

**ANDRZEJ JĘDRCZAK, DARIUSZ KRÓLIK\***

**WPLYW STOPNIA ROZDROBNIENIA KOLB KUKURYDZY  
NA WYDAJNOŚĆ PROCESU FERMENTACJI**

*Streszczenie*

*W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu rozdrobnienia kolb kukurydzy na wydajność procesu fermentacji metanowej, prowadzonej w warunkach mezo- i termofilowych. Wykazano, że w procesie fermentacji mezofilowej produkcja biogazu rosła praktycznie liniowo ze wzrostem stopnia rozdrobnienia odpadu, natomiast dla fermentacji termofilowej rozdrobnienie odpadu nie wpływało znacząco na ilość i skład wyprodukowanego biogazu oraz stopień przereagowania odpadów.*

Słowa kluczowe: fermentacja mezofilowa, fermentacja termofilowa, biogaz, kolby kukurydzy

**WSTĘP**

Wpływem rozdrobnienia odpadów na przebieg ich fermentacji zajmowali się Hills i in. [Hills i in. 1984] oraz Palmowski i Müller [Palmowski i Müller 1999, 2000, 2003]. Stwierdzili oni, że zmniejszenie rozmiarów cząstek odpadów i wynikające stąd zwiększenie ich powierzchni właściwej powoduje wzrost szybkości tej fazy procesu. Efektem jest zwiększenie produkcji gazu, zwłaszcza w przypadku fermentacji substratów o wysokiej zawartości materiałów włóknistych, o niskiej podatności na rozkład biologiczny. Zależność między powierzchnią właściwą cząstek i produkcją gazu jest nieliniowa. W przypadku małych cząstek, o powierzchni właściwej większej niż 20 m<sup>2</sup>/kg wpływ ten jest niewielki, rośnie natomiast gwałtownie przy rozdrabnianiu cząstek dużych, o powierzchni właściwej od 3 do 20 m<sup>2</sup>/kg [Palmowski i Müller 1999]. Wzrost szybkości produkcji gazu prowadzi do skrócenia czasu fermentacji, co stwarza możliwość zmniejszenia wielkości komory bez strat w produkcji gazu. Nega-

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska, Zakład Technologii Wody, Ścieków i Odpadów

tywnym efektem rozdrobnienia cząstek jest wzrost oporu właściwego prefermentowanych odpadów, istotny przy ich odwadnianiu.

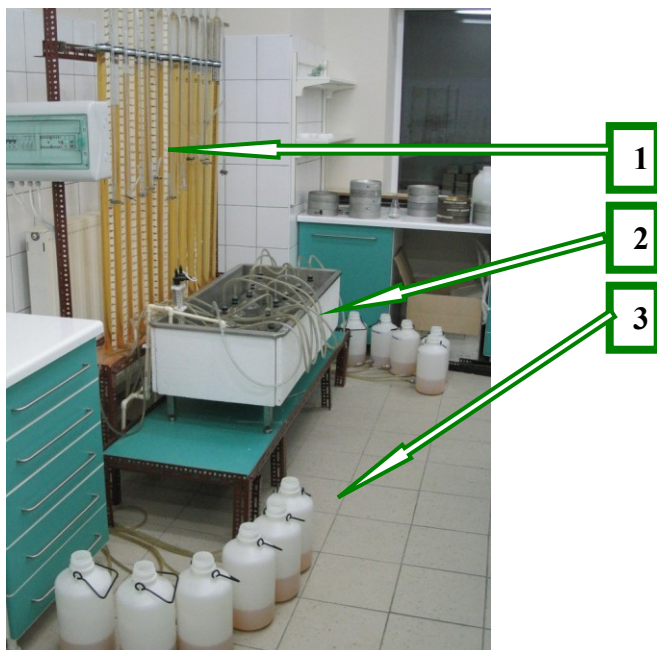
W ostatnich latach, w instalacjach budowanych przy małych i średnich gospodarstwach rolnych kukurydza jest jednym z ko-substratów fermentowanych z odchodami zwierzęcymi. Jest to materiał o wysokim potencjale gazowym [Sygit 2005 za Hildebrand, Jędrzak 2007].

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

### METODYKA BADAŃ

Badania wykonano w skali laboratoryjnej, w 12 stanowiskowym „fermentatorze” do fermentacji okresowej (fot. 1). Każde stanowisko składa się z trzech elementów:

- biurety gazowej do pomiaru ilości wyprodukowanego biogazu (1),
- komory fermentacyjnej (reaktora) - butla o pojemności 1 dm<sup>3</sup> (2),
- butli z nasyconym roztworem chlorku sodu do wyrównywania ciśnień (3).



Fot. 1. Stanowisko do badań  
Phot. 1. The test stand

Reaktory po napełnieniu surowcem, dokładnym jego wymieszaniu i usunięciu powietrza łączono szczelnie z biuretami gazowymi i ustawiano w wannie fermentatora (termostacie). Termostat stanowiła metalowa wanna wypełniona wodą. 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). Termostat zapewniał utrzymywanie temperatury mieszaniny w reaktorach z dokładnością 1 st. Celsjusza.

Próbki do badań stanowiły mieszaniny następujących składników:

- kolby kukurydzy, rozdrobnione do ziaren w kształcie sześciangu o różnych wymiarach (tab. 1),
- materiał zaszczepiający – osad przefermentowany z WKFz oczyszczalni ścieków w Gubin-Guben,
- bufor – wodorowęglan sodu, dodawany w celu buforowania wsadu,
- woda.

Tab. 1. Wymiary i powierzchnia ziarna

Tab. 1. Dimensions and grain size

Numer próbki	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6
Parametry					
Stopień rozdrobnienie, sześciang o boku w mm	ok. 1	2,5	5,0	10,0	15,0
Powierzchnia ziarna w mm <sup>2</sup>	6	37,5	150	600	1350

Dla każdej próbki przygotowano równoległe dwa reaktory. Reaktory oznaczone numerem P-1 były próbkami kontrolnymi (bez odpadu) służącymi do określenia endogennej aktywności materiału zaszczepiającego. Kolejne reaktory, którym nadano oznaczenia od P-2 do P-6, zawierały ziarna kolb kukurydzy o odpowiednim rozdrobnieniu. Skład mieszanin przedstawiono w tabeli 2.

Fermentację mezofilową prowadzono przez 25 dni w temperaturze ok. 36°C a termofilową przez 26 dni w temperaturze ok. 56°C. Każdego dnia w czasie trwania doświadczeń mierzono objętość wytworzonego biogazu, analizowano skład chemiczny gazu (w tym: metanu, ditlenku węgla i tlenu) – o ile objętość wyprodukowanego biogazu na to pozwalała – oraz kontrolowano temperaturę procesu. Skład gazu oznaczano aparatem ALTER WAG-1, po nagromadzeniu się go w kolumnie w ilości umożliwiającej dokonanie pomiaru.

Właściwości fermentowanego materiału kontrolowano przed i po fermentacji oznaczając w próbkach m.in.: suchą masę, suchą masę organiczną, OWO (ogólny węgiel organiczny), ChZT (chemiczne zapotrzebowanie na tlen). Oznaczenia wykonano zgodnie z metodami określonymi w PN.

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	-	0,0108	-	0,0115
Osad ściekowy	dm <sup>3</sup>	0,700	0,700	0,700	0,700
	kg sm	0,0133	0,0133	0,0170	0,0170
Bufor	dm <sup>3</sup>	0,133	0,133	0,133	0,133
Woda	dm <sup>3</sup>	0,167	0,156	0,167	0,156
Objętość próbki	dm <sup>3</sup>	1,000	1,000	1,000	1,000
Zawartość sm osadów i odpadów	%	1,33	2,41	1,70	2,85
Iloraz smo odpadów i smo osadów		-	0,99	-	1,06

## WYNIKI BADAŃ

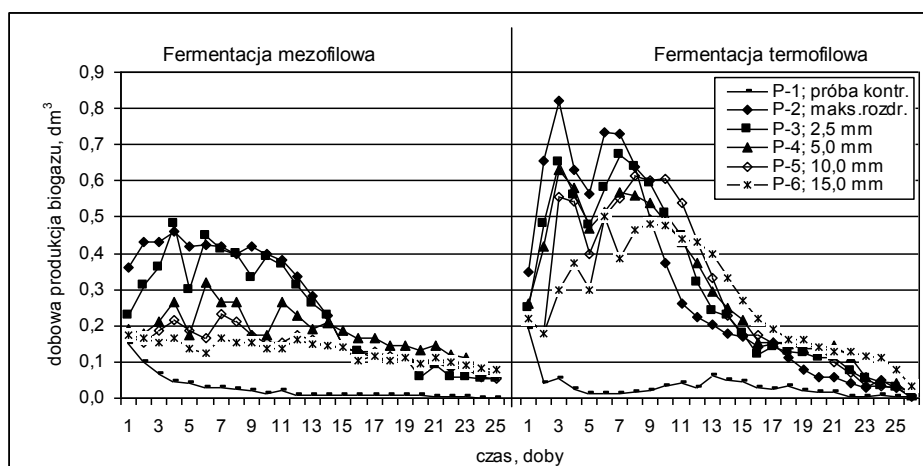
### Produkcja i skład biogazu

Prezentowane wyniki są wartościami średnimi z dwóch równocześnie prowadzonych pomiarów. Zmiany dobowej produkcji biogazu w procesie fermentacji mezofilowej próbek P-2 i P-3 były podobne (rys. 1). Produkcja biogazu dla próbki P-2 utrzymywała się na poziomie ok. 0,400 dm<sup>3</sup>/d w okresie od 1 do 11 doby, z wartością maksymalną 0,460 dm<sup>3</sup>/d w 4 dobie doświadczenia, natomiast dla próbki P-3, w dniach od 3 do 11 produkcja biogazu oscylowała wokół wartości 0,400 dm<sup>3</sup>/d, osiągając produkcję maksymalną (0,480 dm<sup>3</sup>/d) także w 4 dobie. Między 12 a 17 dobą produkcja biogazu malała szybko do wartości ok. 0,120 i 0,110 dm<sup>3</sup>/d dla P-2 i P-3 kolejno, potem wolniej do poziomu 0,065 i 0,055 dm<sup>3</sup>/d w ostatnim dniu trwania doświadczenia.

Dla próbki P-4 maksymalną dobową produkcję gazu odnotowano w 6 dniu - 0,319 dm<sup>3</sup>/d. Od 7 doby produkcja biogazu malała, z małymi wahaniami i w 25 dniu trwania procesu spadła do poziomu 0,070 dm<sup>3</sup>/d. Przebieg dobowej produkcji biogazu z pozostałych próbek (P-5 i P-6) był podobny. Dobowa produkcja biogazu z próbki kontrolnej najpierw szybko spadła od wartości 0,150 dm<sup>3</sup>/d w pierwszym dniu do 0,045 dm<sup>3</sup>/d w 4 dniu, a następnie malała wolno do zatrzymania procesu w 24 dniu badania.

Produkcja biogazu w testach fermentacji termofilowej była znacznie wyższa niż podczas fermentacji mezofilowej. Obserwowano również większe wahania produkcji dobowej. Dla fermentacji termofilowej odnotowano dwa maksima produkcji biogazu. Pierwsze zaobserwowano w 3 dobie dla próbek od P-2

(0,820 dm<sup>3</sup>/d) do P-5 (0,555 dm<sup>3</sup>/d). Dla próbki P-6 wystąpiło ono dopiero w 6 dniu – 0,500 dm<sup>3</sup>/d. Drugie maksimum stwierdzono w różnym czasie: dla P-2 (0,735 dm<sup>3</sup>/d) – w 6 dobie; dla P-3 (0,670 dm<sup>3</sup>/d) i P-4 (0,570 dm<sup>3</sup>/d) – w 7 dobie; dla P-5 (0,615 dm<sup>3</sup>/d) – w 8 dobie i dla P-6 (0,480 dm<sup>3</sup>/d) – w 9 dobie. Po osiągnięciu II maksimum rozpoczął się spadek produkcji biogazu ze wszystkich próbek. Spadek był dość gwałtowny i w rezultacie produkcja biogazu w ostatnim dniu badań wahała się od 0,005 (P-5) do 0,035 (P-6) dm<sup>3</sup>/d.



Rys. 1. Dobowa produkcja biogazu z kolb kukurydzy o różnym rozdrobnieniu w procesie fermentacji mezo- i termofilowej.

Fig. 1. Daily production of biogas generated by mesophilic and thermophilic digestion of corn kolb of various size reduction

W pierwszej dobie produkcja gazu z próbki kontrolnej wynosiła 0,190 dm<sup>3</sup>. Pomiędzy 1 a 2 dobą nastąpił gwałtowny jej spadek i niski poziom dobowej produkcji gazu utrzymał się do końca badań.

W tabeli 3 przedstawiono średnie zawartości metanu w biogazie z procesów fermentacji mezofilowej (górna część tabeli) i termofilowej (dolna część tabeli).

Podczas fermentacji mezofilowej skład chemiczny biogazu mierzono 4-krotnie dla próbek P-2 i P-3, w 3, 7, 14 dobie i ostatnim dniu trwania doświadczenia oraz 3-krotnie w próbach: od P-4 do P-6.

Stężenia metanu w biogazie rosły wraz z czasem trwania doświadczeń. Najwyższe ilości metanu zawierał gaz wytworzony po 15 dobie trwania badań. Stężenia metanu wahały się w granicach od 61 do 64%(v/v) dla fermentacji metanowej i od 71 do 80%(v/v) dla fermentacji termofilowej.

Dla próbek kontrolnych (P-1) udział metanu w biogazie wynosił 80 i 82%(v/v).

Właściwości fizyczno-chemiczne mieszanin przed i po procesie fermentacji

Stopień rozkładu substancji organicznych zawartych w kolbach kukurydzy 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 4.

Tab. 3. Średnie zawartości metanu w biogazie z procesów fermentacji mezo- i termofilowej

Table 3. Average methane contents in the biogas produced by mesophilic and thermophilic digestion

Numer próbki	Zawartość metanu w % (v/v), w kolejnych dniach badań																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Fermentacja mezofilowa																										
P-1	80																									-
P-2	53		47		54			61															-			
P-3	46		43		52			69															-			
P-4	56		54			62															-					
P-5	59		60			70															-					
P-6	59		58			64															-					
Fermentacja termofilowa																										
P-1	82																									
P-2	28	31	48	68	72	79																				80
P-3	31	31	42	57	67	70																				79
P-4	33	30	42	56	64	71																				76
P-5	42	34	41	52	65	69																				76
P-6	33	34	38	48	62	64																				71

W przypadku fermentacji kolb kukurydzy stopień rozkładu odpadów wyrażnie malał ze wzrostem wielkości cząstek jedynie w doświadczeniach prowadzonych w warunkach mezofilowych. Zawartość suchej masy organicznej w próbkach zmniejszała się o od 24,1 (P-6) do 53,8% (P-2), suchej masy – od 23,1 (P-6) do 55,9% (P-2), stężenie OWO – od 25,6 (P-6) do 64,2% (P-2), a wartość ChZT o od 40,5 (P-6), aż do 82,6% (P-2). W procesie fermentacji termofilowej w porównaniu z fermentacją mezofilową stopnie rozkładu suchej masy, suchej masy organicznej oraz mierzone wartościami OWO i ChZT były bardzo wysokie i w małym stopniu zależały od wielkości cząstek odpadów. Różnice wskaźników dla próbek o maksymalnym i najmniejszym rozdrobnieniu wynosiły o od około 5% (zmniejszenie suchej masy i suchej masy organicznej) do około 9% pozostałe wskaźniki.

Tab. 4. Stopień rozkładu suchej masy, suchej masy organicznej, OWO oraz zmniejszenie wartości ChZT podczas fermentacji mezofilowej i termofilowej próbek kolb kukurydzy

Table 4. 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 corn kolb

Numer próbki	Stopień rozkładu, %							
	Fermentacja mezofilowa				Fermentacja termofilowa			
	sm	smo	OWO	ChZT	sm	smo	OWO	ChZT
P-2	55,9	53,8	64,2	82,6	56,8	59,7	72,8	79,5
P-3	50,6	47,5	58,0	72,7	54,3	59,7	73,5	78,9
P-4	36,9	36,7	43,2	56,2	54,3	58,8	71,6	78,6
P-5	26,0	26,9	33,1	43,0	53,0	58,9	69,3	76,7
P-6	23,1	24,1	25,6	40,5	51,9	54,9	63,8	71,4

#### DYSKUSJA WYNIKÓW

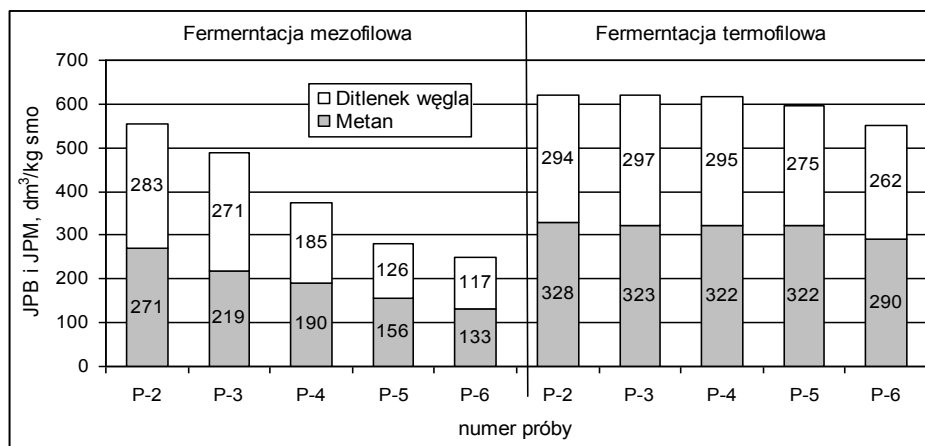
Na rysunku 2 przedstawiono wartości jednostkowej produkcji biogazu (JPB) i metanu (JPM) wyrażone w  $\text{dm}^3/\text{kg smo}$  wyznaczone w badaniach fermentacji kolb kukurydzy, o różnym uziarnieniu, w warunkach mezo- i termofilowych. JPB z kolb kukurydzy o maksymalnym rozdrobnieniu (P-2) w procesie fermentacji mezofilowej wynosiła  $554 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$ , a podczas fermentacji termofilowej  $622 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$ . Wraz ze wzrostem wymiarów ziaren odpadów JPB w procesie fermentacji mezofilowej zmalała ponad 2-krotnie, do  $250 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$  dla P-6, podczas gdy w procesie fermentacji termofilowej zmalała zaledwie o 11% do wartości  $552 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$  dla próbki P-6.

JPB z kolb kukurydzy o maksymalnym rozdrobnieniu (P-2) w procesie fermentacji mezofilowej wynosiła  $554 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$ , a podczas fermentacji termofilowej  $622 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$ . Wraz ze wzrostem wymiarów ziaren odpadów JPB w procesie fermentacji mezofilowej zmalała ponad 2-krotnie, do  $250 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$  dla P-6, podczas gdy w procesie fermentacji termofilowej zmalała zaledwie o 11% do wartości  $552 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$  dla próbki P-6.

JPM z kolb kukurydzy podczas ich fermentacji mezofilowej wahała się od 133 (P-6) do 271 (P-2)  $\text{dm}^3/\text{kg smo}$  (rys. 2, lewa strona) a podczas fermentacji termofilowej była praktycznie stała dla próbek P-2 ÷ P-5 (od 322 do 328  $\text{dm}^3/\text{kg smo}$ ), a dla próbki P-6 zmalała tylko o ok. 10% ( $290 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$ ) – prawa strona rys. 2.

Informacje na temat produkcji biogazu pozyskiwanego z kukurydzy są zróżnicowane. Z kiszonki kukurydzy można uzyskać  $170\text{-}200 \text{ dm}^3/\text{kg}$  masy

mokrej (450-700 dm<sup>3</sup>/kg smo), o zawartości metanu 50-55% (v/v) [Institut für Energetik 2004]. Podobne dane podaje Jędrzak [Jędrzak 2007] – z kukurydzy uzyskuje się od 610-640 m<sup>3</sup>/kg smo o zawartości 53% metanu. Według Hillebranda, produkcja biogazu ze zmiksowanych kolb kukurydzy wynosi 400-600 dm<sup>3</sup>/kg smo substratu. Wartości JPB i JPM uzyskane w przeprowadzonych badaniach dla próbki o rozdrobieniu maksymalnym były o około 10% wyższe niż podawana przez Hillebranda i o około 10% niższe niż podane przez Jędrzaka [2007] dla kiszonki kukurydzy.



Rys. 2. Jednostkowa produkcja biogazu w procesie mezofilowej i termofilowej fermentacji kolb kukurydzy

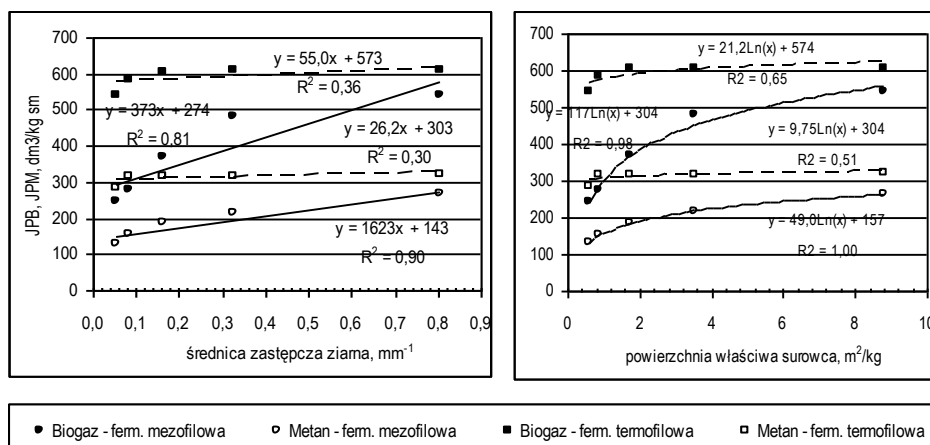
Fig. 2. Single biogas production during mesophilic and thermophilic digestion of the corn cobs

Na rys. 3 przedstawiono zależności JPB i JPM od średnicy zastępczej ziarna oraz od powierzchni właściwej fermentowanych próbek odpadów. Średnicę zastępczą ziarna 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 (lewa strona rysunku 3).

Wskaźniki korelacji dla fermentacji mezofilowej były bardzo wysokie: 0,81 dla JPB i 0,90 dla JPM. Dla kolb kukurydzy, fermentowanych w warunkach termofilowych, współczynniki korelacji były wyraźnie niższe i wynosiły 0,36 dla JPB i 0,30 dla JPM.





Rys. 3. Zależności jednostkowej produkcji biogazu i metanu od średnicy zastępczej ziarna oraz od powierzchni właściwej kolb kukurydzy

Fig. 3. Dependence between single biogas and methane production and hydraulic diameter and specific surface area of corn kolb

Zależności JPB i JPM w badanym zakresie rozdrobnienia odpadów od powierzchni właściwej odpadów najlepiej opisuje funkcja logarytmiczna w postaci  $y = a \cdot \ln(x) + b$  (prawa strona rysunku 3)

Wartości wskaźników korelacji dla fermentacji mezofilowej wynosiły 0,98 dla JPB i 1,00 dla JPM, a dla fermentacji termofilowej 0,65 dla JPB i 0,51 do JPM. Na nieliniowy charakter zależności między powierzchnią właściwą cząstek i produkcją gazu wskazywali wcześniej Palmowski i Müller [1999].

## WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają stwierdzić, że rozdrobnienie odpadów kolb kukurydzy korzystnie wpływa na efektywność ich fermentacji. W procesie fermentacji mezofilowej produkcja biogazu rośnie praktycznie liniowo ze wzrostem stopnia rozdrobnienia substratu, gdy podczas dla fermentacji termofilowej rozdrobnienie odpadu nie miało istotnego znaczenia.

## LITERATURA

1. HILLS DJ, NIKANO K.: Effects of particle size on anaerobic digestion of tomato solid wastes, *Agric Wastes* 1984, 10: 285-95
2. Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Handreichung biogasgewinnung und - nutzung, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Leipzig 2004

3. JĘDRZAK A.: *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. PWN, Warszawa 2007
4. PALMOWSKI L., MÜLLER J.: 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, 15-18 June 1999, I: 136-144
5. PALMOWSKI L., MÜLLER J.: Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion, *Water Sci. Technol.* 2000, 41 (3): 155-162
6. PALMOWSKI L., MÜLLER J.: Anaerobic degradation of organic materials – significance of the substrate surface area, *Water Sci. Technol.*, 2003, 47 (12): 231-238
7. SYGIT M.: *Przetwarzanie odpadów i produktów roślinnych w biogazowniach – aspekty ekonomiczne*. SYGMA Sp. z o.o. Wrocław. Mat. Sympozjum “Metanizacja gospodarki na rzecz proinnowacyjnego rozwoju Dolnego Śląska” Dolnośląskie Centrum Zaawansowanych Technologii, Politechnika Wrocławska, 2005

## **INFLUENCE OF KOLB CORN SIZE REDUCTION ON THE YIELD OF DIGESTION PROCESS**

### *S u m m a r y*

*In this article have been presented the results of the impact of fragmentation colb of corn on productivity of methane during fermentation process, carried out under conditions of meso- and thermophilic. It was shown that the biogas production during mesophilic fermentation almost linearly increased with increasing fineness of the waste, while for the thermophilic digestion of waste, fragmentation was not significantly affected the quantity and composition of biogas production and the degree of conversion of waste.*

Key words: mesophilic fermentation, termophilic fermentation, biogas, corn of colb