

BADANIA SYMULACYJNE PROCESU FERMENTACJI W UKŁADZIE KOMORY PSYCHROFILNEJ I KOMORY MEZOFILNEJ W ODNIESIENIU DO ILOŚCI WYTWARZANEGO BIOGAZU

Dariusz Zdebik¹, Marcin Głodniok¹, Paweł Zawartka¹

¹ Pracownia Technologii Wody i Ścieków, Zakład Ochrony Wód, Główny Instytut Górnictwa w Katowicach, Plac Gwarków 1, 40-166 Katowice, e-mail: dzdebik@gig.eu

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono problematykę dotyczącą modelowania stabilizacji beztlenowej osadu czynnego wraz z dodatkowym substratem (ścieki dowożone, mleczarskie, rzeźnicze) w warunkach fermentacji psychrofilnej w zakresie 10–20 °C oraz mezofilnej w temperaturze 35 °C. Badanie symulacyjne przeprowadzono w układzie ciągu dwóch komór fermentacyjnych. Wyniki badań pozwoliły na ocenę skuteczności prowadzenia tych procesów w oddzielnych komorach tj. komorze psychrofilnej i komorze mezofilnej. W badaniach symulacyjnych wskazano na warunki uzyskiwania lotnych kwasów tłuszczowych oraz biogazu w powiązaniu z warunkami pracy komór.

Słowa kluczowe: model stabilizacji beztlenowej, ścieki dowożone, ścieki mleczarskie, ścieki rzeźnicze, komora psychrofilna, komora mezofilna.

ANAEROBIC DIGESTION MODEL ANALYSIS OF THE FERMENTATION PROCESS IN PSYCHROPHILIC AND MESOPHILIC CHAMBER IN ACCORDANCE WITH THE AMOUNT OF BIOGAS SOURCED

ABSTRACT

The paper presents problems concerning the modelling of anaerobic sludge stabilization, with the additional substrate (waste transported, dairy butchery sewage) in psychrophilic fermentation conditions in the range 10–20 °C and mesophilic at 35 °C. Simulation test was conducted in the two digesters. Results of the study allowed to evaluate the effectiveness of conducting these processes in separate chambers, i.e. the psychrophilic and mesophilic chamber. During the simulations, terms of obtaining volatile fatty acids and biogas in conjunction with the operating conditions of the chambers indicated.

Keywords: anaerobic digestion model, waste transported, dairy wastewater, slaughterhouse waste, psychrophilic chamber, mesophilic chamber.

WSTĘP

Fermentacja beztlenowa osadów polega na biochemicznym przekształcaniu związków organicznych o różnym stopniu utlenienia do mieszaniny gazów z silną dominacją metanu i dwutlenku węgla, realizowaną przez złożoną mikroflorę bakteryjną. Podstawowym warunkiem prawidłowego przekształcania substancji organicznych zawartych w osadach i ściekach – w uproszczonym opisie – jest równowaga pomiędzy ilością substratów, a liczbą bakterii, głównie metanogennych. W pro-

cesie rozkładu związków organicznych możemy wyróżnić 4 główne fazy [Rybicki, 2013]:

- I faza – hydroliza substancji wielkocząsteczkowych,
- II faza – acidogeneza,
- III faza – acetogeneza,
- IV faza – metanogeneza.

O ilości i rodzaju otrzymywanych produktów, decyduje skład chemiczny związków organicznych rozkładanych w warunkach beztlenowych, przy współdziałaniu mikroorganizmów,

oraz czas i temperatura prowadzenia danej fazy. Różne gatunki bakterii wyspecjalizowały się w wytwarzaniu metanu z różnych substratów, przy czym niektóre z nich wykorzystują substraty do wzrostu i reprodukcji – zarówno jako źródło energii i jako jedyne źródło węgla, natomiast większość bakterii metanogennych wykorzystuje do budowy komórki wodor cząsteczkowy H_2 oraz CO_2 jako jedyne źródło węgla [Rybicki, 2013].

Przemiany związków organicznych w procesie fermentacji z uwzględnieniem procentowego udziału substratów i produktów procesów biochemicznych obrazuje rysunek 1.

Procesy fermentacji metanowej można podzielić na następujące typy:

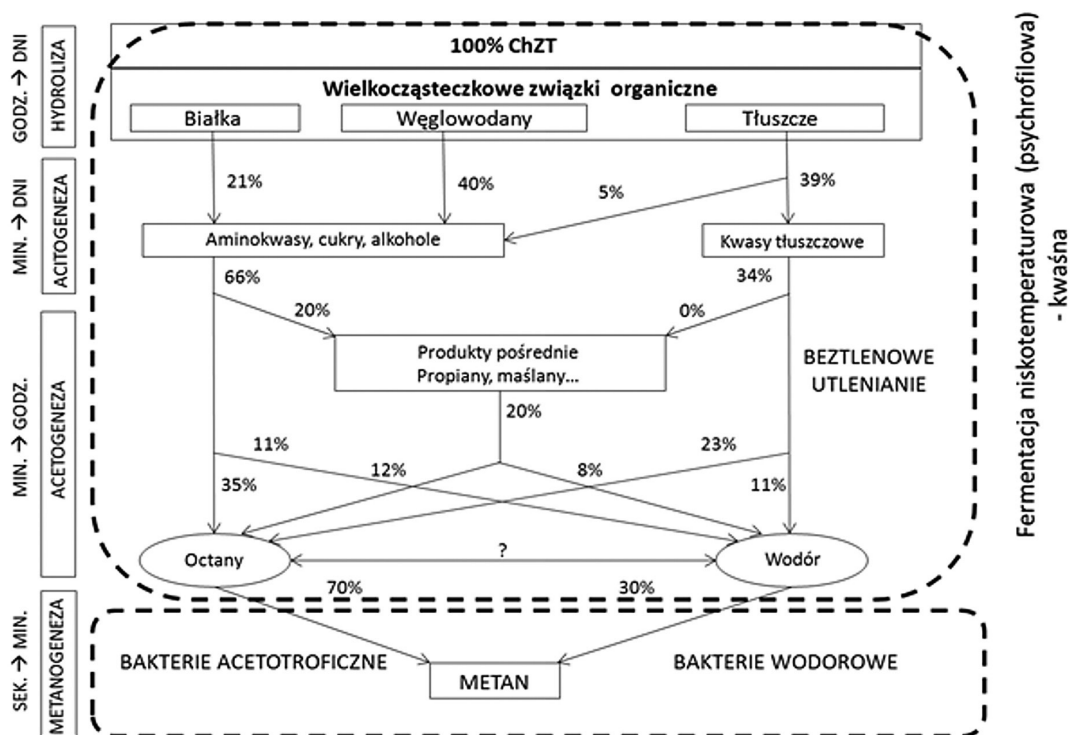
- psychrofilna – zachodzi w temperaturze otoczenia (pon. 20 °C), i trwa min. 70–80 dni. Powstający biogaz nie jest ujmowany. Proces może być prowadzony w osadniku gnilnym, osadniku Imhoffa, czy też otwartych basenach fermentacyjnych.
- mezofilna – zachodzi w temp. 30–40 °C i trwa od 25 do 35 dni (przeważnie 37±2 °C). Proces prowadzony jest w zamkniętych wydzielonych komorach fermentacyjnych (tzw. WKFz). Powstający biogaz jest ujmowany i wykorzystywany do pozyskania energii cieplnej i elektrycznej.

- termofilna – zachodzi w temp. pow. 40 °C i trwa od 15 do 20 dni (dla temp. 50 °C od 12 do 14 dni). Proces prowadzony jest w komorach fermentacyjnych, a ujmowany biogaz nie pokrywa zapotrzebowania na energię cieplną potrzebną do ogrzania urządzeń.

Procesy fermentacji mezofilnej stosowane są głównie w dużych oczyszczalniach ścieków dla mieszaniny osadu wstępnego z osadem nadmiernym. W celu uzyskiwania lotnych kwasów tłuszczowych prowadzona jest hydroliza osadu wstępnego w warunkach fermentacji psychrofilnej. Niekiedy stosowana jest także hydroliza osadu nadmiernego, jednak w większości przypadków osad nadmierny zagęszczany jest mechanicznie. Fermentacja termofilna w warunkach polskich, w oczyszczalniach ścieków, jest rzadko stosowana, ze względu na konieczność dostarczenia dużych ilości energii do ogrzania komór.

W Polsce w oczyszczalniach komunalnych, najczęściej stosowanym procesem jest fermentacja mezofilowa prowadzona zazwyczaj w zamkniętych wydzielonych komorach o pojemności od 1000 do 5000 m³ [Wójtowicz, 2013].

Procesy fermentacji metanowej w oczyszczalniach komunalnych prowadzone są głównie w układach jednostopniowych, tj. w ogrzewanych komorach fermentacyjnych, gdzie tempe-



Rys. 1. Przemiany związków organicznych w procesie fermentacji [Rybicki, 2013; Łomotowski J., 1999]
 Fig. 1. Transformation of organic compounds in the fermentation process [Rybicki, 2013; Łomotowski J., 1999]

ratura utrzymywana jest na poziomie 35–38 °C [Dymaczewski, 2011].

W literaturze spotykane są opisy [Dymaczewski, 2011; Wiechecki, 2007] procesów fermentacji w układach wielostopniowych. Stosowane są układy z fermentacją kwaśną (2–3 dni) poprzedzającą fermentację metanową. Stosowanie fermentacji kwaśnej ma na celu zwiększenie hydrolizy osadu czynnego oraz unieszkodliwienie organizmów pianotwórczych. W badaniach prowadzonych przez Puchajdę i inni [Puchajda, 2006] wykazano, że uzyskanie stężenia LKT pow. 7 000 mg/l, powala na zabicie organizmów chorobotwórczych.

W celu poprawy jakości osadu stosowane są układy wielostopniowe, w których następuje obniżenie suchej masy organicznej, zwiększenie odwadnialności przy zmniejszeniu zużycia polimerów oraz zwiększeniu stopnia unieszkodliwiania organizmów chorobotwórczych [Dymaczewski, 2011].

Ścieki (ciekłe odpady) dowożone do oczyszczalni ścieków charakteryzują się wysokim ładunkiem zanieczyszczeń, a wprowadzanie ich bezpośrednio do strumienia ścieków dopływających, poprzez punkt zlewny, powoduje istotne, długotrwałe zakłócenie biologicznych procesów oczyszczania ścieków. Wprowadzenie ich do oddzielnego węzła fermentacji i skierowanie bezpośrednio do procesu fermentacji pozwoli na wyeliminowanie zakłóceń w części biologicznej oczyszczalni i pozwoli na unieszkodliwienie ich bezpośrednio w węzle fermentacji osadów.

W pracach tych nie badano wpływu wprowadzania dodatkowych ścieków o wysokim ładunku związków organicznych występujących np. w ściekach dowożonych, rzeźniczych, czy też mleczarskich, na procesy psychrofilne i mezofilne. Zbudowany dwustopniowy model ciągu pracujących po sobie komór psychrofilnej (do której wprowadzano dodatkowy substrat) i mezofilnej został wykonany, a następnie poddany symulacjom dynamicznym.

CEL BADAŃ

Celem badań symulacyjnych było przeprowadzenie modelowania pracy układu dwustopniowego komór, w których prowadzono fermentację mieszaniny osadu wstępnego i nadmiernego z dodatkowym substratem w warunkach fermentacji kwaśnej (czas fermentacji ok. 3 dni) i w warunkach fermentacji mezofilnej (czas fermentacji ok. 33 dni). Symulacje dynamiczne

prowadzono z wykorzystaniem biokinetycznego modelu osadu czynnego AS/AD. Celem symulacji było zbadanie wpływu pracy nowego układu w warunkach fermentacji kwaśnej (psychrofilnej) i metanowej (mezofilnej) na rozkład osadu nadmiernego wraz z dodatkowymi substratami oraz ilość pozyskiwanego biogazu.

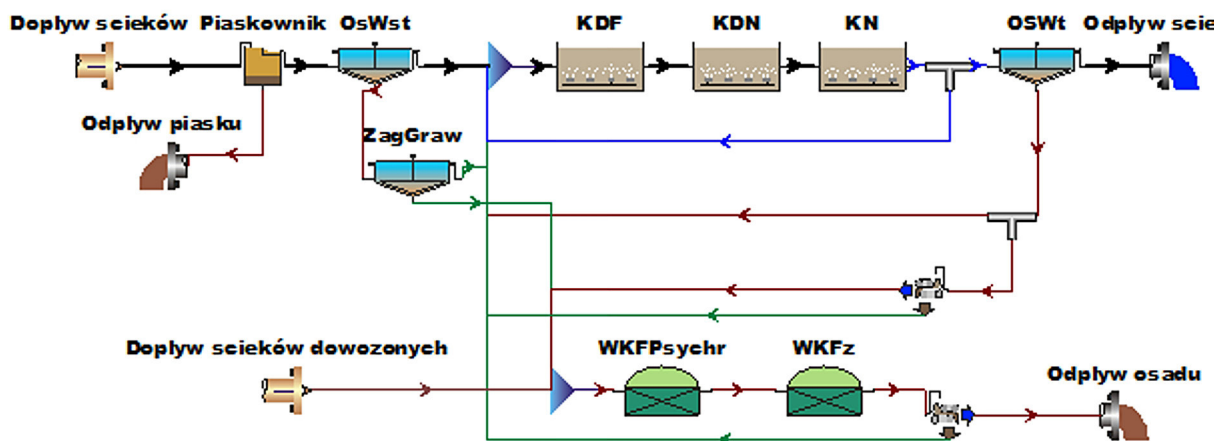
W czasie symulacji wprowadzono różne substraty (ścieki dowożone, mleczarskie, rzeźnicze), charakteryzujące się wysokim ładunkiem zanieczyszczeń, a następnie analizowano uzyskane wyniki modelu oraz ilość powstającego biogazu. Otrzymane wyniki porównywano ze skalibrowanym modelem, dla jednostopniowego układu fermentacji mieszaniny osadu.

MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Badanie procesu fermentacji psychrofilnej i mezofilnej przeprowadzono na modelu komputerowym oczyszczalni ścieków pracującej w technologii przepływowej. Model oczyszczalni z badanym węzłem fermentacji psychrofilnej i mezofilnej, przedstawiono na rysunku 2.

Wielkość dopływu oraz stężenia zanieczyszczeń dla ścieków surowych określono w elemencie „Dopływ ścieków”. Dla kolejnych obiektów, piaskownika (Piaskownik), osadnika wstępnego (OsWst) określono wymiary, warunki odprowadzenia ścieków oraz osadów (Odpływ piasku). Z osadnika wstępnego osad wstępny skierowano do zagęszczacza grawitacyjnego (ZagGraw), a następnie do mieszacza osadu wstępnego i biologicznego (nadmiernego). W części biologicznej oczyszczalni zwymiarowano komorę defosfatacji (KDF), komorę denitryfikacji (KDN) i nitryfikacji (KN) oraz osadnik wtórny (OsWt). Z osadnika wtórnego ścieki oczyszczone skierowano do odpływu (Odpływ ście) a osad czynny zawrócono do recyrkulacji. Nadmiar osadu skierowano do zagęszczacza mechanicznego (ZagMech). Zagęszczony osad nadmierny skierowano do mieszacza osadu wstępnego i biologicznego. Mieszaninę osadów skierowano do komory psychrofilnej (WKFPsychr), następnie do komory mezofilnej (WKFz). Osad przefermentowany poddano odwodnieniu w prasie (PrasaTaśm). Odcieki z zagęszczacza grawitacyjnego, mechanicznego i prasy taśmowej zawrócono przed komorę defosfatacji.

Badania warunków fermentacji psychrofilnej i mezofilnej prowadzono w dwóch komorach: WKFPsychr (komora fermentacji psychrofilnej



Rys. 2. Model oczyszczalni z komorą psychrofilną (WKFPsych) i mezofilną (WKFZ) w węzle osadowym
Fig. 2. The wastewater treatment plant model with psychrophilic (WKFPsych) and mesophilic (WKFZ) chamber in the sludge node

w zakresie temperatur 10–20 °C) i WKFz (komora mezofilna o temperaturze 35 °C). Do komory WKFPsychr, wprowadzany był strumień osadu nadmiernego i wstępnego oraz dodatkowy strumień ścieków, o wysokim ładunku zanieczyszczeń organicznych (ładunek zanieczyszczeń był zależny od źródła pochodzenia ścieków). Mieszanina osadu i ścieków po komorze WKFPsychr wraz z cieczą nadosadową została skierowana do WKFz gdzie prowadzono proces fermentacji metanowej.

Badanie procesu fermentacji psychrofilnej i mezofilnej prowadzono przy wykorzystaniu modelu stabilizacji beztlenowej (Anaerobic Digestion Model No. 1 – ADM1), który zastosowano w programie BioWin wer. 2.1 [EnviroSim, 2006]. Model stabilizacji tlenowej w programie jest zdefiniowany i przypisany do elementu „komora stabilizacji beztlenowej”. Proces hydrolizy w komorze beztlenowej prowadzony jest odrębnie na podstawie zdefiniowanych stałych hydrolizy.

Fermentację w komorach prowadzono dla parametrów przedstawionych w tabeli 1.

Do mieszania osadu nadmiernego i wstępnego, w modelu założono dozowanie ścieków dowożonych, rzeźniczych oraz mleczarskich, których charakterystykę przedstawiono w tabeli 2.

Symulacje dynamiczne procesu fermentacji psychrofilnej prowadzono w zakresie temperatur 10–20 °C. Pojemność komory psychrofilnej dobrano na podstawie przeprowadzonego rezeznania literaturowego, z którego wynika, że optymalny czas fermentacji osadu czynnego recyrkulowanego w warunkach psychrofilnych powinien wynosić od 4 do 6 dob [Żeglin-Kurbiel K., 2009, Jönsson K. and Jansen J. la C., 2006]. Dla dopływu

wu osadu w ilości 150 m³/d, pojemność komory określono na 500 m³, co daje czas zatrzymania na poziomie 3,3 dnia. Dopływ osadu i ścieków przyjęto jako ciągły równomierny przez całą dobę.

Początkowo wykonano symulację przez 28 dni, jednak od 14 dnia nie uzyskiwano zmian w komorze psychrofilnej i mezofilnej w związku z czym czas symulacji ograniczono do 14 dni. W czasie prowadzenia symulacji rejestrowano zmiany w zakresie wybranych wskaźników zanieczyszczeń (m.in. zawiesina ogólna, organiczna, LKT, ChZT, azot amonowy, fosfor ogólny, odczyn) oraz parametry charakteryzujące pracę komory (przepływ całkowity gazu, zawartość metanu, stopień rozkładu zawiesiny organicznej).

Tabela 1. Parametry charakteryzujące urządzenia oraz proces fermentacji

Tabela 1. The parameters characterizing the device and the fermentation process

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Dopływ osadu:	–	stały
Ilość osadu zmieszanego w dopływie do komór:	m ³ /d	140
Ilość ścieków dodatkowych	m ³	10
Pojemność komory psychrofilnej (WKFPsychr)	m ³	500
Temperatura w komorze psychrofilnej (WKFPsychr)	°C	od 10 do 20
Czas zatrzymania w komorze psychrofilnej (WKFPsychr)	dni	3,3
Pojemność komory mezofilnej (WKFz)	m ³	5000
Temperatura w komorze mezofilnej (WKFz)	°C	35
Czas zatrzymania w komorze mezofilnej (WKFz)	dni	33,3

Tabela 2. Wskaźniki zanieczyszczeń w ściekach dowożonych, rzeźniczych oraz mleczarskich**Tabela 2.** Indicators of pollutants in waste transported, dairy and butchery sewage

Wskaźnik	Jednostka	Ścieki dowożone [Dymaczewski Z., 2011]		Ścieki rzeźnicze [Soroko M., 2003,]		Ścieki mleczarskie [Ruffer H. 1998]	
		zakres stężeń	przyjęto do modelu	zakres stężeń	przyjęto do modelu	zakres stężeń	przyjęto do modelu
Zawiesina ogólna	mg/dm ³	2 500 – 15 000	8 000	340 – 1 580	1 000	150 – 250	250
BZT ₅	mg O ₂ /dm ³	1 000 – 7 000	4 000	510 – 5 100	3 000	2 300 – 5 300	5 200
ChZT	mg O ₂ /dm ³	2 500 – 15 000	8 500	770 – 10 200	4 000	5 300 – 20 600	20 000
Azot ogólny	mg N/dm ³	140 – 15 000	1 000	90 – 1 000	500	90 – 160	150
Fosfor ogólny	mg P/dm ³	40 – 150	60	34 – 112	70	21 – 26	21

WYNIKI BADAŃ I DISKUSJA

Przygotowany model oczyszczalni ścieków został poddany kalibracji i weryfikacji. Podczas kolejnych kroków iteracyjnych w czasie kalibracji, uzyskano zbieżność w zakresie ścieków oczyszczonych, odpływających z oczyszczalni na poziomie od 5 do 15%, natomiast ilość uzyskiwanego biogazu w czasie prowadzonym symulacji komputerowych w komorze fermentacyjnej wyniosła 1449,51 m³/d, a w warunkach rzeczywistych ilość ta wynosiła ok. 1410 m³/d. W czasie procesu kalibracji uzyskano błąd na poziomie 2,8%. Do skalibrowanego modelu w części fermentacji osadu, wprowadzono dodatkową komorę psychrofilną, w której prowadzono fermentację niskotemperaturową mieszaniny osadu wstępnego i nadmiernego z dodatkowym substratem (ściekami o wysokim ładunku zanieczyszczeń). Uzyskane ilości biogazu w dwóch komorach, porównano z wynikami modelu dla jednej komory fermentacyjnej.

W kolejnych tabelach przedstawiono wyniki uzyskane dla układu technologicznego z jedną komorą fermentacyjną (komora mezofilna) oraz wyniki dla układu dwóch komór fermentacyjnych (komora psychrofilna i mezofilna). Symulacje zmian ilości uzyskiwanego biogazu (oraz analizę zmienności wybranych wskaźników zanieczyszczeń) w komorze psychrofilnej przeprowadzono dla temperatury: 10, 12, 14, 16, 18 i 20 °C. W komorze mezofilnej temperatura wynosiła 35 °C. Przy prowadzaniu kolejnych substratów, jako punkt porównania ich wpływu na pracę układu dwóch komór fermentacyjnych, w poszczególnych zakresach temperaturowych, przyjęto sumaryczną ilość produkowanego biogazu.

W tabeli 3 przedstawiono uzyskane wyniki podczas prowadzenia fermentacji jednej i układu dwóch komór przy wprowadzaniu mieszaniny osadu wraz ze ściekami dowożonymi.

W tabeli 4 przedstawiono uzyskane wyniki podczas prowadzenia fermentacji jednej i układu dwóch komór przy wprowadzaniu mieszaniny osadu wraz ze ściekami z mleczarni.

W tabeli 5 przedstawiono uzyskane wyniki podczas prowadzenia fermentacji jednej i układu dwóch komór przy wprowadzaniu mieszaniny osadu wraz ze ściekami rzeźniczymi.

Fermentacja mieszaniny osadu wraz z dodatkowymi substratami powoduje uzyskanie dodatkowej ilości biogazu w komorze psychrofilnej (nowy obiekt w układzie technologicznym) jak i mezofilnej (obiekt istniejący). Największą ilość biogazu uzyskano w przypadku dozowania ścieków mleczarskich, następnie dowożonych. W przypadku ścieków rzeźniczych, odnotowano najmniejszą produkcję biogazu w układzie dwóch komór fermentacyjnych.

Na rysunku 3 przedstawiono ilości biogazu jakie uzyskiwano w komorze psychrofilnej przy współfermentacji osadów oraz dodatkowych substratów.

W każdym przypadku dozowania do mieszaniny osadu nadmiernego i czynnego uzyskiwano dodatkową ilość biogazu w warunkach bardzo niskiej temperatury (np. 10 °C) czy też w przypadku fermentacji ścieków ciepłych. W komorze psychrofilnej największą ilość biogazu, wynoszącą ok. 58 m³/d uzyskano przy współfermentacji ścieków rzeźniczych.

Na rysunku 4 przedstawiono ilość biogazu jaka była uzyskiwana w komorze mezofilnej w temperaturze 35 °C w zależności od wprowadzanego substratu do komory psychrofilnej oraz temperatury w jakiej prowadzony był proces fermentacji kwaśnej.

W warunkach mezofilnych, największą ilość biogazu uzyskano podczas współfermentacji osadu i ścieków mleczarskich. Ilość biogazu jest związana z ładunkiem zawiesiny ogólnej oraz

Tabela 3. Wartości zanieczyszczeń oraz ilości biogazu podczas fermentacji mieszaniny osadu ze ściekami dowożonymi

Tabela 3. The values of pollution and the amount of biogas from the fermentation mixture of sewage sludge with transported waste

Komora fermentacyjna	Temperatura	Zawiesina organiczna mg/l	Zawiesina ogólna mg/l	LKT mg/l	ChZT mg/l	Odczyn pH	Przepływ gazu	
	°C						w komorze m ³	razem m ³
WKFz (układ podstawowy)	35	10 119	18 142	101	15 962	7,07	1 450	1 450
WKFPsychr	10	17 488	23 892	6 217	33 780	5,18	35	1 491
WKFz	35	9 441	17 193	103	14 928	7,04	1 456	
WKFPsychr	12	17 341	23 701	6 396	33 725	5,17	38	1 494
WKFz	35	9 441	17 193	103	14 928	7,04	1 456	
WKFPsychr	14	17 184	23 498	6 585	33 665	5,16	42	1 499
WKFz	35	9 441	17 193	103	14 928	7,04	1 457	
WKFPsychr	16	17 017	23 283	6 784	33 598	5,15	46	1 503
WKFz	35	9 441	17 193	103	14 928	7,04	1 457	
WKFPsychr	18	16 840	23 056	6 994	33 527	5,14	50	1 507
WKFz	35	9 368	17 121	102	14 811	7,03	1 457	
WKFPsychr	20	16 652	22 815	7 215	33 449	5,12	55	1 513
WKFz	35	9 347	17 099	102	14 777	7,03	1 458	

Tabela 4. Wartości zanieczyszczeń oraz ilości biogazu podczas fermentacji mieszaniny osadu ze ściekami z mleczarni

Tabela 4. The values of pollution and the amount of biogas from the fermentation mixture of sludge and sewage from dairy

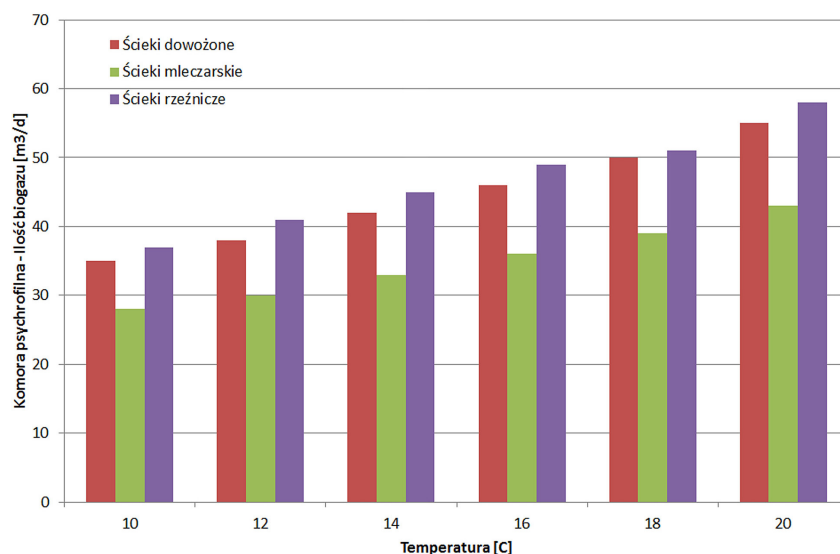
Komora fermentacyjna	Temperatura	Zawiesina organiczna mg/l	Zawiesina ogólna mg/l	LKT mg/l	ChZT mg/l	Odczyn pH	Przepływ gazu	
	°C						w komorze m ³	razem m ³
WKFz (układ podstawowy)	35	10 119	18 142	101	15 962	7,07	1 450	1 450
WKFPsychr	10	17 264	23 382	6 692	33 879	5,12	28	1 498
WKFz	35	9 393	16 884	103	14 846	7,04	1 470	
WKFPsychr	12	17 119	23 196	6 884	33 858	5,11	30	1 501
WKFz	35	9 377	16 868	103	14 821	7,04	1 471	
WKFPsychr	14	16 964	22 998	7 087	33 814	5,1	33	1 505
WKFz	35	9 360	16 852	103	14 794	7,04	1 472	
WKFPsychr	16	16 779	22 788	7 300	33 764	5,09	36	1 509
WKFz	35	9 342	16 834	103	14 765	7,04	1 473	
WKFPsychr	18	16 624	22 566	7 522	33 709	5,08	39	1 514
WKFz	35	9 323	16 815	103	14 734	7,04	1 475	
WKFPsychr	20	16 439	22 330	7 753	33 645	5,07	43	1 519
WKFz	35	9 303	16 795	102	14 701	7,03	1 476	

ładunkiem związków organicznych. Ścieki mleczarskie charakteryzują się niskim ładunkiem zawiesiny ogólnej i bardzo wysokim ładunkiem związków organicznych, przez co można uzyskać w procesie fermentacji kwaśnej LKT, które będą wykorzystane w fermentacji mezofilnej. Na rysunku 5 przedstawiono sumaryczną ilość biogazu ujmowanego w obu komorach fermentacyjnych.

Wzrost ilość biogazu, dla układu dwóch komór, w porównaniu do jednej komory mezofilnej, wyniósł od 2,86% (dla temp. 10 °C) do 4,38% (dla temp. 20 °C) dla ścieków dowożonych oraz od 3,35% (dla temp. 10 °C) do 4,79% (dla temp. 20 °C) dla ścieków mleczarskich. Wzrost ilości biogazu wynikał z dodatkowej ilości LKT generowanych w komorze psychro-

Tabela 5. Wartości zanieczyszczeń oraz ilości biogazu podczas fermentacji mieszaniny osadu ze ściekami rzeźniczymi**Table 5.** The values of pollution and the amount of biogas from the fermentation mixture of sewage sludge with butchery sewage

Komora fermentacyjna	Temperatura °C	Zawiesina organiczna mg/l	Zawiesina ogólna mg/l	LKT mg/l	ChZT mg/l	Odczyn pH	Przepływ gazu	
							w komorze m ³	razem m ³
WKFz (układ podstawowy)	35	10 119	18 142	101	15 962	7,07	1 450	1 450
WKFPsychr	10	17 406	23 567	6 117	33 540	5,20	37	1 447
WKFz	35	9 406	16 904	103	14 864	7,04	1 439	
WKFPsychr	12	17 261	23 376	6 288	33 479	5,19	41	1 480
WKFz	35	9 390	16 888	103	14 837	7,04	1 439	
WKFPsychr	14	17 106	23 174	6 469	33 413	5,17	45	1 485
WKFz	35	9 372	16 870	103	14 809	7,04	1 440	
WKFPsychr	16	16 940	22 959	6 660	33 341	5,16	49	1 489
WKFz	35	9 354	16 852	103	14 779	7,04	1 440	
WKFPsychr	18	16 704	22 678	6 918	33 229	5,14	51	1 491
WKFz	35	9 387	16 865	103	14 832	7,04	1 440	
WKFPsychr	20	16 579	22 493	7 075	33 181	5,14	58	1 499
WKFz	35	9 312	16 810	102	14 712	7,04	1 441	

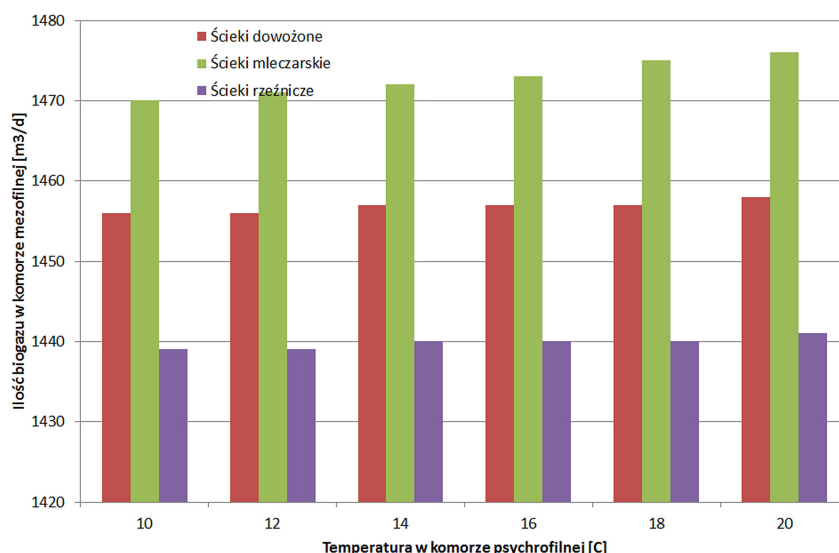
**Rys. 3.** Ilości biogazu uzyskiwane w komorze psychrofilnej w zależności od temperatury prowadzenia procesu fermentacji.**Rys. 3.** The amount of biogas generated in the psychrophilic chamber depending on the temperatures of the fermentation

filnej, który ma związek z ładunkiem zanieczyszczeń wprowadzanym do układu (mieszania osadu oraz dodawanych ścieków) i temperaturą substratu (procesu).

Wprowadzenie ścieków rzeźniczych przyczyniło się do uzyskania dodatkowej ilości biogazu w komorze psychrofilnej, natomiast w komorze mezofilnej ilość wytwarzanego biogazu uległa zmniejszeniu o ok. 0,6%. W ogólnym bilansie dla obu komór, wzrost ilości biogazu w stosunku do

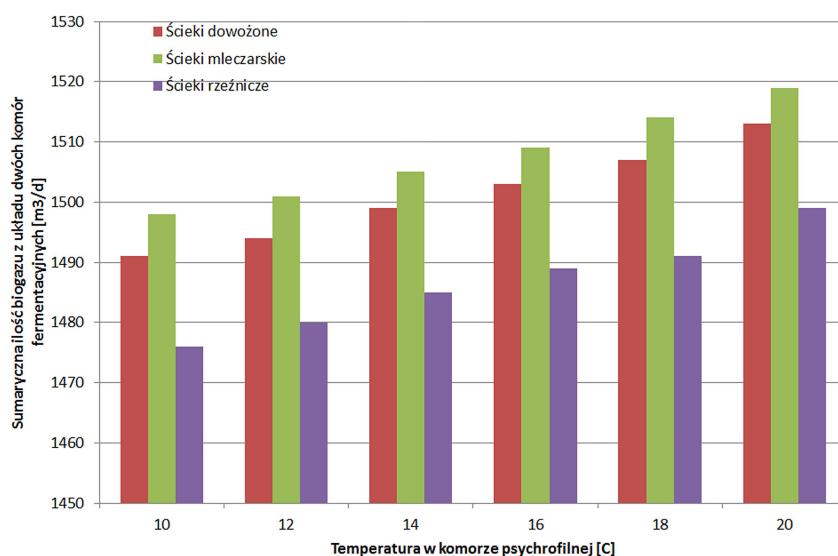
jednej komory mezofilnej wyniósł od 1,83% (dla temp. 10 °C) do 3,41% (dla temp. 20 °C).

W czasie prowadzonych symulacji, odnotowano w komorze psychrofilnej wysokie stężenia LKT w zakresie od 6117 mg/l do 7753 mg/l. Uzyskanie wysokich stężeń LKT w komorze psychrofilnej komorze, powyżej 7000 mg/l pozwala na zabicie organizmów chorobotwórczych, na co wskazują badania prowadzone m.in. przez Puchajda [Puchajda 2006]. Uzyskiwanie wysokich



Rys. 4. Ilość biogazu w komorze mezofilnej w temperaturze 35 °C w zależności od temperatury i wprowadzanego substratu do komory psychrofilnej

Fig. 4. The amount of mesophilic biogas chamber at 35 °C, depending on temperature and substrate introduced into the psychrophilic chamber



Rys. 5. Sumaryczna ilość biogazu ujmowana w komorze psychrofilnej i mezofilnej

Fig. 5. The total amount of biogas recognized in psychrophilic and mesophilic chamber

stężeń LKT w komorze psychrofilnej wiąże się z obniżeniem odczynu w tej komorze do wartości od 5,07 do 5,20.

Zwiększenie w modelu ilości ścieków dowożonych, mleczarskich, czy też rzeźniczych o kolejne 10 m³/d, spowodowało obniżeniem ilości LKT wytwarzanych w komorze psychrofilnej o ok. 5% przy wzroście LKT w komorze mezofilnej o ok. 1%, co ma wpływ na ogólną ilość biogazu uzyskiwanego z obu komór od 3,5 do 7,3%. Spadek uzyskiwanych LKT wynikał ze zwiększenia obciążenia jednostkowego powierzchni fermentera, tj. skrócenia czasu przebywania osadu w tym obiekcie.

Wprowadzenie dodatkowych substratów do fermentacji psychrofilnej, zwłaszcza ścieków zawierających duży ładunek zanieczyszczeń wyrażonych jako BZT₅ (lub ChZT) wpływa korzystnie na zwiększenie ilości produkowanego biogazu, który może być wykorzystany na potrzeby własne oczyszczalni ścieków.

WNIOSKI

Wykorzystanie biokinetycznych modeli stabilizacji osadu pozwala na ocenę procesów fer-

mentacji różnych substratów, bez konieczności ingerencji w rzeczywisty układ technologiczny oczyszczalni. Dobrze skalibrowany model, który odzwierciedla warunki rzeczywiste prowadzonych procesów i uzyskiwanych wyników w istniejącym obiekcie, pozwala na prowadzenie badań symulacyjnych i ocenę ich wpływu na pracę poszczególnych urządzeń przed etapem projektowym i inwestycyjnym.

Wykonane badania symulacyjne, w których prowadzono fermentację w dwóch komorach (komora psychrofilna a następnie komora mezofilna) wykazały, że możliwe jest uzyskiwanie dodatkowych ilości biogazu w takim układzie technologicznym.

Prowadzone badania symulacyjne były wykonywane dla warunków ustalonych, tj. w modelu założono dopływ substratu na stałym poziomie i o niezmiennych wskaźnikach zanieczyszczeń. W komorze psychrofilnej badano jej pracę w zakresie temperatur 10–20 °C, natomiast w komorze mezofilnej utrzymywano temperaturę stałą na poziomie 35 °C.

W czasie badań symulacyjnych pracy układu dwóch komór fermentacyjnych, uzyskano wzrost ilości biogazu, w stosunku do układu z jedną komorą (komorą mezofilną) od 1,83% do 7,3%. Wzrost ilości biogazu uzyskiwanego w komorze psychrofilnej wynikał głównie z następujących czynników: stężeń zanieczyszczeń organicznych w ściekach, ilości wytwarzanych LKT, czasu zatrzymania osadu oraz temperatury procesu. Najwyższą ilość biogazu uzyskano w przypadku dozowania do mieszaniny osadu wstępnego i nadmiernego strumienia ścieków dowożonych i mleczarskich, charakteryzujących się wysokim stężeniem związków organicznych ($BZT_5 > 4000$ mg/l) w temperaturze 20 °C.

W komorze psychrofilnej uzyskano stężenie LKT na poziomie ok. 7000 mg/l, co już w tych warunkach pozwala na usunięcie substancji chorobotwórczych. Ważnym elementem, który powinien być uwzględniony przy wprowadzaniu dodatkowego strumienia ścieków dodatkowych (ciekłych odpadów), jest zapewnienie uśrednienia ich oraz kontroli jakościowej.

Wykonane badania symulacyjne są pierwszym krokiem w optymalizacji pracy oczyszczalni ścieków z wprowadzeniem układu dwóch komór fermentacyjnych (psychrofilnej i mezofilnej). Otrzymane wyniki pozwalają na podjęcie badań w skali laboratoryjnej związanych z budową, a następnie badaniem pracy

układu dwóch komór fermentacyjnych, pracujących w różnych warunkach i z różnymi parametrami pracy.

W analizie i ocenie efektywności pracujących oczyszczalni istotnym zagadnieniem jest bilans osadów ściekowych w aspekcie uzyskiwania biogazu, który jest wykorzystywany w celu poprawy bilansu energetycznego oczyszczalni (spalanie w układzie kogeneracyjnym).

PIŚMIENNICTWO

1. Dymaczewski Z., 2011. Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków. PZiITS Oddz. Wielkopolski, Poznań.
2. EnviroSim, 2006. Podręcznik Użytkownika BioWin 2.1. Lemtech, Kraków.
3. Jönsson K., Jansen J. la C., 2006. Hydrolysis of return sludge for production of easily biodegradable carbon: effect of pre-treatment, sludge age and temperature. *Water Science & Technology* 53(12), 47–54.
4. Łomotowski J., Szpindor A., 1999. Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków. ARKADY, Warszawa.
5. Puchajda B. i in., 2006. Low-temperature inactivation of fecal coliform in sludge digestion. *Water Envir. Research* 78, 680–685.
6. Ruffer H., Rosenwinkel K.-H. 1998. Oczyszczanie ścieków przemysłowych. Poradnik. Projprzem-EKO,
7. Rybicki S.M., 2013. Rola hydrolizy i fermentacji kwaśnej osadu wstępnego w eksploatacji oczyszczalni ścieków. *Praktyczne działania przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych w warunkach rosnących wymagań ekologicznych, ekonomicznych i społecznych*. Bielsko-Biała.
8. Soroko M., 2003. Skuteczność oczyszczalni hydrofitowych w oczyszczaniu ścieków z małych ubojni. *Inżynieria Rolnicza* 3(45). Warszawa, 341–348.
9. Vollertsen J., Petersen G., Borregaard V.R., 2006. Hydrolysis and fermentation of activated sludge to enhance biological phosphorus removal. *Water Science & Technology* 53(12), 55–64.
10. Wójtowicz A., 2013. Modelowe rozwiązania w gospodarce osadowej. *Izba Gospodarcza „Wodociągi Polskie”*, Bydgoszcz.
11. Yuan Q., Sparling R., Oleszkiewicz J.A., 2009. Waste activated sludge fermentation: Effect of solids retention time and biomass concentration. *Water Research* 43, 5180–5186.
12. Żeglin-Kurbiel K., 2009. Wstępna fermentacja osadu czynnego dla wspomaganie procesów usuwania substancji biogennej w reaktorach biologicznych; Seminarium „Biologia osadu czynnego: metody badania i implikacje technologiczne”. Politechnika Krakowska, Kraków.