

ANDRZEJ JĘDRCZAK, DARIUSZ KRÓLIK*

WPLYW STOPNIA ROZDROBNIENIA MIĘSA NA WYDAJNOŚĆ PROCESU FERMENTACJI

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu rozdrobnienia mięsa na wydajność procesu fermentacji metanowej, prowadzonej w warunkach mezo- i termofilowych. Wykazano, że w procesie fermentacji mezofilowej jak i termofilowej rozdrobnienie odpadu nie wpływało znacząco na ilość i skład wyprodukowanego biogazu. Zauważono natomiast, że produkcja biogazu w warunkach mezofilowych w porównaniu do warunków termofilowych była od 2,0 do 2,6 raza wyższa.

Słowa kluczowe: fermentacja mezofilowa, fermentacja termofilowa, biogaz, mięso

WSTĘP

W literaturze obszernie opisano wpływ na efektywność procesu fermentacji parametrów takich, jak: pH, temperatura, obciążenie komór ładunkiem organicznym i czas fermentacji oraz stężenia składników pokarmowych i związków toksycznych zarówno dla procesów „mokrych” i „suchych”, jak i przebiegających w układach jedno- lub w dwustopniowych, w sposób ciągły lub okresowy [Cecchi 1991, Duarte i Anderson 1982, Grady i in. 1999, Heinrich 1999, Imhoff 1996, Leescher 1996, Malina 1992 i Thome-Kozmiensky 1995].

Wpływem rozdrobnienia odpadów na przebieg ich fermentacji zajmowali się Hills i Nikano [1984], Sharma i in. [1998], Kayhanian i Hardy [1994], Palmowski i Müller [1999, 2000, 2003] oraz Mshandete [2006].

Hills i Nikano [1984] na podstawie wyników badań fermentacji odpadów pomidorów o wielkości cząstek w przedziale od 1,3 do 20 mm wykazali, że wydajność biogazu jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości cząstek. Podobne wnioski sformułowali Kayhanian i Hardy [1994] na podstawie wyników badań fermentacji odpadów komunalnych o różnym uziarnieniu oraz Mshandete [2006], badając wpływ rozdrobnienia odpadów szałalu na efektywność ich fermentacji w warunkach mezofilowych. Palmowski i Müller [1999, 2000, 2003]

* Uniwersytet Zielonogórski, WILiŚ, Zakład Technologii Wody, Ścieków i Odpadów

stwierdzili, że zmniejszenie rozmiarów cząstek odpadów i wynikające stąd zwiększenie ich powierzchni właściwej powoduje wzrost szybkości hydrolizy, pierwszego etapu fermentacji odpadów organicznych. Efektem jest zwiększenie produkcji gazu, zwłaszcza w przypadku fermentacji substratów o wysokiej zawartości materiałów włóknistych, o niskiej podatności na rozkład biologiczny i dużych cząstkach (o powierzchni właściwej $<20 \text{ m}^2/\text{kg}$). Wzrost szybkości produkcji gazu prowadzi do skrócenia czasu fermentacji, co stwarza możliwość zmniejszenia wielkości komory bez strat w produkcji gazu. Negatywnym efektem rozdrobnienia cząstek jest wzrost oporu właściwego przefermentowanych odpadów, istotny przy ich odwadnianiu.

Informacje o wpływie stopnia rozdrobnienia mięsa na wydajność procesu fermentacji są dotychczas skąpe, a publikacje w tym zakresie nieliczne [Masse i in. 2003], pomimo wysokiego potencjału gazowego mięsa i powszechnego fermentowania odpadów zawierających ten składnik w dużych ilościach. Udział odpadów poubojowych w biogazowniach przygotowywanych do realizacji w kraju, w 2010 r., wynosił ok. 13% [Oniszk-Popławska i Mroczkowski, 2010]. Według Józwiaka [2009] z odpadu poubojowego bez kości otrzymanego z produkcji mięsa można uzyskać $970 \text{ dm}^3/\text{kg}$ smo o zawartości do 68% metanu. Z kolei doświadczenia austriackiej firmy AAT [informacja własna, 2010] wskazują, że produkcja biogazu jest niższa i wynosi około $750 \text{ dm}^3/\text{kg}$ smo przy 68% zawartości metanu w gazie.

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu rozdrobnienia mięsa na wydajność procesu fermentacji metanowej, prowadzonej w warunkach mezo- i termofilowych, mierzoną objętością i składem wyprodukowanego biogazu oraz stopniem przereagowania odpadów.

METODYKA BADAŃ

Charakterystyka surowców

Próbki do badań stanowiły mieszaniny następujących składników:

- tkanka zwierzęca (mięso wieprzowe) – rozdrobnione do ziaren w kształcie sześciangu o różnych wymiarach (tabela 1),
- materiał zaszczipający – osad przefermentowany z WKFz w oczyszczalni ścieków w Gubin-Guben,
- bufor - roztwór wodorowęglan sodu (NaHCO_3) o stężeniu $60\text{g}/\text{dm}^3$, dodawany w celu uniknięcia zakwaszenia wsadu i hamowania procesu,
- woda.

Udziały składników w badanych próbkach przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 1. Wymiary i powierzchnia ziarna

Table 1. Dimensions and grain size

Parametry	Numer próbki				
	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Stopień rozdrobnienia, sześcián o boku, mm	ok. 1	2,5	5,0	10,0	15,0
Powierzchnia ziarna, mm ²	6	37,5	150	600	1350

Tab. 2. Skład wsadów do badań

Table 2. The composition of test batches

Wyszczególnienie	Jednostka	Fermentacja mezofilowa		Fermentacja termofilowa	
		Numer próbki			
		P-1	P-2 do P-6	P-1	P-2 do P-6
Odpady	kg sm	-	0,0027	-	0,0115
	kg smo	-	0,0026	-	0,0110
Osady ściekowe	dm ³	0,700	0,700	0,700	0,700
	kg sm	0,0146	0,0146	0,0132	0,0132
	kg sm	0,0094	0,0094	0,0088	0,0088
Bufor	dm ³	0,133	0,133	0,133	0,133
Woda	dm ³	0,167	0,164	0,167	0,156
Objętość próbki	dm ³	1,000	1,000	1,000	1,000
Zawartość sm osadów i odpadów	%	1,46	1,73	1,32	2,47
Iloraz smo odpadów i smo osadów	-	-	0,29	-	1,25

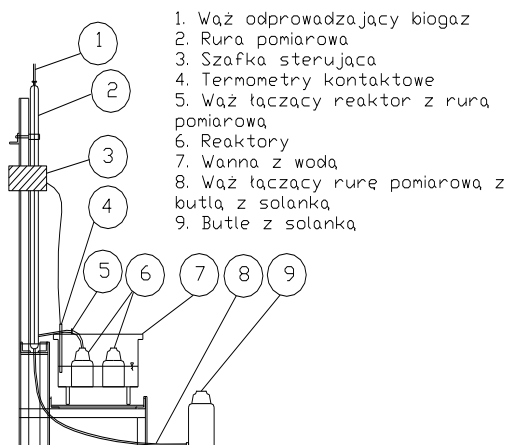
Stanowisko do badań

Badania wykonano, w skali laboratoryjnej, w 12 stanowiskowym „fermentatorze” do fermentacji okresowej. Każde stanowisko składało się z trzech identycznych elementów: komory fermentacyjnej (reaktora) – butla o pojemności 1 dm³ (6), biurety gazowej do pomiaru ilości wyprodukowanego biogazu (2) oraz butli z nasyconym roztworem chlorku sodu (solanką) do wyrównywania ciśnienia (9) (rys.1).

Reaktory, po napełnieniu surowcem, ustawiano w termostacie (7). Termostat stanowiła metalowa wanna wypełniona wodą, której poziom utrzymywano powyżej powierzchni roztworu w reaktorach.

W wannie zamontowano pompy do cyrkulacji wody oraz dwa termometry kontaktowe połączone z urządzeniem sterującym, które w zależności od wskazań termometrów kontrolowało pracę grzałek (włączało lub wyłączało je). Ter-

mostat zapewniał utrzymywanie temperatury mieszaniny w reaktorach z dokładnością 1° C.



Rys. 1. Stanowisko do badań
 Fig. 1. The test stand

Przygotowanie próbek do badań

Próbki odpadów o ziarnach $\geq 2,5$ mm uzyskiwano przez krojenie schłodzonego materiału, nadając im kształt sześciątów. Próbki odpadów o rozdrobnieniu maksymalnym uzyskiwano przez dwukrotne zmielenie materiału w młynku i przesiewanie przez sito o prześwicie oczek 1 mm.

Reaktory oznaczone numerem P-1 zawierały próbki kontrolne (bez odpadu) służące do określenia endogennej aktywności materiału zaszczepiającego. Kolejne reaktory, oznaczone numerami od P-2 do P-6, zawierały odpad tkanki zwierzęcej o rozdrobnieniu przedstawionym w tabeli 1.

Do wszystkich reaktorów dodawano 0,700 dm³ materiału zaszczepiającego i 0,133 dm³ buforu. Zawartości reaktorów uzupełniano wodą wodociągową z sieci miejskiej do objętości 1,000 dm³ i reaktory zamykano gumowym korkiem, który unieruchamiano zaciskiem śrubowym. W celu zapewnienia warunków beztlenowych z przestrzeni nad powierzchnią mieszaniny w reaktorach usuwano powietrze przedmuchiując je azotem. Następnie reaktory łączyło szczelnie z biuretami gazowymi i ustawiano w termostacie.

Fermentację mezofilową odpadów prowadzono przez 25 dni w temperaturze ok. 36°C, a termofilową przez 41 dni w temperaturze ok. 56°C. Badania przeprowadzono w dwóch powtórzeniach.

Zakres i kontrola procesu

Każdego dnia w czasie trwania doświadczeń mierzono objętość wytworzonego biogazu i okresowo oznaczano zawartość w nim metanu, ditlenku węgla i tlenu. Objętość biogazu korygowano do warunków standardowych temperatury i ciśnienia. Skład gazu oznaczano aparatem ALTER WAG-1GA, po nagromadzeniu się go w kolumnie w ilości umożliwiającej dokonanie pomiaru.

Właściwości fermentowanego materiału kontrolowano przed i po fermentacji oznaczając w mieszaninach m.in.: pH, zasadowość og. suchą masę, suchą masę organiczną, OWO (ogólny węgiel organiczny), ChZT (chemiczne zapotrzebowanie na tlen) oraz w roztworach po przesączeniu próbek - zasadowość og. i LKT. Przed analiza próbki poddawano homogenizacji. Oznaczenia wykonywano zgodnie z metodykami określonymi w PN.

WYNIKI BADAŃ

Badane odpady

Właściwości fizyczno-chemiczne odpadów poddawanych procesowi fermentacji przedstawiono w tabeli 3.

Odpad (tkanka zwierzęca) zawierał 76,4% wody, substancje lotne (straty parzenia) stanowiły 95,3% jej suchej masy. Zawartość OWO wynosiła 58,4% sm i azotu og. 5,08% sm. Stosunek C/N wynosił 11.

Właściwości przefermentowanego materiału stosowanego do zaszczepiania próbek z odpadami w procesie fermentacji mezofilowej i termofilowej różniły się nieznacznie. Osad zawierał ok. 2 g sm/dm³. Zawartość substancji organicznej wynosiła 64,4% sm (f. mezofilowa) i 66,5% sm (f. termofilowa), OWO – 32,6 i 30,2% sm i azot ogólny 5,13 i 4,98 % sm, kolejno. Stosunek C/N wynosił nieznacznie powyżej 6.

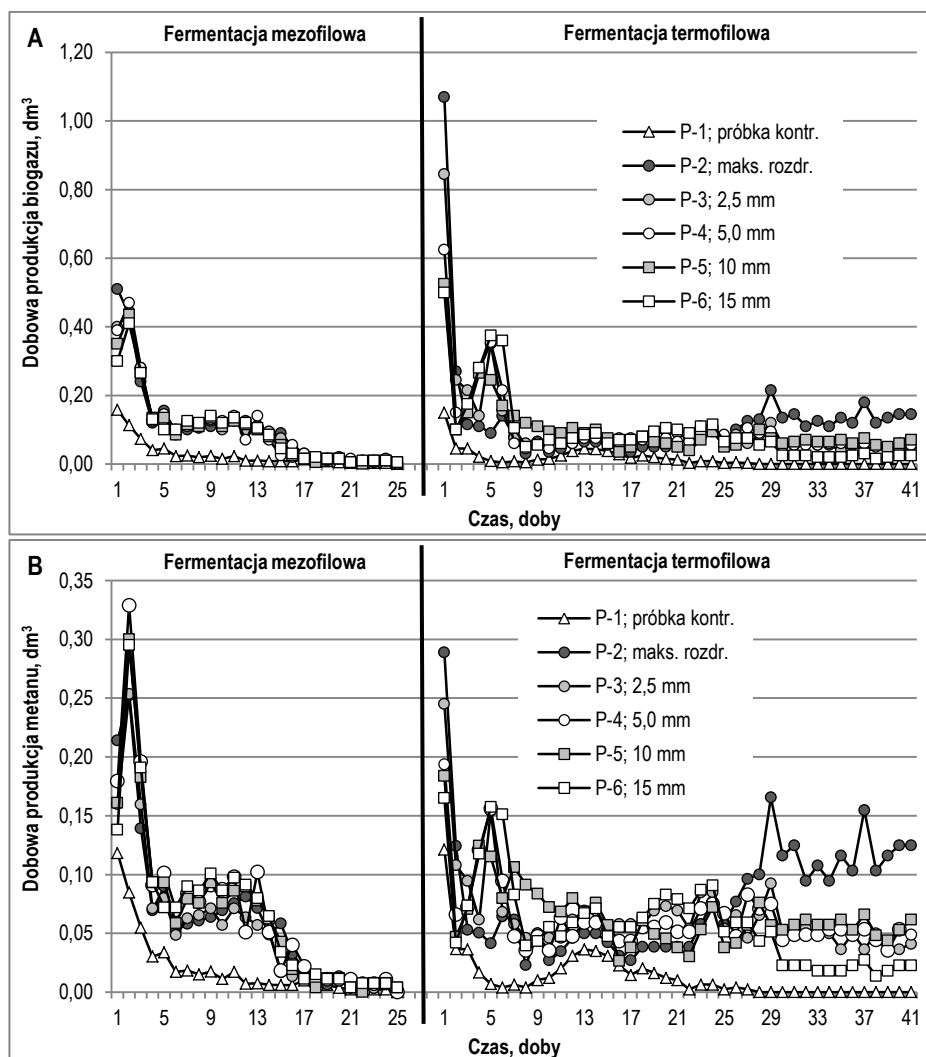
Tab. 3. Właściwości fizyczno-chemiczne odpadów poddanych procesowi fermentacji

Table 3. The physico-chemical properties of the waste subjected to fermentation

Wskaźniki	Jednostka	Tkanka zwierzęca	Materiał zaszczepiający	
			Fermentacja mezofilowa	Fermentacja termofilowa
Wilgotność	%	76,4	97,92	98,11
Sucha masa organiczna	% sm	95,3	64,4	66,5
OWO	% sm	58,4	32,6	30,2
Azot ogólny	% sm	5,08	5,13	4,98
Iloraz C/N	-	11	6,3	6,1

Wydajność produkcji biogazu

Wyniki pomiarów dobowej produkcji biogazu i metanu z badanych mieszanin, w procesach fermentacji mezofilowej i termofilowej, przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Dobowa produkcja biogazu (A) i metanu (B) z tkanki zwierzęcej o różnym rozdrobnieniu w procesie fermentacji mezo- i termofilowej
 Fig. 2. Daily production of biogas (A) and methane (B) from a different animal tissue fragmented by the meso- and thermophilic fermentation

Przebieg krzywych obrazujących zmiany produkcji dobowej biogazu podczas procesu fermentacji mezofilowej próbek mięsa o różnym uziarnieniu był podobny. Wyraźne różnice w wielkości produkcji wystąpiły tylko w pierwszym dniu badań (rys. 2A).

W pierwszej dobie największą ilość biogazu uzyskano z odpadów o maksymalnym rozdrobnieniu (P-2; 0,450 dm³/d), a najmniej z odpadów o największych ziarnach (P-6; 0,330 dm³/d). W drugiej dobie zróżnicowanie produkcji biogazu było znacznie mniejsze; od 0,410 dm³ z próbki P-6 do 0,470 dm³ z próbki P-4. Po 3 dobie zaobserwowano spadek produkcji biogazu ze wszystkich próbek.

W siódmym dniu nastąpił wzrost dobowej produkcji gazu, który trwał przez około 5 dni. Od trzynastej doby produkcja gazu systematycznie malała i w ostatnim dniu badań wynosiła od 0,000 do 0,005 dm³.

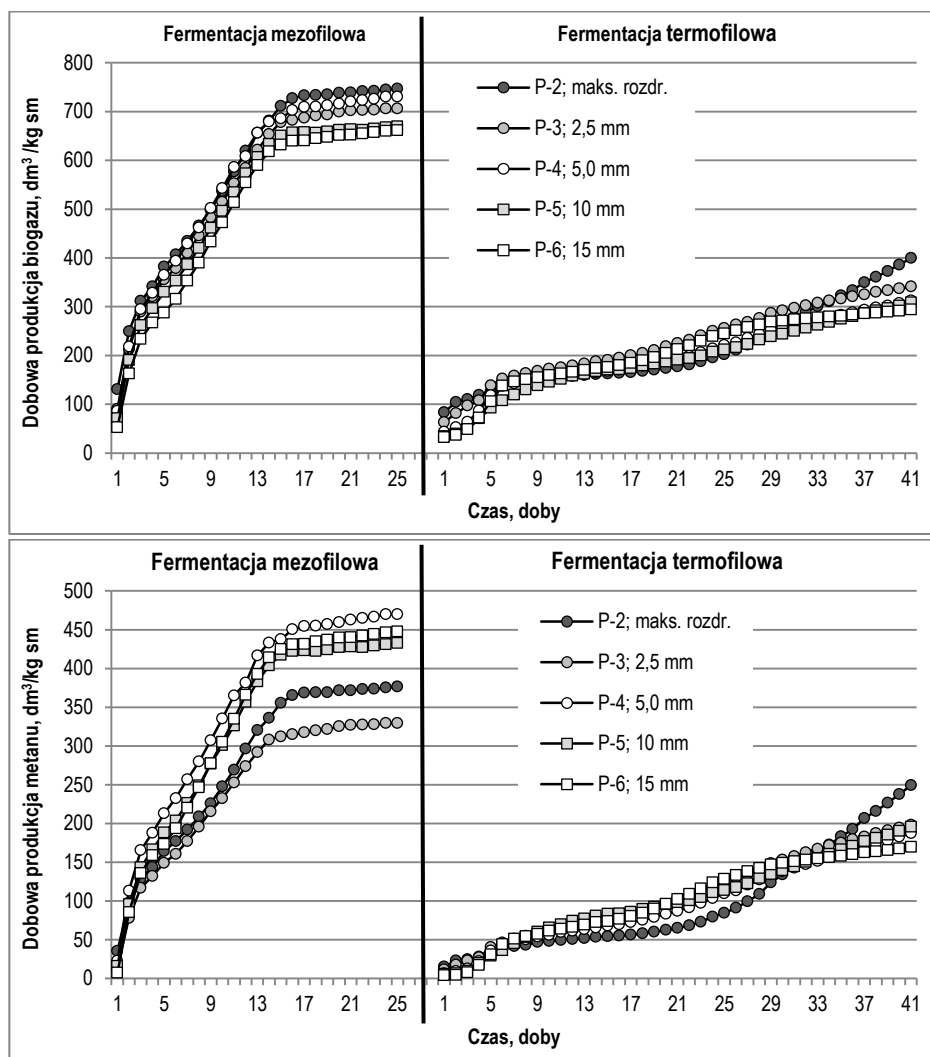
Podobny przebieg miała produkcja gazu z próbki kontrolnej, jednak jej wielkość była znacznie niższa. Maksymalną produkcję odnotowano również w pierwszej dobie - 0,158 dm³. Emisja gazu praktycznie ustąpiła w 20 dniu badań.

Przebieg dobowej produkcji biogazu z próbek mięsa w testach termofilowych był bardziej zróżnicowany (rys. 2A). Maksymalna dobowo produkcja gazu wystąpiła w pierwszej dobie testu. Wynosiła ona od 0,500 dm³ dla próbki o największych ziarnach do 1,070 dm³ dla próbki o maksymalnym rozdrobnieniu. W drugim dniu nastąpił gwałtowny spadek wielkości produkcji dla wszystkich próbek.

W piątym dniu odnotowano drugie maksimum produkcji gazu dla próbek od P-3 do P-6. Jedynie produkcja gazu z próbki P-2 utrzymała się na stałym, niskim poziomie. W dobie szóstej rozpoczął się spadek wielkości produkcji z tych próbek. W przypadku próbki P-2 zaobserwowano wzrost produkcji gazu do poziomu powyżej 0,100 dm³/d dopiero po 26 dobie.

Przebieg zmian produkcji dobowej metanu w czasie trwania fermentacji (rys. 2B) był zbliżony do zmian produkcji dobowej biogazu. Biogaz wytwarzany podczas fermentacji mezofilowej był zasobny w metan. Najmniej metanu zawierał biogaz z próbek P-2 (od 58 do 65% (v/v)) i P-3 (od 57 do 67% (v/v)), a najwięcej z próbki P-6 (od 72 do 76% (v/v)). Biogaz z próbki kontrolnej zawierał 75%(v/v) metanu.

Udział metanu w biogazie wytwarzanym w czasie trwania procesu fermentacji termofilowej był bardziej zróżnicowany. W pierwszej dobie trwania procesu udział metanu w gazie wahał się w granicach od 27% (P-2) do 35% (v/v) (P-5). Średnie stężenie metanu w biogazie wytworzonym w dniach od 7 do 29 wzrosło do wartości mieszczących się w granicach od 76 do 79% (v/v). W ostatnim pomiarze, który wykonano w 41 dobie trwania doświadczenia, średni udział metanu w biogazie dla próby P-2 wynosił 86%(v/v) dla pozostałych próbek aż 91, 89, 88 i 91% (v/v), kolejno.



Rys. 3. Skumulowana produkcja netto biogazu (A) i metanu (B) z tkanki zwierzęcej o różnym rozdrobnieniu w procesie fermentacji mezo- i termofilowej

Fig. 3. The cumulative net production of biogas (A) and methane (B) from a different animal tissue fragmented by the meso- and thermophilic fermentation

Na rysunku 3 przedstawiono skumulowaną jednostkową produkcję netto biogazu i metanu z badanych próbek (produkcja gazu pomniejszona o produkcję z próbki kontrolnej) w $\text{dm}^3/\text{kg sm}$.

Przebieg krzywych zmiany skumulowanej produkcji netto biogazu i metanu z badanych próbek w czasie trwania pomiarów wyraźnie pokazuje występowanie zjawiska hamowania procesu fermentacji.

Podczas fermentacji mezofilowej średnia wydajność dobową produkcji biogazu w pierwszych 5 dniach wahała się od 57,5 (P-6) do 76,4 (P-2) dm^3/kg sm. W okresie od 6 do 15 dnia trwania procesu była ona ponad 2 krotnie niższa i mieściła się w zakresie od 32,0 (P-4 i P-5) do 34,5 (P-6) dm^3/kg sm, a w kolejnych 10 dniach wynosiła od 2,1 (P-5) do 5,0 (P-3) dm^3/kg sm.

W przypadku fermentacji termofilowej badanych próbek średnia wydajność dobową produkcji biogazu w pierwszych 5 dniach była ok. 3 razy niższa niż podczas ich fermentacji mezofilowej i wahała się od 18,5 (P-5) do 27,8 (P-3) dm^3/kg sm. W kolejnych 10 dniach wynosiła ona od 3,7 (P-2) do 7,8 (P-5) dm^3/kg sm, i była od około 4 (P-5) do 9 (P-2) razy niższa niż osiągnięta podczas fermentacji mezofilowej, w tym samym okresie.

W przypadku fermentacji mezofilowej w 26 dobie biogaz nie powstawał (P-3 i P-4) lub jego produkcja była niższa niż 0,5 dm^3/kg sm. Natomiast podczas fermentacji termofilowej biogaz był wytwarzany do czasu zatrzymania doświadczenia (41 doba) i średnia wydajność dobową, w okresie od 26 do 41 dnia, wahała się 3,1 (P-6) do 11,3 (P-2) dm^3/kg sm.

Właściwości fizyczno-chemiczne mieszanin przed i po procesie fermentacji

Właściwości fizyczno-chemiczne próbek z tkanką zwierzęcą, przed fermentacją mezofilową i termofilową, przedstawiono w tabeli 4.

Właściwości fizyczno-chemiczne próbek po fermentacji mezofilowej przedstawiono w tabeli 5, a po fermentacji termofilowej w tabeli 6.

pH mieszanin po fermentacji odpadów mięsa w warunkach mezofilowych oscylowało wokół wartości 7,78, a zasadowość ogólna w zakresie od 9,70 (P-2) do 10,1 g $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$ (P-3 i P-5) (tabela 5).

Wartości wskaźników obrazujących zawartość substancji organicznych w próbkach z odpadem po fermentacji mezofilowej były o około 20% mniejsze w odniesieniu do ich wartości przed fermentacją.

Stężenia azotu ogólnego w mieszaninach z odpadem wynosiły do 845 (P-1) do 875 mgN/dm^3 (P-5 i P-6). Dominował azot amonowy, którego udział wynosił 67%.

Ciecze nadosadowe zawierały LKT w ilości: próbką kontrolną (P-1) – 549 mg/dm^3 , próbki z odpadem od 857 (P-4) do 994 mg/dm^3 (P-2 i P-5).

Mieszaniny po fermentacji termofilowej wykazywały niższe pH w porównaniu do mieszanin po fermentacji mezofilowej (ok. 7,3), poza próbką kontrolną. Zasadowości mieszanin mieściły się w zakresie od 11,2 (P-1) do 12,0 g $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$ (P-4) (próbka P-1; 8,05 g $\text{CaCO}_3/\text{dm}^3$).

Redukcja suchej masy organicznej i OWO w wyniku fermentacji próbek z mięsem malała ze wzrostem ziarna i wynosiła od 25% (P-2) do 19% (P-6).

Tab. 4. Właściwości fizyczno-chemiczne próbek z mięsem przed fermentacją mezofilową i termofilową

Table 4. The physico-chemical properties of the meat samples before fermentation mesophilic and thermophilic

Wskaźniki	Jednostki	Fermentacja mezofilowa		Fermentacja termofilowa	
		P-1	P-2 ÷ P-6	P-1	P-2 ÷ P-6
pH	-	8,50	8,46	8,41	8,37
Zasadowość ogólna	g CaCO ₃ /dm ³	7,65	7,15	7,43	6,93
Sucha masa	g/dm ³	19,79	22,49	18,42	29,93
Sucha masa organiczna	g/dm ³	9,40	11,97	8,79	19,75
OWO	g/dm ³	4,75	6,33	3,95	10,67
ChZT	g O ₂ /dm ³	14,9	19,1	12,7	30,5
Azot ogólny	mg N/dm ³	752	890	659	1244
Azot organiczny	mg N/dm ³	525	645	473	970
Azot amonowy	mg N/dm ³	227	245	187	274
Zasadowość ogólna*	g CaCO ₃ /dm ³	6,84	6,47	6,68	6,30
LKT*	mg CH ₃ COOH/dm ³	360	326	318	284

*Oznaczenie w próbie sączonej

Tab. 5. Właściwości fizyczno-chemiczne próbek z mięsem po fermentacji mezofilowej

Table 5. Physical and chemical properties of samples of meat at mesophilic fermentation

Wskaźniki	Jednostki	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
pH	-	7,69	7,79	7,79	7,76	7,78	7,79
Zasadowość ogólna	g CaCO ₃ /dm ³	7,98	9,70	10,1	9,80	10,1	9,78
Sucha masa	g/dm ³	18,82	19,56	19,64	19,77	19,92	19,99
Sucha masa organiczna	g/dm ³	8,76	9,37	9,44	9,47	9,65	9,78
OWO	g/dm ³	4,40	4,95	4,95	4,94	5,09	5,05
ChZT	g O ₂ /dm ³	13,8	15,1	15,1	15,1	15,3	15,4
Azot ogólny	mg N/dm ³	760	845	865	850	875	875
Azot organiczny	mg N/dm ³	320	280	290	275	280	285
Azot amonowy	mg N/dm ³	440	565	575	575	595	590
Zasadowość ogólna*	g CaCO ₃ /dm ³	7,43	8,90	8,95	9,00	9,00	8,95
LKT*	mg CH ₃ COOH/dm ³	549	994	960	857	994	926

* Oznaczenie w próbie sączonej

Po procesie fermentacji termofilowej stężenia azotu ogólnego w mieszaninach z odpadem mieściły się w granicach 1220-1280 mg N/dm³. Podobnie jak w próbkach po fermentacji mezofilowej azot amonowy, którego udział wynosił ok. 80% azotu og.

Po procesie fermentacji termofilowej stężenie LKT w cieczach nadosadowych było od 7 do 10 razy wyższe niż podczas mezofilowej fermentacji próbek mięsa. Najwięcej LKT zawierała ciecz nadosadowa w próbce P-3 – 8780 mg/dm³, a najmniej próbka P-2 – 7110 mg/dm³ (P-1; 1610 mg/dm³).

Tab. 6. Właściwości fizyczno-chemiczne próbek z mięsem po fermentacji termofilowej

Table 6. Physical and chemical properties of the meat samples after thermophilic fermentation

Wskaźniki	Jednostki	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
pH	-	7,89	7,28	7,35	7,32	7,31	7,38
Zasadowość ogólna	g CaCO ₃ /dm ³	8,05	11,2	11,3	12,0	11,5	11,4
Sucha masa	g/dm ³	17,79	25,00	25,65	26,00	26,00	26,10
Sucha masa organiczna	g/dm ³	8,15	14,88	15,53	15,81	15,81	16,01
OWO	g/dm ³	3,61	8,06	8,35	8,45	8,54	8,63
ChZT	g O ₂ /dm ³	11,6	22,7	23,8	24,2	24,4	24,5
Azot ogólny	mg N/dm ³	650	1250	1220	1280	1275	1275
Azot organiczny	mg N/dm ³	280	240	240	265	225	225
Azot amonowy	mg N/dm ³	370	1010	980	1015	1050	1050
Zasadowość ogólna	g CaCO ₃ /dm ³	6,75	9,53	9,90	9,58	9,63	9,70
LKT	mg CH ₃ COOH/dm ³	1610	7110	8780	8590	8109	8740

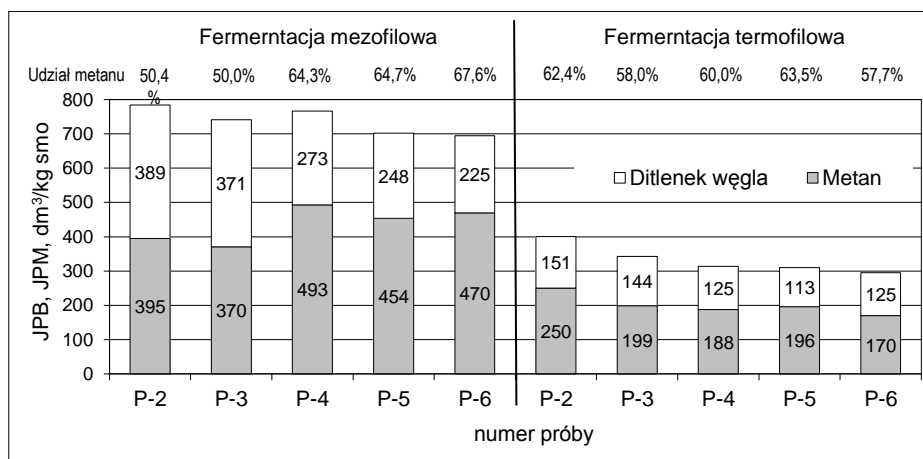
*Oznaczenie w próbce sączoney

DYSKUSJA WYNIKÓW

Na rysunku 4 przedstawiono wartości jednostkowej produkcji biogazu (JPB) i metanu (JPM) wyrażone w dm³/kg sm wyznaczone w badaniach fermentacji mięsa, o różnym uziarnieniu, w warunkach mezo- i termofilowych.

JPB odniesiona do suchej masy organicznej w procesie fermentacji mezofilowej mięsa wahała się od 694 (P-5) do 784 dm³/kg smo (P-2), a JPM - od 370 (P-3) do 470 dm³/kg smo (P-4). W procesach fermentacji termofilowej próbek mięsa JPB mieściła się w przedziale od 295 (P-6) do 401 dm³/kg smo (P-2), a JPM - od 170 (P-6) do 250 dm³/kg smo (P-2). W porównaniu z fermentacją mezofilową JPB była od 2,0 (P-2) do 2,5 (P-4) razy mniejsza dla próbek o tym samym rozdrobieniu, mimo że fermentację termofilową prowadzono przez 41

dni. Przyczyną tak niskiej produkcji biogazu w procesach termofilowych było hamowanie beztlenowego rozkładu odpadów wywołane wysokim stężeniem kwasów lotnych w fermentowanej mieszance.



Rys. 4. Jednostkowa produkcja biogazu w procesie mezofilowej i termofilowej fermentacji mięsa

Fig. 4. Specific biogas production in the mesophilic and thermophilic digestion of meat

Według Duarte i Andersona [1982], zahamowanie metanogenezy o 50% powoduje stężenie kwasów lotnych ponad 3000 mg/dm^3 przy pH 7,0. Grady i in. [1999] stwierdzili, że zahamowanie procesu fermentacji przez kwasy octowy i masłowy ma miejsce przy ich stężeniu przekraczającym $10 \text{ g CH}_3\text{COOH/dm}^3$ w środowisku o odczynie obojętnym a przez kwas propionowy przy stężeniu powyżej $6 \text{ g CH}_3\text{COOH/dm}^3$.

W przeprowadzonych badaniach zasadowość cieczy nadosadowych w próbkach mięsa po fermentacji mezofilowej wynosiła ok. $9,00 \text{ gCaCO}_3/\text{dm}^3$, a stężenie LKT w mięsilo się w przedziale od 857 (P-4) do 994 mg/dm^3 (P-2 i P-5). Wartości ilorazu LKT/zasadowość ogólna oscylowały wokół wartości 0,1 (tab. 5). Stężenie LKT w cieczach nadosadowych po procesie fermentacji termofilowej próbek z mięsem ($7110\text{-}8780 \text{ mg/dm}^3$) było od 7 do 10 razy wyższe niż po mezofilowej fermentacji, podczas gdy ich zasadowość ogólna była tylko nieznacznie wyższa ($9,53\text{-}9,90 \text{ gCaCO}_3/\text{dm}^3$). Wartości ilorazu LKT/zasadowość były bardzo wysokie i wynosiły od 0,75 (P-2) do 0,90 (P-6). Wartość stosunku LKT/zasadowość „0,3”, uznawana za alarmującą, była zatem znacznie przekroczona [PZLiTS 1997]. Przy wartościach stosunku $0,75\div 0,90$ proces powinien zostać całkowicie zahamowany. Nie wystąpienie załamania się fermentacji wynikało ze stosunkowo wysokiego pH cieczy nadosadowej (ok. 7,3). Bezpośrednią przyczyną zakłóceń fermentacji termofilowej było obciążenie komory

wysokim ładunkiem odpadów. Fermentację termofilową w porównaniu do mezofilowej prowadzono przy obciążeniu komory odpadem ponad czterokrotnie wyższym (11,0 i 2,6 g smo/dm³).

Wyznaczona w badaniach jednostkowa produkcja biogazu podczas fermentacji mezofilowej odpadu mięsa była porównywalna do wartości podawanych przez firmę AAT [informacja własna, 2010] – około 750 dm³/kg smo przy 60% zawartości metanu w gazie, i niższa niż podawana przez Józwiaka – z odpadu poubojowego bez kości otrzymanego z produkcji mięsa można uzyskać w wyniku fermentacji około 950 dm³/kg sm (970 dm³/kg smo) o zawartości metanu do 68% (v/v) [Józwiak 2009].

Wartości stopnia przereagowania (iloraz produkcji biogazu z próbki o danym rozdrobieniu i z próbki o maksymalnym rozdrobieniu) wynosiły: dla próbki P-4 – 97,8%, a dla pozostałych próbek od 88,6 do 94,5%. Wartości stopnia przereagowania wyznaczone w doświadczeniach prowadzonych w termofilowym zakresie temperatury, odniesione do produkcji z próbki o maksymalnym rozdrobieniu, wynosiły od 73,6 (P-6) do 85,4% (P-2), a odniesione do produkcji biogazu w procesie mezofilowym, z próbki o maksymalnym rozdrobieniu, od 37,6 (P-6) do 51,1% (P-2). Wartości te pozwalają stwierdzić, że zahamowanie procesu fermentacji sięgało ponad 50% (tabela 7).

Tab. 7. Stopień przereagowania odpadów

Table 7. Degree of anaerobic degradation of waste

Typ fermentacji	Stopień przereagowania (G _B), %				
	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Mezofilowa	100,0	94,5	97,8	89,6	88,6
Termofilowa	100,0	85,4	78,1	77,2	73,6
Termofilowa*	51,1	43,7	40,0	39,5	37,6

* produkcja biogazu w procesie termofilowym odniesiona do produkcji biogazu wyznaczonej dla próbki o maksymalnym rozdrobieniu w procesie mezofilowym JPB_{max}:

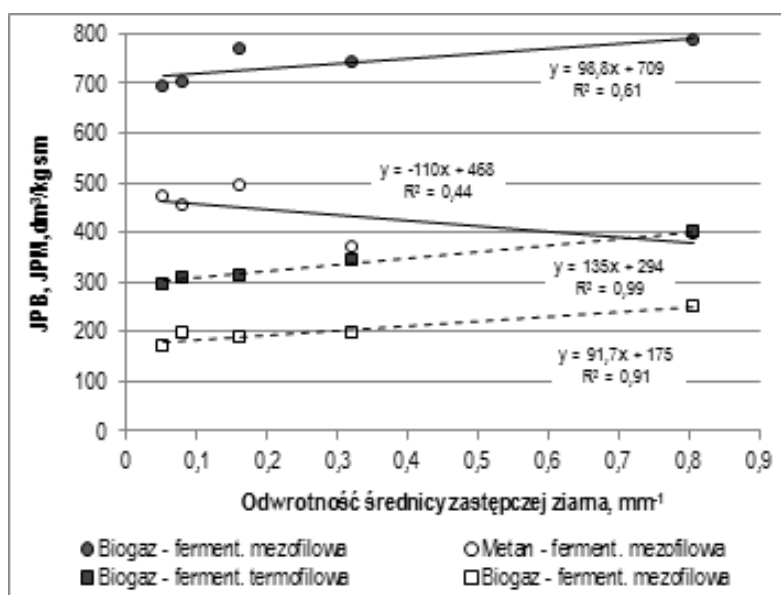
Udział metanu w biogazie, poza próbkami P-2 i P-3, podczas fermentacji mezofilowej był zbliżony do podawanego w literaturze. Średnie zawartości metanu w biogazie uzyskiwanym w procesie fermentacji mezofilowej próbek mięsa wahały się od 50,0% (P-3) do 67,6% (P-6), a podczas fermentacji termofilowej – od 57,7 (P-6) do 62,4% (P-2) (rys. 4).

Na rysunku 5 przedstawiono zależność JPB i JPM od średnicy zastępczej ziarna oraz od powierzchni właściwej fermentowanych próbek odpadów. Średnicę zastępczą ziaren zdefiniowano jako średnicę kuli o objętości równej objętości ziarna próbki odpadów.

Przebiegi zmian JPB i JPM, w badanym zakresie rozdrobnienia odpadów, w zależności od średnicy zastępczej ich ziarna pokazują, że produkcja biogazu

i metanu była odwrotnie proporcjonalna do średniej wielkości cząstek, zarówno podczas fermentacji mezofilowej, jak i termofilowej.

Współczynniki kierunkowe prostych opisujących zależność JPB od odwrotności średnicy zastępczej cząstek były dodatnie dla fermentacji mezofilowej i termofilowej. W przypadku JPM dla próbki odpadów mięsa fermentowanej w warunkach mezofilowych wartość współczynnika kierunkowego była ujemna. Współczynnik determinacji (R^2) dla fermentacji mezofilowej były niskie: 0,61 dla JPB i 0,44 dla JPM, a dla fermentacji termofilowej wysokie: 0,99 dla JPB i 0,91 dla JPM. Podobnie, liniową zależność między szybkością produkcji gazu i odwrotnością średnicy cząstek dla odpadów pomidorów, w zakresie średniej średnicy cząstek od 0,13 do 2,0 cm, wykazali [Hills i Nikano 1984], dla odpadów rolniczych i pozostałości żywności [Sharma i in. 1988] i dla odpadów sialu, w zakresie wielkości cząstek od 2 do 100 mm – [Mshandete i in. 2006].



Rys. 5. Zależności jednostkowej produkcji biogazu i metanu od średnicy zastępczej ziarna mięsa

Fig. 5. Dependence between single biogas and methane production and hydraulic diameter of meat

Wartości JPB i JPM dla próbki o maksymalnym rozdrobnieniu (P-2) były wyższe od wartości wyznaczonych dla próbki odpadów o cząstkach 15 mm (P-6): dla mięsa: o 8 i 2% w warunkach mezofilowych (w warunkach termofilowych miało miejsce około 50% zahamowanie procesu, stąd obserwowane wyższe o około 40% wartości JPB i JPM dla próbki P-2 w porównaniu z próbką P-6 uznano za efekt działania innych czynników).

Stopień rozkładu substancji organicznych zawartych w mięsie w wyniku fermentacji próbek odpadu o różnym uziarnieniu, wyrażony jako zmniejszenie zawartości suchej masy, suchej masy organicznej, ogólnego węgla organicznego i chemicznego zapotrzebowania na tlen przedstawiono w tabeli 8.

Tab. 8. Stopień rozkładu suchej masy, suchej masy organicznej, OWO oraz zmniejszenie wartości ChZT podczas fermentacji mezofilowej i termofilowej próbek mięsa

Table 8. The degree of the degradation of the dry matter and dry organic matter, TOC and COD reduction in the value during mesophilic and thermophilic fermentation of meat

Numer próbki	Stopień rozkładu, %							
	Fermentacja mezofilowa				Fermentacja termofilowa			
	sm	smo	OWO	ChZT	Sm	Smo	OWO	ChZT
P-2	72,6	76,3	64,9	70,8	37,3	38,6	33,8	37,4
P-3	69,9	73,6	65,1	69,8	31,7	32,7	29,5	31,6
P-4	64,8	72,4	65,6	69,8	28,7	30,1	28,0	29,0
P-5	59,3	65,4	56,0	65,6	28,7	30,1	26,6	28,4
P-6	56,7	60,4	59,1	63,2	27,8	28,1	25,3	27,5

Stopień rozkładu odpadów mięsa w procesie fermentacji mezofilowej był bardzo wysoki. W warunkach mezofilowych dla próbki o maksymalnym rozdrobnieniu oraz próbek o ziarnach 2,5 i 5 mm był on porównywalny i wyraźnie mała dla próbek o ziarnach 10 i 15 mm. Dla próbek P-2, P-3 i P-4 zawartość suchej masy zmniejszała się o od 72,6 do 64,8%, suchej masy organicznej o od 76,3 (P-2) do 72,4% (P-4), OWO o około 65%, a wartość ChZT o około 70%. Dla próbek o ziarnach 15 mm (P-6) wartości wskaźników były o od 6,5 (OWO i ChZT) do 12% niższe (smo). W procesie fermentacji termofilowej zmniejszenie zawartości suchej masy, suchej masy organicznej, OWO oraz wartości ChZT również w małym stopniu zależało od wielkości cząstek odpadów. Wartości wskaźników stopnia rozkładu były jednak o od 42 do 53% niższe w porównaniu z fermentacją mezofilową, co potwierdza 50% zahamowanie procesu ustalone w oparciu o wartości JPB i JPM.

WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że:

1. Tkanka zwierzęca jest materiałem bardzo łatwo ulegającym biodegradacji w warunkach beztlenowych; okresowa fermentacja mezofilowa mięsa pro-

- wadzona przy niskim obciążeniu komory ładunkiem $2,7 \text{ g sm/dm}^3$ ($2,6 \text{ g smo/dm}^3$) zakończyła się po 25 dniach.
2. Fermentacja odpadu w termofilowym zakresie temperatury przy 4 krotnie wyższym obciążeniu komory ładunkiem ($11,5 \text{ g sm/dm}^3$; $11,0 \text{ g smo/dm}^3$) była hamowana przez wysokie stężenie kwasów lotnych w fermentowanej mieszance. Stopień zahamowania procesu oszacowano na 50%
 3. Rozdrobnienie odpadów łatwo ulegającym biodegradacji takich jak mięso w niewielkim stopniu wpływa na efektywność ich fermentacji.

LITERATURA

1. AAT, 2010. Abwasser- und Abfalltechnik GmbH, Austria, informacja własna.
2. CECCHI F., PAVAN P., MATA-ALVAREZ J., BASSETTI A., COZZOLINO C., 1991. Anaerobic digestion of municipal solid waste: thermophilic versus mesophilic performance at high solids. *Waste Management Res*, 9: 305-315.
3. DUARTE A.C., ANDERSON G.K., 1982. Inhibition Modelling in Anaerobic Digestion, *Wat. Sci. Technol.*, 14: 749-763.
4. GRADY C.P.L., DAIGGER G.T., LIN H.C., 1999. *Biological Wastewater Treatment*, Marcel Dekker, Inc., New York.
5. HEIDRICH ZB., NIEŚCIER A., 1999. Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych. Wyd. PZiITS, Monografie, Seria Wodociągi i Kanalizacja nr 4, Warszawa.
6. HILLS DJ, NIKANO K., 1984. Effects of particle size on anaerobic digestion of tomato solid wastes, *Agric Wastes*, 10: 285-95.
7. IMHOFF K., IMHOFF K.R., 1996. *Kanalizacja miast i oczyszczanie ścieków*. Poradnik. Oficyna Wydawnicza Projprzem-EKO, Bydgoszcz.
8. JÓŹWIAK M., 2009. *Biogazownie TAIEX*.
9. LEESCHBER R., LOLL U., 1996. *Klärschlamm. ATV-Handbuch*. Wyd.4., Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
10. MALINA J.F., POHLAND F.D., 1992. *Design of Anaerobic Processes for the Treatment of Industrial and Municipal Wastes*. Technomic Publishing Co. Inc, 7: 3-33.
11. MSHANDETE A., BJÖRNSSON L., KIVAISIA A.K., RUBINDA-MAYUGIA M.S.T., MATTIASSON B., 2006. Effect of particle size on biogas yield from sisal fibre waste, *Renewable Energy*, 31: 2385-2392.
12. ONISZK-POPLAWSKA A., MROCZKOWSKI P., 2010. Stan i kierunki rozwoju sektora biogazu w Polsce, *Czysta Energia*, 7-8.
13. PZiITS, 1997. *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*, ISBN 83-902173-5-X, Poznań.

14. PALMOWSKI L., MÜLLER J., 1999. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic, in: Mata-Alvarez J., Tilche A., Cecchi F. (Eds.), Proceedings of the Second International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Wastes, Barcelona, I: 136-144, 15-18 June 1999.
15. PALMOWSKI L., MÜLLER J., 2000. Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion, Water Sci. Technol., 41 (3): 155-162.
16. PALMOWSKI L., MÜLLER J., 2003. Anaerobic degradation of organic materials – significance of the substrate surface area, Water Sci. Technol., 47 (12): 231-238.
17. SHARMA, S.K., MISHRA, I.M., SHARMA, M.P., SAINI, J.S., 1988. Effect of particle size on biogas generation from biomass residues, Biomass, 17: 251-263.
18. THOMÉ-KOZMIENSKY K.J., 1995. Biologische Abfallbehandlung. EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin.

INFLUENCE OF MEAT SIZE REDUCTION ON THE YIELD OF DIGESTION PROCESS

S u m m a r y

This article presents the results of research on the impact of fragmentation on performance of meat methane fermentation process, performed under meso-and thermophilic. It has been shown that in mesophilic fermentation and thermophilic fragmented waste is not significantly affected by the amount and composition of the produced biogas. It is noted, however, that the production of biogas in mesophilic conditions compared to thermophilic conditions was 2.0 to 2.6 times greater.

Key words: mesophilic fermentation, termophilic fermentation, biogas, meat