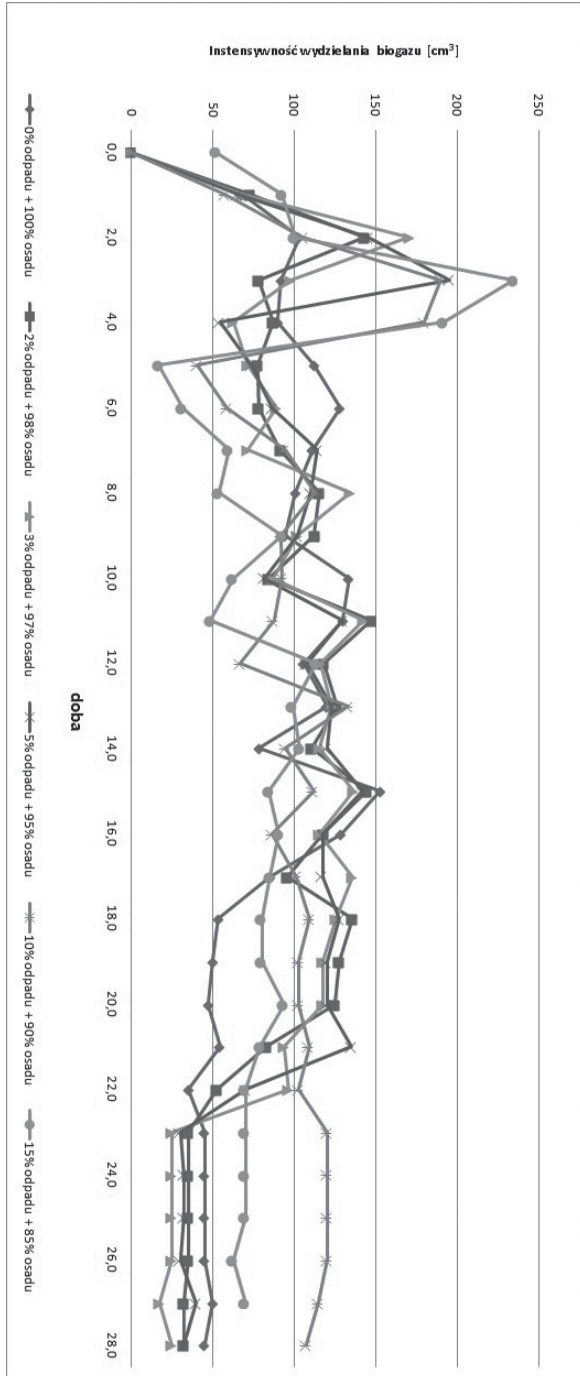
Zawartość odpadu w mieszaninie, %	Jednostkowa produkcja biogazu, $\text{cm}^3/\text{g s.m.o}$	Skład biogazu	
		$\text{CH}_4$	$\text{CO}_2$
0	80,13	62 - 65%	25 - 36%
2	82,90	69 - 71%	27 - 37%
3	85,29	69 - 72%	25 - 36%
5	94,92	70 - 72%	24 - 34%
10	99,91	67 - 72%	26 - 33%
15	91,17	68 - 70%	25 - 36%

Wyniki w tabeli 5 wskazują, że jednostkowa produkcja biogazu była najwyższa w próbie z 10% udziałem odpadu. Wspólna fermentacja osadów ściekowych z dodatkowym substratem wpłynęła pozytywnie na ilość metanu w biogazie, która osiągała wartość 67-72% w kolejnych próbach, natomiast w próbie kontrolnej udział metanu wynosił 65%. Analizując sumaryczną ilość wyprodukowanego biogazu oraz jednostkową produkcję biogazu można zaobserwować, że 10% udział odpadu w ogólnej masie próby jest wartością graniczną. Wyższy udział wpływa negatywnie na efektywność procesu współfermentacji.

Analizując wykres intensywności wydzielanego biogazu (Rys. 2) zaobserwowano intensywny rozkład substancji organicznych w pierwszych dwóch dobach procesu. Objawiło się to wzmoczoną produkcją biogazu. W kolejnych dobach produkcja biogazu była ustabilizowana i wynosiła od 50 do 150 cm<sup>3</sup> dla każdej z prób. W 18 dobie nastąpiło obniżenie produkcji biogazu dla próby kontrolnej. Dla pozostałych prób intensywność produkcji biogazu zmalała w 22 dobie. Należy jednak zwrócić uwagę na stabilną produkcję biogazu podczas przebiegu całego procesu współfermentacji w próbie z 10% udziałem odpadu. Dodatkowo w końcowej fazie procesu intensywność produkcji biogazu nie zmniejszyła się, w związku z czym czas procesu fermentacji w tej próbie można byłoby wydłużyć dla uzyskania większej ilości biogazu. Efektywność procesu współfermentacji oceniano również na podstawie stopnia przefermentowania osadu oraz obniżenia wartości wskaźnika ChZT. Charakterystykę fizykochemiczną mieszanin substratów oraz cieczy nadosadowej po procesie współfermentacji przedstawiono w tabelach 6 i 7.

*Tabela. 6 Charakterystyka fizykochemiczna mieszanin substratów po procesie współfermentacji*  
*Table 6. Physico-chemical analysis of mixtures of substrates after co-digestion*

Udział odpadu, % wag.	Odczyn	Sucha masa ogólna, g/dm <sup>3</sup>	Sucha masa organiczna, g/dm <sup>3</sup>	Sucha masa mineralna, g/dm <sup>3</sup>	Czas ssania kapilarnego, s
0	8,1	32,13	19,78	12,36	196
2	8,0	32,54	20,12	12,42	288
3	8,2	32,31	20,09	12,23	284
5	8,0	30,81	19,38	11,43	229
10	8,1	27,41	17,08	10,32	188
15	7,9	28,41	18,37	10,04	289



Rys. 2. Intensywność wydzielenia biogazu  
Fig 2. Intensity of biogas production



Tabela 7. Charakterystyka fizykochemiczna cieczy nadosadowej po procesie współfermentacji  
Table 7. Physico-chemical analysis of liquid sludge after co-digestion

Udział odpadu, % wag.	ChZT, mgO <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	LKT, mg CH <sub>3</sub> COOH/dm <sup>3</sup>	Z, mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	LKT/Z	Azot amonowy, mg NH <sub>4</sub> /dm <sup>3</sup>
0	83,2	50	305,0	0,16	534,88
2	1 705,6	62	387,5	0,16	581,40
3	1 913,6	66	320,0	0,21	581,40
5	1 996,8	75	400,0	0,19	581,40
10	2 371,2	91	360,0	0,25	604,65
15	3 619,2	122	310,0	0,39	627,91

Na podstawie oznaczenia suchej masy ogólnej oraz suchej masy mineralnej osadu obliczono stopień przefermentowania osadu (Tab. 8).

Tabela 8. Wpływ procentowego udziału odpadów na stopień przefermentowania osadu  
Table 8. The influence of the percentage waste to degree of digested sludge

Zawartość odpadu w mieszaninie, %	0	2	3	5	10	15
Stopień przefermentowania osadu, %	34,93	34,28	34,62	32,81	40,88	29,47

Porównując otrzymane dane z próbą kontrolną zaobserwowano, że dodatek kosubstratu nie wpłynął negatywnie na stopień przefermentowania osadu. W próbie z 10% dodatkiem odpadu zaobserwowano wzrost stopnia przefermentowania osadu w stosunku do próby kontrolnej. Natomiast w ostatniej próbie z 15% udziałem odpadu stopień przefermentowania osadu nieznacznie się obniżył. Analizując wartości ChZT przed oraz po procesie fermentacji obliczono także ubytek substancji organicznych w cieczy nadosadowej (Tab. 9).

Po procesie współfermentacji wartość wskaźnika ChZT uległa znacznemu obniżeniu. Największe obniżenie odnotowano w próbie z 10% udziałem odpadu. Kosubstrat użyty do procesu współfermentacji charakteryzował się dużą wartością ChZT (54496 mgO<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>). Dlatego pomimo znacznego obniżenia wartości tego wskaźnika w kolejnych próbach, wartość ChZT była nadal wysoka (Tab. 7). Oznacza to, że szczególnie w przypadku próby z 10% udziałem odpadu wskazane byłoby wydłużenie czasu fermentacji z uwagi na możliwość uzyskania jeszcze większej ilości biogazu oraz lepszej efektywności obniżenia ChZT w cieczy nadosadowej.

Tabela. 9. Wpływ zawartości odpadu na obniżenie wartości wskaźnika ChZT w cieczy nadosadowej po procesie fermentacji

Table 9. The influence of waste to reduce the COD value in the supernatant liquid after fermentation process

Zawartość odpadu w mieszaninie, %	Redukcja wartości wskaźnika ChZT, %
0	79,38
2	62,73
3	67,14
5	93,14
10	93,67
15	91,30

Duży wpływ na przebieg procesu fermentacji ma również ilość azotu amonowego w cieczy nadosadowej. Zbyt duża jego zawartość w komorze fermentacyjnej może wpływać inhibującą lub toksycznie na mikroorganizmy. Według doniesień literaturowych zakres stężeń azotu amonowego w cieczy nadosadowej powinien wynosić 500-1500 gN/m<sup>3</sup>, średnie stężenie to 900 gN/m<sup>3</sup> [12]. Otrzymane wyniki (Tab. 7) wskazują na wzrost stężenia azotu amonowego w mieszaninach pofermentacyjnych. Zwiększenie ilości azotu amonowego nie wpłynęło jednak hamująco na proces fermentacji ponieważ otrzymane wyniki mieściły się w dopuszczalnym zakresie stężeń.

### 3.2. Zmiany stosunku LKT/Z

W ramach kontroli procesu współfermentacji analizowano zmiany zasadowości (Z), ilości lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) oraz ilorazu LKT/Z. W trakcie procesu obserwowano sukcesywny wzrost ilości LKT w kolejnych próbach wynoszący od 50 (próba kontrolna) do 122 mg/dm<sup>3</sup> (Tab. 7). Stosunek LKT/Z według doniesień literaturowych powinien kształtować się w zakresie od 0,2 do 0,6 [11]. Inni badacze uważają, że graniczna wartość to 0,5 [12], 0,4 [9] oraz 0,3 [16]. W prezentowanych badaniach, biorąc pod uwagę stopień przefermentowania mieszaniny osadu i kosubstratu oraz ilość uzyskanego biogazu, za graniczną wartość ilorazu LKT/Z uznano 0,3. Zgodnie z tym założeniem korzystny stosunek LKT/Z występował w przypadku wszystkich prób przed procesem fermentacji. Natomiast po procesie odnotowano korzystny stosunek LKT/Z we wszystkich próbach poza mieszaniną z 15% udziałem odpadu. W tym wypadku iloraz LKT/Z wyniósł 0,39 (Tab. 7) i przekroczył wartość, która wskazywałaby na prawidłowy przebieg fermentacji.

### 3.2. Zmiany stosunku LKT/Z

Porównując ze sobą wartości czasu ssania kapilarnego (CSK) w poszczególnych próbach przed procesem fermentacji zaobserwowano, że dodatek kosubstratu nieznacznie wpłynął na właściwości filtracyjne osadu (Tab. 3). W próbie kontrolnej wartość CSK wynosiła 93 s, natomiast w kolejnych próbach 93-96 s. Porównując wartości CSK przed oraz po procesie współfermentacji zauważono, że właściwości filtracyjne osadu pogorszyły się. Czas ssania kapilarnego zmierzony po procesie współfermentacji wynosił 188-289 s. W stosunku do próby z samym osadem nadmiernym również odnotowano wydłużony czas ssania kapilarnego w każdej z prób, z wyjątkiem mieszaniny z 10% udziałem odpadu. W tym wypadku wartość CSK zmniejszyła się. Jest to bezpośrednio związane z wysokim stopniem przefermentowania osadu w tej próbie, co skutkuje lepszą jego odwadnialnością.

## 4. Wnioski

Coraz ważniejszą alternatywą dla nieodnawialnych źródeł energii, takich jak węgiel kamienny, gaz ziemny czy ropa naftowa stają się źródła energii odnawialnej. Z uwagi na znaczną wartość energetyczną biogazu powstającego w oczyszczalniach ścieków, w wyniku procesu fermentacji, obecnie powszechnie zaczyna się wykorzystywać biogaz do produkcji ciepła i energii elektrycznej. Dobrym sposobem intensyfikacji produkcji biogazu jest współfermentacja osadów ściekowych z innymi organicznymi produktami odpadowymi (kosubstratami) [8]. Takim produktem okazuje się także odpad po produkcji biodiesla. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie najkorzystniejszego wagiowego udziału procentowego dodawanego odpadu w mieszaninie z osadem ściekowym. Największy uzysk biogazu otrzymano w próbie z 10% udziałem odpadu. Sumaryczna ilość wyprodukowanego biogazu była o 20% większa niż w próbie kontrolnej. Dodany kosubstrat miał również pozytywny wpływ na skład biogazu w tej próbie. Ilość metanu w biogazie mieściła się w zakresie 67-72%, podczas gdy w próbie kontrolnej odnotowano 62-65% udział metanu w biogazie. W związku ze stabilną produkcją biogazu w próbie z 10% udziałem odpadu można dla tej mieszaniny zaproponować wydłużenie czasu fermentacji z korzyścią dla ilości wyprodukowanego biogazu. Dłuższy czas współfermentacji pozwoliłby również na większe obniżenie wskaźnika ChZT w cieczy nadosadowej, którego wartość ze względu na dodawany odpad była wysoka.

W omawianej próbie dodatek kosubstratu nie miał wpływu na stabilność procesu fermentacji. Stosunek LKT/Z przed oraz po procesie współfermentacji mieścił się w zakresie, który świadczy o stabilnym przebiegu procesu. Współfermentacja miała jedynie negatywny wpływ na właściwości filtracyjne mieszaniny. W stosunku do wartości przed procesem wartość CSK wzrosła. Również w stosunku do próby z samym osadem odnotowano wyższą wartość CSK. Jedynie w próbie z 10% udziałem kosubstratu ze względu na wysoki stopień przefermentowania osadu czas ssania kapilarnego był mniejszy niż w próbie kontrolnej. Wynika to z faktu, że dobrze ustabilizowany osad charakteryzuje się lepszą odwadnialnością.

## Bibliografia

- 1) Álvarez, J.A. Otero, L. Lema, J.M. A methodology for optimising feed composition for anaerobic codigestion of agroindustrial waste. , 2010, 101, 1153-1158
- 2) Amon, Th. Amon, B. Kryvoruchko, V. Bodirosa, V. Pötsch, E. Zolitsch, W. Optimizing methane yield from anaerobic digestion of manure: Effects of dairy systems and of glycerine supplementation. International Congress Series, 2006, 1293, 217-220
- 3) Białecka-Florjańczyk, E. Stolarzewicz, I. Kucharski, D. Mikrobiologiczne metody otrzymywania biodiesla, *Biotechnologia*, 2009, 4, 74-78
- 4) Bohdziewicz, J. Kuglarz, M. Kofermentacja produktów ubocznych z produkcji biopaliw i osadów ściekowych w warunkach statycznych, Polska inżynieria środowiska. Prace pod red. Dudzińskiej M.R., Pawłowskiego A., Monografie „IV Kongres Inżynierii Środowiska” tom 2, Polska Akademia Nauk. Komitet Inżynierii Środowiska, Lublin, 2012, 83-92
- 5) Bohdziewicz, J. Kuglarz, M. Grübel, K. Proces kofermentacji produktów ubocznych generowanych podczas wytwarzania biodiesla oraz efektywnego oczyszczania powstałych cieczy pofermentacyjnych. Central European Conference ECOpole'14, dokument elektroniczny, Jarnołtówek, 2014, 13-14
- 6) Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE
- 7) Heidrich, Z. Nieścier, A. Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych, Monografie. Seria: Wodociągi i kanalizacja nr 4, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Warszawa 1999
- 8) Kalemba, K. Barbusiński, K. Współfermentacja jako metoda intensyfikacji produkcji biogazu. Inżynieria Środowiska - młodym okiem, 2016, 20 – w druku
- 9) Lebiocka, M. Pawłowski, A. Biometanizacja metodą zrównoważonej utylizacji odpadów. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 2009, 11, 1257-1266
- 10) López, J.A.S. Santos, M.Á.M. Pérez, A.F.C. Martín, A.M. Anaerobic digestion of glycerol derived from biodiesel manufacturing. *Bioresource Technology*, 2009, 100, 5609-5615
- 11) Luste, S. Luostarinen, S. Anaerobic co-digestion of meat-processing by products and sewage sludge – Effect of higienization and organic loading rate. *Bioresource Technology*, 2010, 101, 2657-2664
- 12) Montusiewicz, A. Współfermentacja osadów ściekowych i wybranych kosubstratów jako metoda efektywnej biometanizacji. Monografie vol. 98, Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Środowiska
- 13) Pilarski, K. Dach, J. Mioduszevska, N. Porównanie wydajności produkcji metanu z gnojowicy świńskiej i bydłowej z dodatkiem gliceryny rafinowanej. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 2010, 55, 78-81
- 14) Sulewski, M. Urbaniak, W. Traczykowski, A. Budzińska, K. Peter, E. Fermentacja metanowa jako sposób zagospodarowania frakcji glicerynowej, będącej produktem ubocznym produkcji biopaliwa z olejów roślinnych, *Przemysł Chemiczny*, 2014, 12, 2142-2145

- 15) Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne (Opracowano na podstawie: Dz. U. z 2012 r. poz. 1059, z 2013 r. poz. 984, 1238, z 2014 r. poz. 457, 490, 900, 942, 1101, 1662, z 2015 r. poz. 151, 478, 942, 1618, 1893, 1960, 2365, z 2016 r. poz. 266)
- 16) Zawieja, I. Bień, J. Worwąg, M. Pozyskiwanie lotnych kwasów tłuszczowych w procesie stabilizacji beztlenowej osadów pochodzących z przemysłu spożywczego. Proceeding of ECOpole, 2010, 4 (2) 529-534
- 17) Zielewicz, E. Tytła, M. Wpływ charakterystyki komunalnych osadów ściekowych na efekty kofermentacji z serwatką, Zeszyty Naukowe. Inżynieria Środowiska. Uniwersytet Zielonogórski, 2012, 142 (25) 65-75

Część przedstawionych wyników została wykorzystana w referacie zaprezentowanym na konferencji „Inżynieria Środowiska - Młodym Okiem”, Białystok 2016

