

Joanna ŁUCZYSZYN
Adam MASŁOŃ
Janusz A. TOMASZEK
Politechnika Rzeszowska

ANAEROBOWE OCZYSZCZANIE ŚCIEKÓW

W pracy przedstawiono zagadnienia anaerobowego oczyszczania ścieków oraz klasyfikację anaerobowych reaktorów wykorzystywanych do oczyszczania ścieków. Dokonano przeglądu piśmiennictwa na temat stanu badań nad oczyszczaniem ścieków w warunkach anaerobowych.

1. Wprowadzenie

Działanie oczyszczalni ścieków, które powstawały na początku XX w., oparte było na procesach beztlenowych. Prace nad unowocześnianiem technologii oczyszczania ścieków pozwoliły na wprowadzenie metod opartych na procesach tlenowych, które w dużym stopniu wyparły z zastosowania układy anaerobowe.

W ostatnich latach beztlenowe oczyszczanie ścieków stało się coraz powszechniej stosowaną technologią, która znajduje zastosowanie w oczyszczaniu wysoko obciążonych ścieków, m.in. z zakładów przemysłowych. Zainteresowanie metodami anaerobowego oczyszczania ścieków wynika głównie ze względów ekonomicznych. Technologie oparte na procesach anaerobowych, w porównaniu z rozwiązaniami tlenowymi, charakteryzuje znacznie mniejsza ilość powstających osadów ściekowych, jak również oszczędność energii.

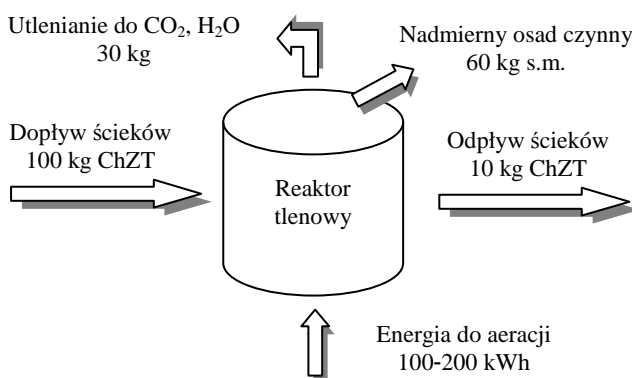
Technologie anaerobowego oczyszczania ścieków wykorzystują proces fermentacji metanowej ścieków, będący wielostopniowym procesem realizowanym przez specyficzną grupę organizmów, w wyniku którego substancja organiczna bez dostępu tlenu przekształcana jest m.in. w metan, dwutlenek węgla oraz inne produkty gazowe [31, 46]. Kinetykę reakcji beztlenowych oraz mechanizm rozkładu związków organicznych przedstawili w swoich pracach m.in. Błaszczyk [10], Henze i in. [28], Klimiuk i Łebkowska [36] oraz Sadecka [57].

Celem pracy jest przedstawienie zagadnienia anaerobowego oczyszczania ścieków. Zaprezentowano klasyfikację anaerobowych reaktorów do oczyszczania

nia ścieków, a także dokonano przeglądu piśmiennictwa na temat stanu badań nad oczyszczaniem ścieków w warunkach anaerobowych.

2. Porównanie beztlenowej technologii oczyszczania ścieków z metodami tlenowymi

Anaerobowe oczyszczanie ścieków w niektórych przypadkach jest rozwiązaniem konkurencyjnym w stosunku do technologii tlenowych (tab. 1.). Oczyszczanie ścieków w warunkach tlenowych pozwala na przekształcanie związków organicznych, oznaczanych jako ChZT, równorzędnie w 50% w osad, który należy poddać procesom unieszkodliwiania, oraz w energię cieplną, przy czym to nie znajduje praktycznego wykorzystania. Oczyszczanie ścieków w warunkach aerobowych wymaga doprowadzenia energii 100-200 kWh do procesu napowietrzania ścieków. Bilans energetyczny wykazuje zatem straty energetyczne 1,1-2,2 kWh/kg usuniętego ChZT (rys. 1.) [5, 46].

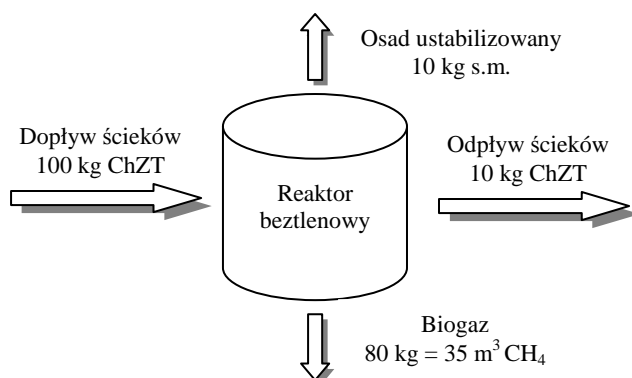


Rys. 1. Bilans masowy aerobowego oczyszczania ścieków, na podstawie [46]

W procesie anaerobowego oczyszczania ścieków ok. 10% związków organicznych oznaczanych jako ChZT przekształcana jest w biomasę, a pozostałe 90% w metan, który można wykorzystać do wytworzenia ciepła użytkowego oraz energii elektrycznej. Oczyszczanie ścieków w warunkach beztlenowych daje zysk energii w ilości 3,4 kWh/kg usuniętego ChZT (1 kg usuniętego ChZT dostarcza 0,35 m³ metanu, natomiast 1 m³ metanu pozwala na uzyskanie 9,7 kWh energii elektrycznej, rys. 2.). Ilość wydzielonego biogazu i zawarta w nim ilość metanu uzależnione są od składu ścieków oczyszczanych (tab. 2.) [5, 46].

Tabela 1. Porównanie tlenowych i beztlenowych metod oczyszczania ścieków, na podstawie [5, 28, 31]

Cecha	Proces oczyszczania tlenowego	Proces oczyszczania beztlenowego
Mineralizacja modelowego substratu	$\text{CH}_3\text{COOH} + 2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CH}_4$
Czas generacji mikro-organizmów	zbliżony (kilkanaście – kilkadziesiąt minut) – pozwala na szybki rozruch układu	zróżnicowany, następstwem czego jest długi okres rozruchu układu
Przebieg procesu	duże zapotrzebowanie na związki biogenne, $\text{BZT}_5:\text{N}:\text{P} = 100:5:1$	niewielkie zapotrzebowanie na związki biogenne, $\text{BZT}_5:\text{N}:\text{P} = 100:2,5:0,5$
	oczyszczanie ścieków o niskim stężeniu zanieczyszczeń	oczyszczanie ścieków o średnim i wysokim stężeniu zanieczyszczeń ($\text{ChZT} > 1500 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$)
	wymagana duża pojemność urządzeń	stosunkowo niewielka pojemność reaktorów
	usuwanie związków biogennych może być realizowane w ciągu technologicznym	brak możliwości efektywnego usuwania pierwiastków biogennych, konieczne jest doczyszczanie ścieków
	znaczna produkcja osadu nadmiernego ($400\text{--}600 \text{ kg/t}_{\text{us. ChZT}}$)	mała produkcja osadów nadmiernych ($2\text{--}150 \text{ kg/t}_{\text{us. ChZT}}$)
	możliwość oczyszczania ścieków o niskiej temperaturze	ścieki oczyszczane powinny mieć temperaturę $>22^\circ\text{C}$
	możliwość usuwania substancji toksycznych	substancje toksyczne inhibują proces oczyszczania
	urządzenia układu technologicznego wymagają dużych powierzchni zabudowy	mała powierzchnia pod budowę układu technologicznego
Bilans energii	50-60% energii magazynowane jest w nowej biomase, 40-50% tracone jest w postaci ciepła	90% jest zatrzymywane jako biogaz, 3-5% tracone w postaci ciepła, 5-7% bierze udział w produkcji nowej biomasy
Bilans węgla organicznego	50-60% C_{org} przekształcane jest w CO_2 , 40-50% jest wbudowywane w nową biomasę	90-95% przekształcone zostaje w biogaz, 5-10% zostaje wbudowane w masę bakteryjną
Koszty	inwestycyjne – małe, eksploatacyjne – duże, związane m.in. z napowietrzaniem, utrzymaniem instalacji, dawkowaniem substancji pożywkowych	inwestycyjne – średnie, eksploatacyjne – małe, związane m.in. z niskim zużyciem energii oraz brakiem konieczności dawkowania substancji pożywkowych



Rys. 2. Bilans masowy anaerobowego oczyszczania ścieków, na podstawie [46]

Tabela 2. Wpływ składników ścieków na ilość biogazu, na podstawie [46]

Składnik	Jednostkowa ilość biogazu [m ³ /kg]	Zawartość CH ₄ w biogazie [%]
Tłuszcze	1,125-1,515	62-77
Węglowodany	0,790-0,875	50
Białka	0,500-0,750	71-84

Nakłady energetyczne na oczyszczalniach opartych na procesach tlenowych związane są głównie z dostarczeniem tlenu, którego zapotrzebowanie jest wprost proporcjonalne do ładunku zanieczyszczeń wprowadzanego do oczyszczalni. Natomiast w przypadku oczyszczalni beztlenowych nakłady energetyczne wynikają z zapewnienia odpowiedniej temperatury procesu. Zapotrzebowanie na energię cieplną jest proporcjonalne do ilości ścieków. Pozyskana z układów beztlenowych energia cieplna może w zupełności wystarczyć na pokrycie zapotrzebowania na energię komór fermentacyjnych, natomiast energia elektryczna może być wykorzystana do napędzania urządzeń, np. pomp, dmuchaw, zgarniaczy, mieszadeł [46, 54].

3. Zastosowanie metod anaerobowego oczyszczania ścieków

Procesy beztlenowego oczyszczania ścieków najczęściej znajdują zastosowanie w oczyszczaniu wysoko stężonych ścieków. Przyjmuje się, że dolna wartość BZT₅ dla anaerobowego oczyszczania ścieków kształtuje się na poziomie 1000-1500 mg O₂/dm³ [27]. Technologie beztlenowe znajdują zastosowanie w usuwaniu wysokich ładunków organicznych, redukcji siarczanów, usuwaniu lub odzysku metali ciężkich i siarki, biodegradacji i biotransformacji zanieczyszczeń toksycznych [5]. Początkowo zastosowanie metod beztlenowych

ograniczone było do sektora produkcji żywności. Obecnie metody te wykorzystuje się również do oczyszczania ścieków poprodukcyjnych z zakładów papierniczych, farmaceutycznych, chemicznych, odcieków ze składowisk odpadów komunalnych, a nawet w ostatnim czasie ze ścieków komunalnych (tab. 3., 4., 6.) [5, 45].

Tabela 3. Jakość ścieków oczyszczonych w procesach beztlenowych, na podstawie [55]

Wskaźnik	Jednostka	Rodzaj ścieków			
		rzeźniane	mleczarskie	gorzelniane	komunalne
pH	[-]	6,6-7,8	5,6-8,0	3,8-6,5	6,5-7,5
ChZT	[mg/dm ³]	5200-11400	11000-75000	70000-98000	200-600
N _{org}	[mg N/dm ³]	120-150	do 160	143-4650	25-140
P _{org}	[mg P/dm ³]	7-28	0,9-1,3	13-63	5-19
Zawiesiny	[mg/dm ³]	600-1700	28-1900	500-7000	15-350
Składniki specyficzne	[-]	tluszcze, krew, patogeny	kazeina, białka, laktoza	związki humusowe	detergenty

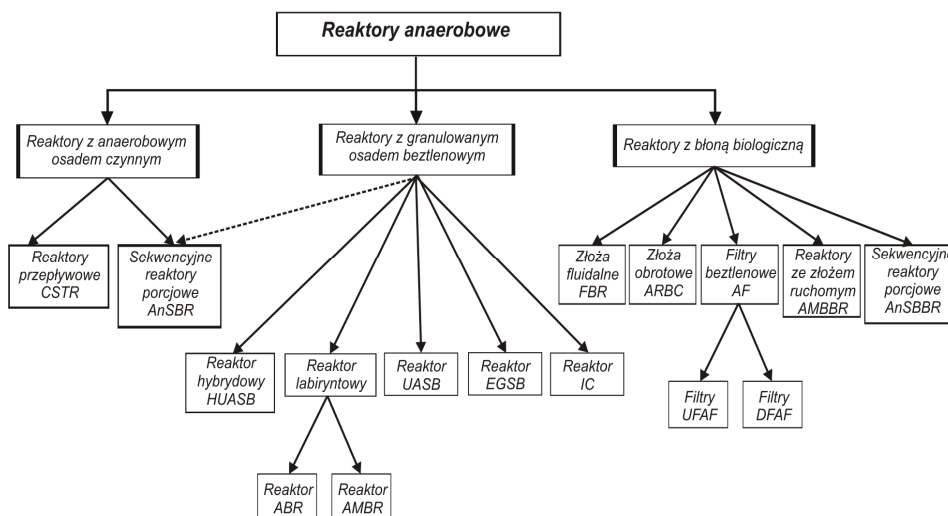
Tabela 4. Rodzaje ścieków oczyszczanych metodami beztlenowymi, na podstawie [5]

Rodzaj przemysłu	% usunięcie ChZT	% usunięcie BZT ₅
Browary, gorzelnie	70-90	>90
Odzysk papieru	65-80	80-90
Przeróbka ziemniaków	80-90	80-95
Przetwory mleczarskie	80-90	>90
Produkcja skrobi	70-85	80-95
Produkcja chemiczna	60-90	>90
Produkcja farmaceutyczna	50-80	>90
Drożdżownie	55-75	>90
Cukrownie	80-90	>90
Ocieki ze składowisk odpadów	70-90	>90

Ścieki poddawane procesowi fermentacji metanowej mogą wykazywać zróżnicowane właściwości fizykochemiczne oraz zawierać szerokie spektrum różnych domieszek, co bezpośrednio decyduje o wyborze układu technologicznego [31]. Efektywność oczyszczania ścieków z wykorzystaniem procesu fermentacji metanowej uzależniona jest od składu oczyszczanych ścieków oraz rodzaju reaktora i parametrów jego pracy, które to powinny być indywidualnie dostosowane do danego rodzaju oczyszczanych ścieków. Prawidłowo skonfigurowany układ technologiczny determinuje skrócenie czasu oczyszczania ścieków wraz ze wzrostem jego efektywności, prowadząc do znacznego zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych [5, 7].

4. Przegląd stanu badań nad oczyszczaniem ścieków w warunkach anaerobowych

Anaerobowe oczyszczanie ścieków może być realizowane w różnych systemach technologicznych, zarówno w układach jedno-, jak i dwustopniowych. Reaktory do fermentacji metanowej mogą być zasilane ściekami w sposób ciągły albo okresowy, z pełnym wymieszaniem lub przepływem tłokowym. Charakterystykę reaktorów stosowanych w procesach anaerobowych przedstawiono m.in. w pracach [5, 31, 46]. Reaktory wykorzystywane w procesach beztlenowych można sklasyfikować, uwzględniając rodzaj stosowanej biomasy oraz konfiguracji procesowej (rys. 3.).

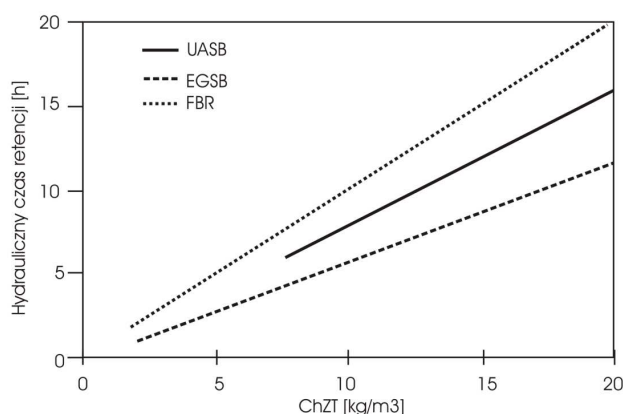


Rys. 3. Klasyfikacja anaerobowych reaktorów

Wśród anaerobowych układów oczyszczania ścieków wyodrębnia się grupę reaktorów wykorzystujących beztlenowy osad czynny w postaci kłaczków i granul oraz reaktory z błoną biologiczną. Do klasycznych rozwiązań anaerobowych reaktorów należą: przepływowe reaktory pełnego wymieszania CSTR (*Continuously Stirred Tank Reactor*) [51], reaktory labiryntowe (w tym reaktory ABR, *Anaerobic Baffled Reactor* [21] i AMBR, *Anaerobic Migrating Blanket Reactor* [2]), reaktory UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) [3], EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*) [38] oraz IC (*Internal Circulation*) [20], złoża fluidalne FBR (*Fluidized Bed Reactor*) [26] oraz filtry beztlenowe AF (*Anaerobic Filter*) z dolnym i górnym dopływem ścieków *Upflow*- i *Downflow Anaerobic Filter* (UFAF, DFAF). Rzadziej stosowanymi rozwiązaniami są anaerobowe

złoża obrotowe ARBC (*Anaerobic Rotating Biological Contact Reactor*) [53] i anaerobowe reaktory ze złożem ruchomym AMBBR (*Anaerobic Moving Bed Biofilm Reactor*) [30]. Niekonwencjonalne rozwiązania stanowią np. układy hybrydowe HUASB (*Hybrid Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) [4] oraz anaerobowe sekwencyjne reaktory porcjowe AnSBR (*Anaerobic Sequencing Batch Reactor*) [42, 69]. W anaerobowych reaktorach AnSBR możliwe jest wykorzystanie zarówno klasycznego osadu czynnego w postaci kłaczkowatej [22, 43], jak również beztlenowego osadu granulowanego [47]. Wśród innowacyjnych beztlenowych reaktorów można wyróżnić układy porcjowe: sekwencyjne anaerobowe reaktory porcjowe oraz sekwencyjne anaerobowe AnSBBR (*Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor*) [14, 15]. Oprócz przedstawionych układów technologicznych na rynku istnieje wiele komercyjnych rozwiązań systemów do anaerobowego oczyszczania ścieków. Przykładem mogą być reaktory Anubix-B, Flotamet, AnaeroMem, Methavor, BioPaQ-IC, BIOTIM, które są innowacyjne ze względu na konstrukcję oraz zróżnicowane parametry technologiczne.

Wiele opracowanych układów do oczyszczania ścieków w warunkach beztlenowych pozwala na optymalny ich wybór w zależności od rodzaju ścieków oraz oczekiwanych efektów (np. zmniejszenie ChZT, produkcja biogazu). Wybór anaerobowego systemu oczyszczania ścieków warunkuje przede wszystkim obciążenie substratowe oraz hydrauliczny czas zatrzymania, HRT (rys. 4., tab. 5.).



Rys. 4. Zakres pracy anaerobowych reaktorów w zależności od czasu zatrzymania i stężenia związków organicznych w ściekach dopływających, na podstawie [13]

Badania laboratoryjne wykazały, że reaktory anaerobowe pozwalają na usunięcie w dużym stopniu związków organicznych, przy czym sprawność anaerobowego oczyszczania ścieków wyrażona zmniejszeniem ChZT zależy od obciążenia substratowego oraz przyjętego czasu zatrzymania HRT (tab. 6.).

Tabela 5. Charakterystyka technologiczna systemów anaerobowego oczyszczania ścieków

Parametr	CSTR	UASB	EGSB	ABR	FBR	AF
Struktura biomasy	kłaczki	granule	granule	granule	biofilm	biofilm
Stężenie biomasy [kg/m ³]	5-20	60-100	60-100	4-18	30-50	10-20
Powierzchnia właściwa wypełnienia [m ² /m ³]	-	-	-	-	2000-3000	100-300
Obciążenie substratowe [kg/m ³ d]	0,25-8	5-30	≤40	0,4-30	20-70	0,25-20
HRT [d]	0,5-12	0,5-7	0,12-2,5	0,7-15	0,25-5	0,5-20
Stopień usunięcia ChZT [%]	50-90	>70	>80	>70	>70	70-90

Zastosowanie jednostopniowych anaerobowych metod do oczyszczania ścieków zostało dosyć dobrze przebadane w skali laboratoryjnej w odniesieniu do filtrów anaerobowych, reaktorów UASB, ASBR oraz reaktorów hybrydowych [17]. Systemy anaerobowe, w których fazy kwaśna i metanowa zachodzą w jednym reaktorze, mogą być podatne na różne negatywne czynniki i w efekcie nie realizować procesu oczyszczania w sposób optymalny. Z powodu tych trudności bardziej stabilną pracę i efekty oczyszczania można uzyskać, stosując beztlenowe systemy dwustopniowe w różnych kompilacjach technologicznych, np. CSTR + UFAF, CSTR + UASB, UFAF + UASB, UASB + UASB. Obecnie coraz częściej stosuje się dwustopniowe układy anaerobowe, w których fazy kwaśna i metanowa realizowane są w oddzielnych reaktorach, zwłaszcza w przypadku gdy ścieki są słabo zakwaszone [16]. Uważa się także, że oddzielna fermentacja kwaśna jest podstawowym warunkiem efektywnej fermentacji metanowej. Prawidłowe sterowanie procesem w reaktorze wstępnego zakwaszania ma bezpośredni wpływ na efektywność pracy reaktora, w którym zachodzi faza metanogenna [6]. Potwierdzeniem możliwości stosowania anaerobowego oczyszczania ścieków są instalacje techniczne pracujące na całym świecie (tab. 7.) [44].

Reaktory anaerobowe mogą być także stosowane w kombinowanych układach beztlenowo-tlenowych, dzięki czemu uzyskuje się większą stabilność oczyszczania ścieków w odniesieniu do wahań ładunku ChZT oraz wysoko efektywne usunięcie związków biogenych. Jako tlenowe reaktory doczyszczające można zastosować komory osadu czynnego, pracujące zarówno w systemie przepływowym, jak i porcjowym (reaktory SBR). Przykładem mogą być układy technologiczne AF-SBR [23], IC-SBR [18], UASB-SBR [50, 60], AnSBR-SBR [8].

Tabela 6. Anaerobowe oczyszczanie ścieków w różnych układach technologicznych

Układ	Rodzaj ścieków	Obciążenie substratowe [kgChZT/m ³ d]	HRT	Stopień usunięcia ChZT [%]	Publikacja
CSTR	cukrownicze	18,0	8,0 h	45	[71]
	farmaceutyczne	6,0	2,5 d	92	[51]
UFAF	mleczarskie	6,0	-	> 85	[33]
	mleczarskie	5,0-6,0	-	>90	[49]
DFAF	hodowlane	8,5-9,7	72,0 h	55,0	[64]
	rzeźniane	20,82	1,5 d	93,4	[12]
UASB	mleczarskie	7,5	-	85-90	[24]
	mleczarskie	1,0-28,5	2,3-11,6 d	95-99	[32]
	mleczarskie	31,0	17,0 h	90,0	[25]
	komunalne	0,78-3,12	6-72,0 h	70,9	[62]
	komunalne	0,62	12,0 h	48,0	[11]
	komunalne	1,81	24,0 h	94,0	[56]
	ścieki z produkcji tworzyw sztucznych	22,5	8,0 h	97,0	[39]
	syntetyczne	0,2-6,8	2,6-29,0 h	30-99	[35]
HUASB	komunalne	-	110,0 d	76-85	[4]
EGSB	browarniane	10,0	18,0 h	85,0	[38]
	rzeźniane	15,0	5,0 h	67,0	[48]
	fenolowe	5,0	-	91,2	[70]
	komunalne	1,4	4,0 h	48,0	[35]
IC	browarniane	4-36,0	8,0-24,0 h	70-90	[20]
FBR	tekstylne	13,0	4,0 h	98,0	[26]
AMBBR	gorzelniane	29,6	1,55 d	89,2	[59]
AnSBR	mleczarskie	0,78	-	98,0	[22]
	mleczarskie	0,6-4,8	-	90,0	[47]
	ścieki z rafinacji oliwy	5,3	3,0 d	83,0	[1]
	rzeźniane	4,93	2,0	93,0	[43]
	papiernicze	-	12,0 d	62-75	[65]
AnSBBR	ścieki z produkcji kosmetyków	9,4	-	91,0	[15]
CSTR + UFAF	mleczarskie	5,0	48,0 h	90,0	[29]
UFAF + UASB	papiernicze	11,0	21, h	90,0	[68]
CSTR + UASB	produkcja kawy	16,0	12,0 h	77,0	[19]
UASB + UASB	komunalne	1,70-6,20	4-8 h	74-82	[58]
UASB + UFAF	z żywności	1,27-2,76	13,0 d	96-99	[37]
ASBR + UASB	mleczarskie	19,2	-	80,0	[34]

Tabela 7. Wybrane beztlenowe oczyszczalnie ścieków przemysłowych

Zakład produkcyjny	Miasto	Charakterystyka układu	Uwagi
Browar	Szczecin	IC, $Q = 3000 \text{ m}^3/\text{d}$	BioPaQ-IC Veolia Water Systems
	Tychy	IC	BioPaQ-IC Veolia Water Systems
Przetwórstwo owocowe	Olsztynek	IC	BioPaQ-IC Veolia Water Systems
Przetwórstwo owocowo-warzywne	Tymbark	IC	BioPaQ-IC Veolia Water Systems
Przetwórstwo owocowe	Ostrołęka	IC-SBR, $Q = 600 \text{ m}^3/\text{d}$	Veolia Water Systems
Produkcja kwasu tereftalowego PTA	Włocławek	IC-MBBR	Veolia Water Systems
Browar	Leça do Balio, Portugalia	EGSB, $Q = 6000 \text{ m}^3/\text{d}$	Biobed Veolia Water Systems
Produkcja drożdży	Saloniki, Grecja	UASB, $Q = 90000 \text{ m}^3/\text{rok}$	Entec Biogas GmbH
Zakład celulozowo-papierniczy	Enso-Gutzeit, Finlandia	UASB, $Q = 40000 \text{ m}^3/\text{d}$	–
Papiernia	Sturgeon Falls, Kanada	UASB, $Q = 6300 \text{ m}^3/\text{d}$	–

Aby wyeliminować mankamenty układów anaerobowych, w ostatnim czasie zintensyfikowano badania nad wykorzystaniem granulowanego osadu czynnego w warunkach tlenowych [41, 67]. Badania nad tlenową granulacją skoncentrowano głównie w sekwencyjnych reaktorach porcjowych tzw. GSBR (*Granular Sequencing Batch Reactor*), a ich rozwój determinuje odpowiednia geometria reaktora, wysoka siła ścinająca, zapewnienie burzliwego przepływu cieczy w reaktorze, cykliczne zasilanie ściekami, głodzenie granul osadu, krótki czas sedymentacji oraz utrzymanie wysokiego obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń organicznych [9, 52, 61, 63, 66]. Porównanie najważniejszych parametrów technologii beztlenowego i tlenowego osadu granulowanego przedstawiono w tab. 8.

Tabela 8. Charakterystyka technologii beztlenowych i tlenowych granul, na podstawie [40]

Parametr	Beztlenowe granule UASB	Tlenowe granule GSBR
Czas wpracowania układu	3 miesiące	kilka dni
Stężenie osadu czynnego [g/dm^3]	15-25	8
Wielkość obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń [$\text{g ChZT}/\text{dm}^3 \cdot \text{d}$]	10	4
Stężenie ChZT na odpływie [mg/dm^3]	>100	<30
Przyrost biomasy [$\text{mg s.m.o.}/\text{mg ChZT}$]	0,04-0,10	0,20

Dotychczasowe badania wykazały, że granule uzyskiwane w reaktorach porcjowych z biomasa granulowaną GSBR posiadają zróżnicowaną strukturę, w której rozwijają się mikroorganizmy heterotroficzne (w warstwie wewnętrznej) oraz autotroficzne (w warstwie środkowej i zewnętrznej). Umożliwia to usuwanie ze ścieków związków azotu w procesach nityfikacji i denityfikacji, symultanicznej nityfikacji i denityfikacji, deamonifikacji i procesu *Anammox* oraz związków fosforu, zarówno w procesie biologicznej defosfatacji, jak również denityfikacji defosfatacyjnej. Wskazane są więc dalsze badania nad optymalizacją systemów GSBR w aspekcie usuwania związków biogenych ze ścieków komunalnych i przemysłowych [41].

5. Podsumowanie

W ostatnich latach technologie anaerobowe stają się coraz powszechniejszą metodą oczyszczania wysoko obciążonych ścieków przemysłowych oraz odcieków ze składowisk odpadów. Coraz lepsza znajomość mikrobiologicznych, biochemicznych i termodynamicznych podstaw fermentacji metanowej owocuje zwiększeniem wydajności procesu anaerobowego oczyszczania oraz znacznym poszerzeniem rodzajów wykorzystywanych substratów organicznych. Obok tradycyjnych substratów (ścieki przemysłu spożywczego, papierniczego) coraz częściej prowadzi się beztlenową biodegradację fenoli, substancji powierzchniowo czynnych, a nawet produktów petrochemicznych. Tylko nienasycone węglowodory, eter, lignina i niektóre tworzywa sztuczne ulegają bardzo powoli lub w ogóle biodegradacji w warunkach anaerobowych [44]. Pojawiają się również publikacje na temat zastosowania metod anaerobowych do oczyszczania ścieków komunalnych. Przegląd literatury donosi również o zastosowaniu jedno- i dwustopniowych układów anaerobowego oczyszczania celem intensyfikacji rozkładu związków organicznych i zwiększenia produkcji biogazu. Do usunięcia ze ścieków związków biogenych, które nie ulegają usunięciu w klasycznym anaerobowym systemie, zasadne jest zastosowanie układów kombinowanych, np. połączenie anaerobowego reaktora UASB i tlenowego sekwencyjnego reaktora porcjowego SBR.

Systemy anaerobowego oczyszczania ścieków charakteryzują się wysoką efektywnością usunięcia związków organicznych, możliwością odzysku energii w postaci metanu, niskimi kosztami eksploatacyjnymi itp. Opłacalność zastosowania anaerobowego oczyszczania ścieków determinuje przede wszystkim stężenie zanieczyszczeń organicznych w ściekach. Progiem opłacalności zastosowania systemów anaerobowych w oczyszczaniu ścieków jest wartość $ChZT = 2000 \text{ g O}_2/\text{m}^3$. Dla niższych stężeń uzasadnione jest oczyszczanie ścieków w procesach tlenowych, z kolei dla wyższych stężeń niższymi kosztami eksploatacyjnymi charakteryzuje się oczyszczanie beztlenowe [54]. W zakresie prostoty obsługi, energochłonności i kosztów eksploatacyjnych reaktory stosu-

wane w anaerobowym oczyszczaniu ścieków można uszeregować w sposób przedstawiony w tab. 9.

Tabela 9. Uszeregowanie reaktorów anaerobowych w zależności od prostoty obsługi, energochłonności i kosztów eksploatacji

Prostota obsługi	AF < UASB < ARBC < FBR
Energochłonność	UASB < AF < EGSB < FBR < RBC
Koszty	ARBC < AF < UASB < EGSB < FBR

Anaerobowe oczyszczanie ścieków jest technologią nadal się rozwijającą. Dla wielu rodzajów ścieków przemysłowych (mleczarskich, rzeźnianych, browarnianych, gorzelnianych, winiarskich, papierniczych, hodowlanych) jest technologią stosowaną w pełnej skali technicznej, lecz dla bardziej specyficznych wymaga nadal prowadzenia badań pilotowych.

Wykaz skrótów i oznaczeń

ABR	(<i>Anaerobic Baffled Reactor</i>) – reaktor labiryntowy,
AF	(<i>Anaerobic Filter</i>) – filtr beztlenowy,
AMBBR	(<i>Anaerobic Moving Bed Biofilm Reactor</i>) – anaerobowy reaktor z ruchomym złożem biologicznym,
AMBR	(<i>Anaerobic Migrating Blanket Reactor</i>) – reaktor labiryntowy z mieszadłem,
AnSBBR	(<i>Anaerobic Sequencing Batch Biofilm Reactor</i>) – anaerobowy sekwencyjny reaktor porcjowy z błoną biologiczną,
AnSBR	(<i>Anaerobic Sequencing Batch Reactor</i>) – anaerobowy sekwencyjny reaktor porcjowy,
ARBC	(<i>Anaerobic Rotating Biological Contact Reactor</i>) – anaerobowe złoża obrotowe,
CSTR	(<i>Continuously Stirred Tank Reactor</i>) – beztlenowa przepływowa komora osadu czynnego,
DFAF	(<i>Down-flow Anaerobic Filter</i>) – filtr beztlenowy z dolnym dopływem ścieków,
EGSB	(<i>Expanded Granular Sludge Bed</i>) – reaktor z granulowanym wypełnieniem ekspandowanym,
FBR	(<i>Fluidized Bed Reactor</i>) – złoża fluidalne,
GSBR	(<i>Granular Sequencing Batch Reactor</i>) – sekwencyjny reaktor porcjowy z tlenowym osadem granulowanym,
HRT	(<i>Hydraulic Retention Time</i>) – hydrauliczny czas zatrzymania,
HUASB	(<i>Hybrid Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>) – hybrydowy reaktor z warstwą zawieszonego anaerobowego osadu,

IC	(<i>Internal Circulation</i>) – reaktor z wewnętrzną cyrkulacją,
SBR	(<i>Sequencing Batch Reactor</i>) – sekwencyjny reaktor porcjowy,
UASB	(<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>) – reaktor z warstwą zawieszono- go anaerobowego osadu,
UFAF	(<i>Upflow Anaerobic Filter</i>) – filtr beztlenowy z górnym dopływem ścieków.

Literatura

1. Ammary B.Y.: Treatment of olive mill wastewater using an anaerobic sequencing batch reactor, *Desalination*, no 177, 2005, s. 157-165.
2. Angenent L.T., Sung S.: Development of Anaerobic Migrating Blanket Reactor (AMBR), a novel anaerobic treatment system, *Water Research*, no 35(7), 2001, s. 1739-1747.
3. Bal A.S., Dhagat N.N.: Upflow anaerobic sludge blanket reactor – a review, *Indian J. Environ. Health.*, no 43(2), 2001, s. 1-82.
4. Banu J.R., Kaliappan S., Yeom I.T.: Treatment of domestic wastewater using up-flow anaerobic sludge blanket reactor, *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, no 4 (3), 2007, s. 363-370.
5. Barbusiński K.: Beztlenowe metody oczyszczania ścieków, cz. 2: Rodzaje oczyszczanych ścieków, efektywność i zalety procesu, *BMP, Ochrona Środowiska*, nr 4, 2009, s. 28-31.
6. Barbusiński K.: Beztlenowe metody oczyszczania ścieków, cz. 3: Reaktory beztlenowe, *BMP – Agro Przemysł*, nr 4, 2009, s. 35-39.
7. Barbusiński K.: Beztlenowe oczyszczanie ścieków z wykorzystaniem granulowanego osadu czynnego, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne w dobie współczesnych problemów”, Bielsko-Biała – Szczyrk 14-16 października 2009.
8. Bernet N., Delgenes N., Akunna J.C., Delgenes J.P., Moletta R.: Combined anaerobic-aerobic SBR for the treatment of piggery wastewater, *Water Research*, no 34(2), 2000, s. 611-619.
9. Beun J.J., Hendriks A., van Loosdrecht M.C.M., Morgenroth E., Wilderer P.A., Heijnen J.J.: Aerobic granulation in a sequencing batch reactor, *Water Research*, vol. 33, no 10, 1999, s. 2283-2290.
10. Błaszczuk M.K.: Mikroorganizmy w ochronie środowiska, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2009.
11. Bodik I., Herdova B., Drtil M.: Anaerobic treatment of the municipal wastewater under psychrophilic conditions, *Bioprocess Engineering*, no 22, 2000, s. 385-390.
12. Borja R., Banks C.J., Wang Z., Mancha A.: Anaerobic digestion of slaughterhouse wastewater using a combination sludge blanket and filter arrangement in a single reactor, *Bioresource Tech.*, no 65, 1998, s. 125-133.
13. Cervantes F.J., Pavlostathis S.G., van Haandel A.C.: Advanced biological treatment processes for industrial wastewaters. Principles and application, IWA Publishing, London 2006.
14. Damasceno L.H., Rodrigues J.A., Ratusznei S.M., Zaiat M., Foresti E.: Effects of feeding time and organic loading in an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) treating diluted whey, *J. Environ. Manage.*, no 85(4), 2007, s. 927-935.

15. De Oliveira D.S., Prinholato A.C., Ratusznei S.M., Rodrigues J.A.D., Zaiat M., Foresti E.: AnSBBR applied to the treatment of wastewater from a personal care industry: Effect of organic load and fill time, *Journal of Environmental Management*, no 90, 2009, s. 3070-3081.
16. Demirel B., Yenigün O.: Two-phase anaerobic digestion processes: a review, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, no 77, 2002, s. 743-755.
17. Demirel B., Yenigün O., Onay T.T.: Anaerobic treatment of dairy wastewaters: a review. *Process Biochemistry*, no 40, 2005, s. 2583-2595.
18. Deng L.W., Zheng P., Chen Z.A.: Anaerobic digestion and post-treatment of swine wastewater using IC-SBR process with bypass of raw wastewater, *Process Biochemistry*, no 41, 2006, s. 965-969.
19. Dinsdale R.M., Hawkes F.R., Hawks D.L.: Mesophilic and thermophilic anaerobic digestion with thermophilic preacidification of instant-coffee-production wastewater, *Water Research*, no 31, 1997, s. 1931-1938.
20. Driessen W., Yspeert P.: Anaerobic treatment of low, medium and high strength effluent in the agro-industry, *Wat. Sci. Tech.*, no 40(8), 1999, s. 221-228.
21. Foxon K.M., Pillay S., Lalbahadur T., Rodda N., Holder F., Buckley C.A.: The anaerobic baffled reactor (ABR): An appropriate technology for on-site sanitation, *Water SA*, no 30(5), 2005, s. 44-50.
22. Frigon J.-C., Breton J., Bruneau T., Moletta R., Guiot S.R.: The treatment of cheese whey wastewater by sequential anaerobic and aerobic steps in a single digester at pilot scale, *Bioresource Technology*, no 100, 2009, s. 4156-4163.
23. Garrido J.M., Omil F., Arrojo B., Méndez R., Lema J.M.: Carbon and nitrogen removal from a wastewater of an industrial dairy laboratory with a coupled anaerobic filter-sequencing batch reactor system, *Wat. Sci. Tech.*, no 43(3), 2001, s. 249-256.
24. Gavala H.N., Kopsinis H., Skiadas I.V., Stamatelatou K., Lyberatos G.L.: Treatment of dairy wastewater using an upflow anaerobic sludge blanket reactor, *J. Agric. Eng. Res.*, no 73, 1999, s. 59-63.
25. Gutierrez J.L.R., Enemba P.A.G., Polanco F.F.: Anaerobic treatment of cheese production wastewater using a UASB reactor, *Bioresource Technology*, no 37, 1991, s. 271-276.
26. Haroun M., Idris A.: Treatment of textile wastewater with an anaerobic fluidized bed reactor, *Desalination*, no 237, 2009, s. 357-366.
27. Hartmann: Biologiczne oczyszczanie ścieków, WIP, Warszawa 1996.
28. Henze M., van Loosdrecht M., Ekama G., Brdjanovic D.: Biological wastewater treatment. Principles, modelling and design, IWA Publishing, London 2008.
29. Ince O.: Performance of a two-phase anaerobic digestion system when treating dairy wastewater, *Water Research*, no 32, 1998, s. 2707-2713.
30. Jähren S.J., Ødegaard H.: Treatment of thermomechanical pulping (TMP) white-water in thermophilic (55°C) anaerobic-aerobic moving bed biofilm reactors, *Wat. Sci. Tech.*, no 40(8), 1999, s. 81-89.
31. Janosz-Rajczyk M.: Badania wybranych procesów oczyszczania ścieków, Wydaw. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008.
32. Kalyuzhnyi S.V., Martinex E.P., Maptinez J.R.: Anaerobic treatment of high strength cheese whey wastewaters in laboratory and pilot UASB-reactors, *Bioresource Technology*, no 60, 1997, s. 59-65.

33. Kasapgil B., Anderson G.K., Ince O.: An investigation into the pretreatment of dairy wastewater prior to aerobic biological treatment, *Water Science and Technology*, no 29, 1994, s. 205-212.
34. Kato M.T., Field J.A., Lettinga G.: The anaerobic treatment of low strength wastewaters in UASB and EGSB reactors, *Wat. Sci. Tech.*, no 36(6-7), 1997, s. 375-382.
35. Kim I., Kim S.-H., Shin H.-S., Jung J.-Y.: Lipid degradation in a two-phase anaerobic SBR and Upflow Anaerobic Sludge Blanket, *Proceedings of the Water Environment Federation, WEFTEC 2006*, s. 2576-2592.
36. Klimiuk E., Łebkowska M.: *Biotechnologia w ochronie środowiska*, PWN, Warszawa 2005.
37. Lacalle M.L., Villaverde S., Fdz-Polanco F., Garcia-Encina P.A.: Combined anaerobic/aerobic (UASB + UBAF) system for organic matter and nitrogen removal from a high strength industrial wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, no 44(4), 2001, s. 255-262.
38. Li J., Zuo J.E., Xing W.: Performance and microbial characteristics of an EGSB reactor treating brewery wastewater under 20 degrees C, *Huan Jing Ke Xue*, no 29(4), 2008, s. 990-995.
39. Lin Y., He Y., Meng Z., Yang S.: Anaerobic treatment of wastewater containing methanol in up-flow anaerobic sludge bed (UASB) reactor, *Front. Environ. Sci. Engin. China*, no 2(2), 2008, s. 241-246.
40. Liu Q.S., Liu Y.: Growth kinetics of aerobic granules, [in:] *Wastewater purification, Aerobic granulation in Sequencing Batch Reactors*, Liu Y. (ed.), Taylor&Francis Group CRC Press, Florida 2008.
41. Łuczyszyn J., Miąsik M., Tomaszek J.A.: Wykorzystanie granulowanego tlenowego osadu czynnego w procesach oczyszczania ścieków, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, z. 58(4/11), 2011, s. 189-201.
42. Masłoń A., Tomaszek J.A.: Zastosowanie sekwencyjnych reaktorów porcjowych do oczyszczania ścieków przemysłowych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, z. 58(4/11), 2011, s. 215-246.
43. Massé D.I., Massé L.: The effect of temperature on slaughterhouse wastewater treatment in anaerobic sequencing batch reactors, *Bioresource Technology*, no 76, 2001, s. 91-98.
44. Materiały informacyjne firmy Veolia Water Systems.
45. Miksch K.: Zastosowanie biotechnologii w oczyszczaniu wody, ścieków, gruntów i gazów oraz utylizacji odpadów, *Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN*, nr 60, III Kongres Inżynierii Środowiska. Polska Inżynieria Środowiska pięć lat po wstąpieniu do Unii Europejskiej, t. 3, Lublin 2009, s. 71-91.
46. Miksch K., Sikora J.: *Biotechnologia ścieków*, Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 2010.
47. Mockaitis G., Ratusznei S.M., Rodrigues J.A.D., Zaiat M., Foresti E.: Anaerobic whey treatment by a stirred Sequencing Batch Reactor (ASBR): Effects of organic loading and supplemented alkalinity, *Journal of Environmental Management*, no 79, 2006, s. 198-206.
48. Ñunez L.A., Martínez B.: Anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in an Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) reactor, *Wat. Sci. Tech.*, no 40(8), 1999, s. 99-106.

49. Omil F., Garrido J.M., Arrojo B., Mendez R.: Anaerobic filter reactor performance for the treatment of complex dairy wastewater at industrial scale, *Water Research*, no 37, 2003, s. 4099-4108.
50. Ong S.A., Toorisaka E., Hirata M., Hano T.: Decolorization of azo dye (Orange II) in a sequential UASB-SBR system, *Separation and Purification Technology*, no 42, 2005, s. 297-302.
51. Oz N.A., Ince O., Ince B.K., Akarsubasi A.T., Eyice O.: Microbial population dynamics in an anaerobic CSTR treating a chemical synthesis-based pharmaceutical wastewater, *J. Environ. Sci. Health A Tox Hazard Subst. Environ. Eng.*, no 38(10), 2003, s. 2029-2042.
52. Qin L., Liu Y., Tay J.H.: Effect of settling time on Aerobic Granulation in Sequencing Batch Reactor, *Biochemical Engineering Journal*, no 21, 1, 2004, s. 47-52.
53. Patel C., Madamwar D.: Biomethanation of salty cheese whey using an Anaerobic Rotating Biological Contact Reactor, *Journal of Fermentation and Bioengineering*, no 83(5), 1997, s. 502-504.
54. Plichta I.: Opłacalność wykorzystania procesów beztlenowych w oczyszczaniu ścieków, *Forum Eksploatatora*, no 3, 2008, s. 71-73.
55. Rajeshwari K.V., Balakrishnan M., Kansal A., Lata K., Kishore V.: State of the art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no 4, 2000, s. 135-156.
56. Rodriguez J.A., Pena M.R., Manzi V.: Application of an innovative methodology to improve the starting-up of UASB reactors treating domestic sewage, *Wat. Sci. Tech.*, no 44(4), 2001, s. 295-303.
57. Sadecka Z.: Podstawy biologicznego oczyszczania ścieków, Wydaw. Seidel-Przywecki, Warszawa 2010.
58. Sayed S.K.I.A., Fergala M.A.A.: Two stage of UASB concept for treatment of domestic sewage including sludge stabilization process, *Water Science and Technology*, no 32, 1995, s. 55-63.
59. Sheli C., Moletta R.: Anaerobic treatment of vinasses by sequentially mixed moving bed biofilm reactor, *Wat. Sci. Tech.*, no 56(2), 2007, s. 1-7.
60. Sun H., Yang Q., Peng Y., Shi X., Wang S., Zhang S.: Advanced landfill leachate treatment using a twostage UASBSBR system at low temperature. *Journal of Environmental Sciences*, no 22(4), 2010, s. 481-485.
61. Sunil S.A., Duu-Jong L., Kuan-Yeow S., Joo-Hwa T.: Aerobic granular sludge: Recent advances, *Biotechnology Advances*, no 26, 2008, s. 411-423.
62. Tang N.H., Torres C.L., Speece R.E.: Treatment of low strength domestic wastewater by using upflow anaerobic sludge blanket process, *Proc. of the 50th Purdue Industrial Waste Conference*, Chelsea, Michigan 1995.
63. Tay J.H., Liu Q.S., Liu Y.: The effects of shear force on the formation, structure and metabolism of aerobic granules, *Applied Microbiology and Biotechnology*, no 57, 2001, s. 1-2, 227-233.
64. Tilche A., Bortone G., Forner G., Indulti M., Stante L., Tesini O.: Combination of anaerobic digestion and denitrification in a hybrid upflow anaerobic filter integrated in a nutrient removal treatment plant, *Wat. Sci. Tech.*, no 30(12), 1994, s. 405-414.

65. Tripathi C.S., Allen D.G.: Comparison of mesophilic and thermophilic aerobic biological treatment in sequencing batch reactors treating bleached kraft pulp mill effluent, *Water Research*, no 33(3), 1999, s. 836-846.
66. Usmani S.Q., Sabir S., Farooqui I.H., Ahmad A.: Biodegradation of phenols and p-cresol by sequential batch reactor proc., *International Conference on Environmental Research and Technology*, no 10, 2008, s. 906-910.
67. Venugopalan V.P., Nanchaiah Y.V., Mohan T.V.K., Narasimhan S.V.: Biogranulation: self-immobilised microbial consortia for high performance liquid waste remediation, *Barc Newsletter*, no 254, 2005, s. 1-7.
68. Vinas M., Martinez J., Baselli B.: Advantages of anaerobic reactor for TMC wastewater with separated acidogenic and methanogenic stages, *Environ. Technol.*, no 14, 1993, s. 995-1000.
69. Zaiat M., Rodrigues J.A.D., Ratusznei S.M., de Camargo E.F.M., Borzani W.: Anaerobic sequencing batch reactors for wastewater treatment: a developing technology, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, no 55, 2001, s. 29-35.
70. Zhou H., Chen J.: Start-up of EGSB reactor for treatment of wastewater containing pentachlorophenol, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, vol. 36, no 10, 2003, s. 1152-1155.
71. Zhu G., Liu C., Xu G., Li J., Gao Y., Chen L., Liu H.: Simultaneous biohydrogen production and wastewater treatment in Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) using beet sugar wastewater, *Proc. ICEET '09. Proc. of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology*, vol. 2, 2009, s. 737-740.

ANAEROBIC WASTEWATER TREATMENT

A b s t r a c t

Issues anaerobic wastewater treatment and classification of anaerobic reactors used for wastewater treatment was presented in this paper. Also performed a literature review on the state of studies on wastewater treatment in anaerobic conditions.

Złożono w Oficynie Wydawniczej w lipcu 2011 r.