

## **WPLYW PREPARATU BAKTERYJNO-ENZYMATYCZNEGO LACTACEL-W NA PROCESY ZAKISZANIA I FERMENTACJI METANOWEJ WYSŁODKÓW BURACZANYCH**

**Bożenna Poleć, Andrzej Baryga, Tomasz Szymański, Małgorzata Kowalska**  
Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Wacława Dąbrowskiego  
Oddział Cukrownictwa  
Zakład Analityki Cukrowniczej i Technologii Cukru  
05-080 Leszno, ul. Inżynierska 4  
b.polec@inspcukr.pl

### **Streszczenie**

Celem pracy było określenie wpływu preparatu bakteryjno-enzymatycznego LACTACEL-W na proces zakiszania wysłodków buraczanych oraz na przebieg fermentacji metanowej tak zakiszonego substratu. Założonym efektem pracy było opracowanie wytycznych do zaprojektowania pilotażowej biogazowni, gwarantującej wytwarzanie wysokoenergetycznego biogazu o zawartości ponad 50% metanu i redukcję zawartości substancji organicznych w wysłodkach do poziomu poniżej 40% suchej masy.

Przeprowadzono badania porównawcze efektywności zakiszania wysłodków w sposób tradycyjny bez dodatku preparatu i zakiszania z dodatkiem preparatu bakteryjno-enzymatycznego LACTACEL-W.

Wykonano w skali mikrotechnicznej badania porównawcze procesu ciągłej fermentacji metanowej wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny i z wykorzystaniem preparatu LACTACEL-W. Określono podstawowe parametry i efekty fermentacji metanowej wysłodków, w tym wydajność i jakość biogazu uzyskiwanego w tym procesie.

Stwierdzono korzystny wpływ preparatu LACTACEL-W zarówno na proces zakiszania wysłodków, jak i na efekty fermentacji metanowej.

**Słowa kluczowe:** wysłodki buraczane, preparat LACTACEL-W, zakiszanie wysłodków, fermentacja metanowa, biogaz

## **INFLUENCE OF THE ENZYMATIC-BACTERIAL LACTACEL-W PREPARATION ON THE ENSILAGE PROCESSES AND METHANE FERMENTATION OF THE SUGAR BEET PULPS**

### **Summary**

The aim of this work was to determine the influence of the LACTACEL enzymatic-bacterial preparation upon the process of sugar beet pulps ensilage and upon the course of the concomitant methane fermentation process. The intended effect of this work was to determine the guidelines for the planned pilot biogas plant, which could guarantee production of the high energy biogas with the methane content of 50% and the reduction of the organic substances components in sugar beet pulp below the 40% of the dry mass.

Comparative researches of the ensilage effectiveness were performed in a traditional manner – ensilage without the tested preparation and with the enzymatic-bacterial preparation LACTACEL-W.

Comparative studies at the microtechnical level of the continuous methane fermentation of the sugar beet pulps were performed in a traditional manner and with the use of LACTACEL-W preparation. Basic parameters and methane fermentation effects, including yield and quality of the gas obtained through this process were determined.

**Key words:** sugar beet pulp, LACTACEL-W preparation, beet pulp ensilage, methane fermentation, biogas

### **WPROWADZENIE**

Wysłodki buraczane przez wiele lat były cenną paszą dla przeżuwaczy, ale w ostatnich latach radykalnie spadło zapotrzebowanie na te produkty uboczne powstające w cukrowniach. Wiele cukrowni ma kłopoty z zagospodarowaniem wysłodków. W ekstremalnych sytuacjach są one wywożone do lasu jako pasza dla dzikich zwierząt. Dzieje się tak na skutek znaczącego spadku pogłowia bydła w Polsce i zastosowania w jego żywieniu innych pasz. Opracowanie zatem metod wykorzystania wysłodków innych niż paszowe ma dla przemysłu cukrowniczego znaczenie gospodarcze.

Zbiogazowanie biomasy może przynieść obok efektów ekonomicznych (produkcja wysokoenergetycznego biogazu) i środowiskowych (zagospodarowanie odpadów) również korzyści społeczne [Brzeziński 2011; Janczur 2009; Jabłoński, Wnuk 2009]. Powstanie biogazowni niewykorzystanych wysłodków stworzy możliwość zagospodarowania nieczynnych urządzeń produkcyjnych i zatrudnienia pewnej liczby pracowników pozbawionych aktualnie

pracy.

Zainteresowane budową tego typu biogazowni są zarówno cukrownie wchodzące w skład koncernu Polski Cukier, jak i cukrownie z koncernów niemieckich działających na terenie Polski (Zuedzucker i Pfeifer und Langen).

Obecnie głównym źródłem biogazu w procesie fermentacji metanowej w biogazowniach na świecie są najczęściej odpady komunalne [Białowiec i in. 2008; Magrel 2004; Sadecka, Myszograj 2008; Sadecka 2009; Witek 2008]. Często stosuje się również kiszunki z roślin, np. kukurydzy, traw czy roślin energetycznych [Kacprzak, Krzysiak 2007; Lewandowski 2006; Mięka 2008; Oniszk-Popławska i in. 2003; Podkówa 1974; Stepa 1992; Witek 2008]. Rzadziej wykorzystywane są odpady z różnych gałęzi przemysłu rolno-spożywczego [Felde 2008; Gancarz 2007; Ledakowicz, Krzystek 2005; Sygit 2005; Kacprzak, Krzysiak 2007].

Biogaz może być wykorzystywany na bardzo wiele sposobów, podobnie jak gaz ziemny, np. przez konwersję do paliw płynnych czy ustandaryzowanie do sieci gazu ziemnego [Denisiuk 2005, Piątek 2005, Sygit 2005]. Najczęściej jednak wyprodukowany biogaz, po usunięciu siarkowodoru, jest kierowany do silnika gazowego, w którym energia chemiczna biogazu ulega konwersji na energię elektryczną oraz ciepłą [Skorek, Kalina 2005]. Część uzyskanej energii jest przeznaczana na pokrycie potrzeb własnych biogazowni, pozostała sprzedawana jest odbiorcom zewnętrznym.

Mimo wyraźnej tendencji do wzrostu produkcji biogazu z odpadów organicznych, w przemyśle cukrowniczym nadal brakuje odpowiedniej wiedzy i technologii. Są nieliczne dane literaturowe informujące o przetwarzaniu na biogaz buraków cukrowych uprawianych z założeniem ich wykorzystania nie do produkcji cukru, a do wytwarzania energii [Felde 2008]. Nieliczne są doniesienia literaturowe dotyczące biogazowni dla wysłodków [Gancarz 2007; Połec i in. 2009; Połec i in. 2010; Połec i in. 2011].

Rozwój rynku doprowadził do powstania wielu odmiennych rozwiązań technicznych dostosowanych do różnorodnych potrzeb użytkowników. Brakuje jednak przeglądu w zakresie technologii rozwojowych dostępnych aktualnie na rynku, który byłby niezależny od interesu firm i wsparty argumentami naukowymi. Nie ma także informacji dotyczących przygotowania odpadów do fermentacji, w tym m.in. optymalnego sposobu ich zakiszania. Istnieją wprawdzie publikacje na temat różnych sposobów zakiszania wysłodków z przeznaczeniem na paszę, ale brakuje danych, które z nich byłyby odpowiednie do przygotowania wysłodków do fermentacji metanowej [Kowalska i in. 1999; Kowalska 2006; Zielińska, Miecznikowski 1996].

Z piśmiennictwa wiadomo, że preparat bakteryjno-enzymatyczny LACTACEL-W

stosowany jest z dobrym efektem do zakiszania wysłódków, z przeznaczeniem ich na paszę [Zielińska, Miecznikowski 1996]. Celem pracy było określenie wpływu tego preparatu na proces zakiszania wysłódków buraczanych oraz na przebieg fermentacji metanowej tak zakiszonego substratu.

Założonym efektem pracy było opracowanie wytycznych do zaprojektowania pilotażowej biogazowni, gwarantującej wytwarzanie wysokoenergetycznego biogazu o zawartości ponad 50% metanu i redukcję zawartości substancji organicznych w wysłódkach do poziomu poniżej 40% suchej masy.

### MATERIAŁ I METODY BADAŃ

Materiał do badań stanowiły wysłódki buraczane: zakiszone w sposób tradycyjny bez dodatku preparatu i zakiszone z preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL-W.

Jakość chemiczną wysłódków buraczanych, stanowiących materiał do badań fermentacji, przedstawia tabela 1.

**Tabela 1.** Jakość wysłódków stanowiących materiał do badań fermentacji metanowej  
*Quality of beet pulp used as the material for studying the methane fermentation process*

Oznaczenie	Jednostki	Wartości oznaczeń	
		Wysłódki zakiszone bez preparatu LACTACEL-W	Wysłódki zakiszone z preparatem LACTACEL-W
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Sucha masa	% śm	19,90	18,90
Popiół surowy	% sm	3,8	5,7
Substancje organiczne	% sm	96,2	94,3
Białko ogólne	g/kg sm	96,5	127,5
Tłuszcz surowy	g/kg sm	8,0	10,1
Włókno surowe	g/kg sm	228,0	202,0
Bezazotowe substancje wyciągowe	g/kg sm	655,3	577,2
Białko przyswajalne	g/kg sm	55,0	72,7
Tłuszcze przyswajalne	g/kg sm	7,0	8,8
Węglowodany przyswajalne	g/kg sm	603,8	583,8
Teoretyczna maksymalna wydajność biogazu	dm <sup>3</sup> /kg sm	530	524
	dm <sup>3</sup> /kg smo	551	558

Objaśnienia do tabeli: śm – świeża masa, Sm – sucha masa, smo – sucha masa organiczna

Do zaszczepienia fermentorów stosowano osad z komory fermentacji metanowej ścieków, pracującej w cukrowni. Stosowano osad w stężeniu  $30 \text{ g sm/dm}^3$  reaktora, o zawartości 34,8% części organicznych i aktywności biochemicznej wynoszącej 15 mg usuwanego ChZT przez 1 g suchej masy w ciągu doby.

Badania fermentacji ciągłej prowadzono w skali mikrotechnicznej w fermentorze o pojemności roboczej wynoszącej  $40 \text{ dm}^3$ . Reaktor był wyposażony w łopatkowe mieszadło wolnoobrotowe. Stosowano ciągłe zasilanie pulpą z surowców fermentacji za pomocą pompki perystaltycznej. Odpływ z fermentora (w ilości doprowadzonej pulpy buraczanej) odprowadzany był do zbiornika pofermentacyjnego, również z użyciem pompki perystaltycznej. Fermentor był umieszczony w płaszczu wodnym o pojemności  $80 \text{ dm}^3$ , w którym woda ogrzewana była za pomocą grzałek akwaryjnych. Temperatura w fermentorze była utrzymywana automatycznie poprzez odpowiednią regulację temperatury wody w płaszczu wodnym (włączanie – wyłączanie grzałek). Odczyn w fermentorze był automatycznie regulowany do poziomu 6,8 pH poprzez uruchamianie pompki perystaltycznej dozującej roztwór sody kaustycznej do zadanej wartości pH. Ilość biogazu wydzielającego się w procesie fermentacji była mierzona w sposób ciągły, z zastosowaniem licznika biogazu.

Badania wpływu preparatu na jakość kiszonki z wysłodków buraczanych obejmowały próby zakiszania wysłodków bez preparatu – próba kontrolna oraz z preparatem dozowanym w dawce 1 g/1 kg wysłodków. Ocenę kiszonek prowadzono, analizując po 8 tygodniach ich jakość na podstawie badań organoleptycznych oraz oznaczenia odczynu i zawartości kwasów: mlekowego, masłowego i octowego. Przeprowadzono ocenę otrzymanych kiszonek na podstawie klucza według Fliega-Zimmera, uwzględniając udział procentowy kwasów: mlekowego, octowego i masłowego w ogólnej ilości kwasów.

Przygotowanie poszczególnych substratów do przeprowadzenia prób fermentacji metanowej polegało na sporządzeniu z nich płynnej pulpy. W tym celu odważano określoną ilość poszczególnych surowców i dodawano przefermentowane ścieki. Powstałą mieszaninę dokładnie rozdrabniano w mikserze. Przed rozpoczęciem właściwych badań, fermentor po zaszczepieniu aktywnym osadem fermentacyjnym w stężeniu  $30 \text{ g sm/dm}^3$  i uzupełnieniu ściekami o ChZT  $250 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$  do łącznej objętości  $40 \text{ dm}^3$ , ogrzewano i mieszano jego zawartość. Po ustaleniu temperatury na poziomie  $36\text{--}37^\circ\text{C}$  i odczynu na poziomie powyżej 6,8 pH rozpoczynano dozowanie substratów.

Pulpę substratów doprowadzano w sposób ciągły z użyciem pompki perystaltycznej, kolejno w ilości odpowiadającej obciążeniu fermentora suchą masą wysłodków: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 i  $2,00 \text{ g s.m./dm}^3 \times \text{d}$ . Odpowiadało to w przeliczeniu na masę organiczną 0,24;

0,48; 0,72; 0,96; 1,20; 1,44 i 1,68 i 1,92 g smo/dm<sup>3</sup> × d (fermentacja wysłodków buraczanych zakiszonych bez dodatku preparatu) oraz 0,24; 0,47; 0,71; 0,94; 1,18; 1,42 i 1,65 i 1,89 g smo/dm<sup>3</sup> × d (fermentacja wysłodków buraczanych zakiszonych z preparatem).

Obciążenie fermentora zmieniano co 5 dni. Przebieg procesu kontrowano na podstawie pomiarów temperatury, odczynu i ilości wydzielanego biogazu oraz oznaczeń ChZT, suchej pozostałości, zawartości substancji organicznych i mineralnych w odpływie z fermentora. W próbie pobieranej z wnętrza fermentora oznaczano zawartość substancji biogenych (azotu amonowego, azotanowego i azotynowego, organicznego i całkowitego oraz fosforu ogólnego), lotnych kwasów tłuszczowych, alkaliczności i kwasowości.

Podczas badań pobrano próbki wydzielanego biogazu i oceniono jego jakość (zawartość CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, węglowodory nasycone C<sub>2</sub> – C<sub>6</sub> oraz gęstość, ciepło spalania, wartość opałowa, liczba Wobbego) w Instytucie Nafty i Gazu w Warszawie. Wszystkie próby pobierano w końcowej fazie badań fermentacji poszczególnych substratów. Gaz pobierano do pipet gazowych z przewodu odprowadzającego biogaz z fermentora, zgodnie z normą PN-70/OC-84901. Próbki do badań zawartości siarkowodoru przepuszczano przez roztwór absorpcyjny bezpośrednio ze źródła. Biorąc pod uwagę skład biogazu i jego właściwości, kwalifikowano go do określonej podgrupy gazów ziemnych (na podstawie Polskiej Normy PN-C-04753:2002).

Badania prowadzono w oparciu o następujące procedury badawcze:

- odczyn wg procedury badawczej własnej PB-PWG iOŚ-02 (2011),
- ChZT<sub>cr</sub> wg PN-ISO 6060:2006,
- fosfor ogólny wg procedury badawczej własnej PB-PGWiOŚ-03: 2011,
- azot ogólny wg procedury badawczej własnej PB-PGWiOŚ-01: 2011,
- azot Kjeldahla wg PN – EN 25663:2001,
- azot azotanowy wg procedury badawczej własnej PB- PGWiOŚ- 04: 2011,
- azot azotynowy wg procedury badawczej własnej PB-PGWiOŚ-05: 2011,
- azot amonowy wg PN-ISO 5664:2002,
- sucha substancja ogółem, mineralna i organiczna wg PN-C-04541:1978,
- lotne kwasy organiczne wg Hermanowicza i in. – metoda destylacji bezpośredniej,
- alkaliczność wg Hermanowicza i in. – metoda miareczkowa,
- kwasowość wg Hermanowicza i in. – metoda miareczkowa,
- tłuszcz surowy wg Hermanowicza i in. – metoda wagowa (metoda Soxleta),
- białko ogólne wg Hermanowicza i in. – metoda Kjeldahla,
- włókno surowe wg Hermanowicza i in. – metoda wagowa (metoda Wendeńska),

- bezazotowe substancje wyciągowe: wg Hermanowicza i in. – metoda wagowa,
- kwas octowy, mlekowy i masłowy wg BN-74/9162-01,
- skład chemiczny biogazu (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, węglowodory nasycone C<sub>2</sub> – C<sub>6</sub>): metoda chromatografii gazowej z zastosowaniem aparatu Hewlett Packard 5890,
- siarkowodór w biogazie wg BN-59/0541-03/05,
- własności biogazu (gęstość, ciepło spalania, wartość opałowa, liczba Wobbego) – metoda obliczeniowa na podstawie składu chemicznego biogazu.

## WYNIKI I DYSKUSJA

### *Wyniki badań procesu zakiszania wysłodków buraczanych*

Przeprowadzono próby zakiszania wysłodków plantatorskich bez preparatu – próba kontrolna oraz z preparatem dozowanym w dawce 1 g/1 kg wysłodków. Dane porównawcze dotyczące przebiegu procesu zakiszania wysłodków zawiera tabela 2.

**Tabela 2.** Wyniki procesu zakiszania wysłodków buraczanych  
*The results of beet pulp ensilage*

Sposób zakiszania wysłodków	pH	Zawartość kwasów organicznych (%)			Ocena wg Fliega-Zimmera	
		octowy	mlekowy	masłowy	Liczba punktów	Klasa jakości*
Tradycyjny bez dodatku preparatu bakteryjno-enzymatycznego LACTACEL-W	3,98	0,33	2,88	0,03	100	I
Z preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL-W	4,18	0,10	2,92	0,01	100	I

*Objaśnienia do tabeli:*

\* Klasy jakości kiszonek: I – bardzo dobra (80 ÷ 100 punktów), II – dobra (60 ÷ 80 punktów), III – zadowalająca (40 ÷ 60 punktów), IV – mierna (20 ÷ 40 punktów), V – zła (0 ÷ 20 punktów)

Przeprowadzona ocena otrzymanych kiszonek na podstawie klucza wg Fliega-Zimmera wskazywała na prawidłowy przebieg zakiszania wysłodków i otrzymanie kiszonek o bardzo dobrej jakości. Śladowe ilości kwasu masłowego w kiszonkach, zarówno w kiszonce kontrolnej jak i w kiszonce z preparatem, wskazują na właściwy przebieg fermentacji mlekowej w zakiszanych wysłodkach. Należy zwrócić uwagę, że ilość kwasu masłowego była niższa

w kiszonce z preparatem niż w kiszonce bez jego dodatku. Optymalne pH kiszonek wynosi 4,0 do 4,2; takie wartości wykazywały zarówno kiszonka kontrolna jak i kiszonka z dodatkiem preparatu.

Przeprowadzona równoległe po 8 tygodniach silosowania ocena organoleptyczna, obejmująca określenie barwy, zapachu i struktury kiszonek, potwierdziła ich bardzo dobrą jakość. Otrzymane kiszonki uzyskały w ocenie organoleptycznej bardzo wysoką klasę jakości (I), wyrażającą się pełnym zachowaniem struktury wysłoków, ich naturalnej barwy i winno-owocowego zapachu przez cały okres silosowania.

#### ***Wyniki badań technologicznych fermentacji ciągłej wysłoków buraczanych***

Wyniki badań fermentacji ciągłej wysłoków buraczanych zakiszanych w sposób tradycyjny (bez preparatu LACTACEL-W) zamieszczono w tabelach 3 i 4.



**Tabela 3.** Zestawienie średnich, minimalnych i maksymalnych podstawowych parametrów i wskaźników fermentacji ciągłej wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu LACTACEL–W  
*Comparison of the average, minimal and maximal basic parameters and indicators of continuous fermentation of the beet pulp ensilaged without the LACTACEL–W preparation*

Obciążenie fermentora ładunkiem suchej masy wysłodków	Rodzaj danych	Pomiary i oznaczenia											
		Temperatura	Ilość biogazu	ChZT	Odczyn	Sucha masa	Substancje mineralne	Substancje organiczne	Azot ogólny	Fosfor ogólny	Lotne kwasy tłuszczowe	Zasadowość	Kwasowość
g sm /dm <sup>3</sup> × d		°C	dm <sup>3</sup> /d	mg O <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	pH	g /dm <sup>3</sup>	g/dm <sup>3</sup>	g /dm <sup>3</sup>	mg /dm <sup>3</sup>	mg /dm <sup>3</sup>	mg CH <sub>3</sub> COOH /dm <sup>3</sup>	mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	mval/dm <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,25	Średnia	35,6	2,1	105	7,7	24,23	17,31	6,92	42,8	1,6	105	505	1,6
	Minimum	35,0	0,2	72	7,4	23,26	16,98	6,28	42,5	1,4			
	Maksimum	36,1	4,1	162	8,0	25,20	17,64	7,56	43,0	1,8			
0,50	Średnia	36,6	6,5	148	7,3	21,34	15,09	6,25	40,4	1,3	121	950	4,0
	Minimum	35,3	4,4	128	7,3	20,84	14,86	5,98	40,2	1,0			
	Maksimum	38,9	8,6	164	7,4	21,83	15,31	6,52	40,5	1,5			
0,75	Średnia	35,8	11,4	141	7,2	20,87	14,60	6,27	37,4	3,5	114	1140	3,6
	Minimum	35,0	8,8	179	7,2	19,88	13,98	5,90	33,5	2,6			
	Maksimum	36,6	14,2	278	7,3	21,85	15,21	6,64	41,2	4,4			

1,00	Średnia	36,6	18,0	214	7,0	19,47	13,41	6,06	45,4	4,0	156	1550	4,8
	Minimum	35,5	14,2	192	7,0	18,90	12,90	6,00	44,0	3,9			
	Maksimum	37,0	20,8	231	7,0	20,04	13,92	6,12	46,8	4,1			
1,25	Średnia	36,4	23,0	288	7,0	19,55	13,16	6,40	48,7	4,7	167	1750	6,0
	Minimum	35,5	20,0	244	7,0	18,62	12,37	6,25	45,9	4,6			
	Maksimum	37,0	26,1	320	7,1	20,48	13,94	6,54	51,4	4,8			
1,50	Średnia	36,4	27,5	369	7,1	25,31	16,87	8,44	61,7	3,8	168	1600	4,2
	Minimum	35,5	26,1	338	7,0	24,74	16,8	7,94	58,2	3,4			
	Maksimum	36,9	29,3	407	7,2	25,88	16,94	8,94	65,2	4,2			
1,75	Średnia	36,4	28,3	476	7,1	26,83	17,07	9,77	65,4	3,5	203	2820	6,6
	Minimum	35,6	26,0	414	7,1	26,8	16,79	9,52	63,9	2,8			
	Maksimum	37,0	35,1	534	7,1	26,86	17,34	10,01	66,8	4,1			
2,00	Średnia	36,4	29,3	570	7,1	35,31	21,07	14,25	70,7	4,1	219	3310	6,4
	Minimum	35,7	26,4	528	7,0	35,14	20,94	13,95	70,0	3,8			
	Maksimum	37,0	31,8	620	7,2	35,48	21,19	14,54	71,4	4,4			

**Tabela 4.** Zestawienie średnich efektów procesu ciągłej fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu LACTACEL-W  
*Comparison of the average effects of the continuous fermentation of the beet pulp ensilaged without the LACTACEL-W preparation*

Obciążenie fermentora		Usuwany ładunek substancji organicznej wysłodków	Wydajność biogazu
suchą masą wysłodków	suchą masą organiczną wysłodków		
g sm/dm <sup>3</sup> × d	g smo/dm <sup>3</sup> × d	g smo/dm <sup>3</sup> × d	dm <sup>3</sup> /g smo
0,25	0,24	0,16	0,33
0,50	0,48	0,32	0,51
0,75	0,72	0,48	0,59
1,00	0,96	0,62	0,73
1,25	1,20	0,76	0,76
1,50	1,44	0,91	0,76
1,75	1,68	1,01	0,70
2,00	1,92	1,07	0,69

Wyniki badań fermentacji ciągłej wysłodków buraczanych zakiszanych z wykorzystaniem preparatu LACTACEL-W zamieszczono w tabelach 5 i 6.

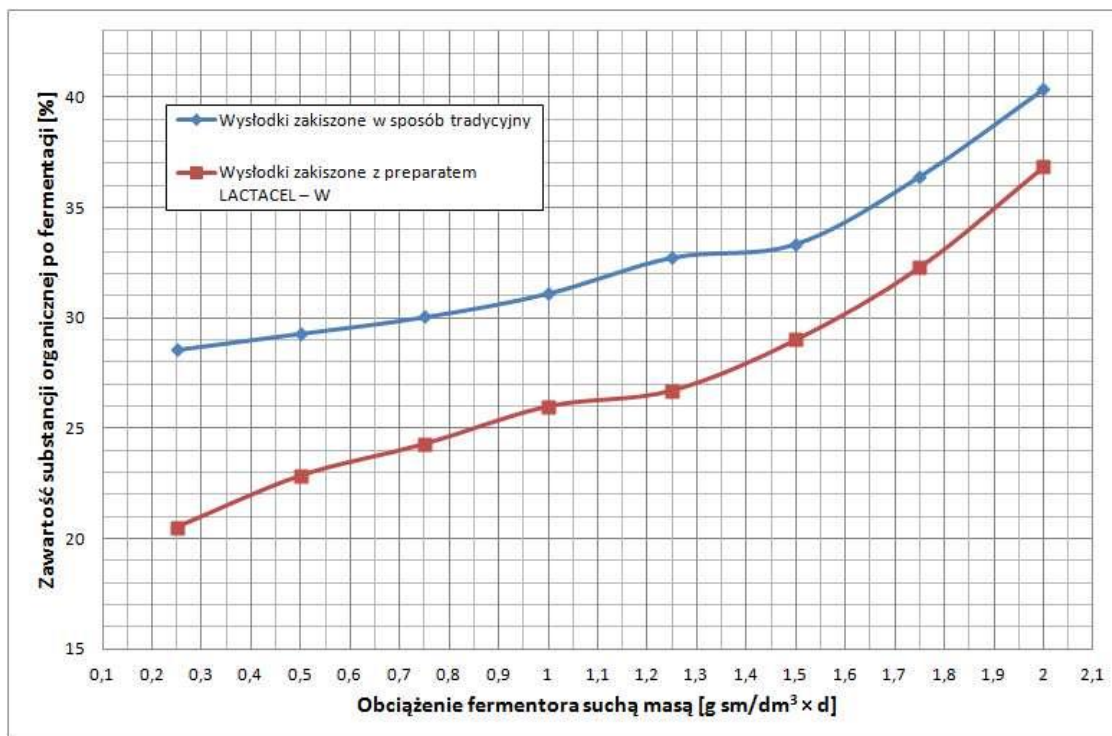
**Tabela 5.** Zestawienie średnich, minimalnych i maksymalnych podstawowych parametrów i wskaźników fermentacji ciągłej wysłodków buraczanych zakiszonych z preparatem LACTACEL–W

*Comparison of average, minimal and maximal basic parameters and indicators of continuous fermentation of beet pulp ensilaged with the LACTACEL–W preparation*

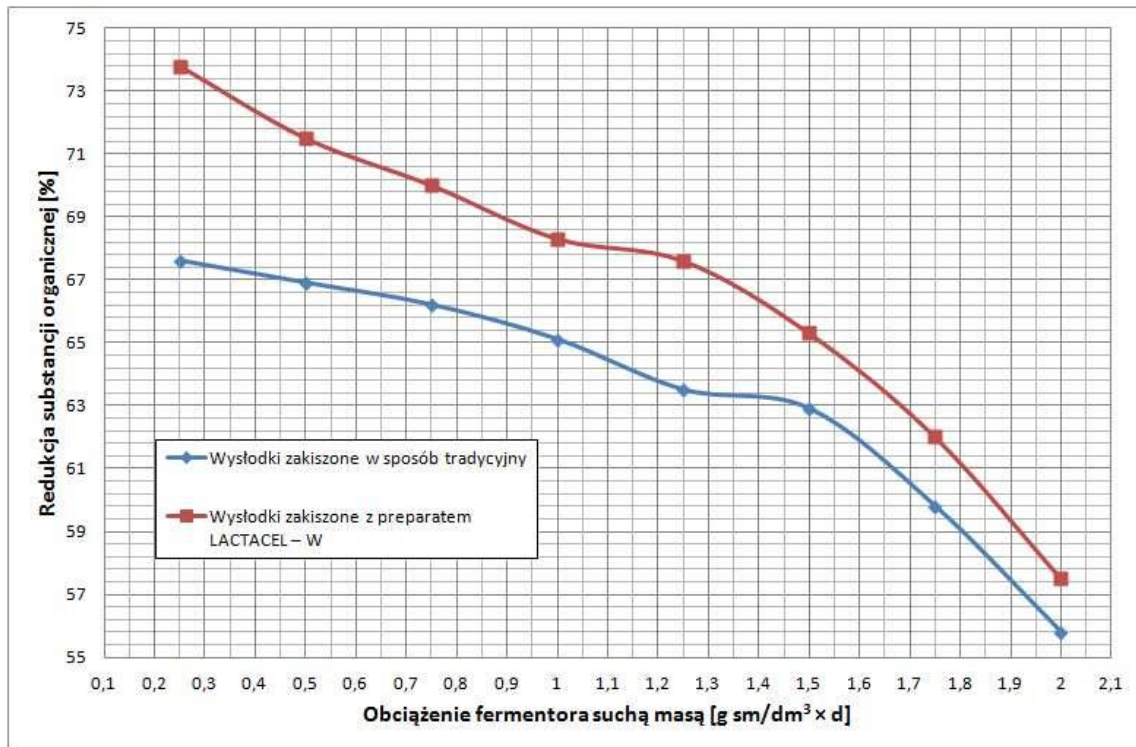
Obciążenie fermentora ładunkiem suchej masy wysłodków	Rodzaj danych	Pomiary i oznaczenia											
		Temperatura	Ilość biogazu	ChZ T	Odczyn	Sucha masa	Substancje mineralne	Substancje organiczne	Azot ogólny	Fosfor ogólny	Lotne kwasy tłuszczowe	Zasadowość	Kwasowość
g sm /dm <sup>3</sup> × d		°C	dm <sup>3</sup> /d	mg O <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	pH	g /dm <sup>3</sup>	g /dm <sup>3</sup>	g /dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	mg CH <sub>3</sub> COOH /dm <sup>3</sup>	mg CaCO <sub>3</sub> /dm <sup>3</sup>	mval/dm <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0,25	Średnia	36,6	2,4	115	7,1	25,67	22,42	5,26	42,4	4,5	883	729	1,5
	Minimum	36,3	1,2	67	7,0	24,34	21,21	5,14	38,1	3,8			
	Maksimum	36,9	4,6	177	7,2	27,00	23,62	5,38	46,6	5,2			
0,50	Średnia	36,0	7,0	197	7,2	24,75	21,10	5,65	51,9	4,1	729	950	1,8
	Minimum	35,6	5,6	188	7,0	24,56	20,88	5,62	47,4	3,8			
	Maksimum	36,2	8,9	205	7,3	24,94	21,32	5,68	56,3	4,4			
0,75	Średnia	36,0	12,2	209	7,0	23,57	17,86	5,72	59,3	3,1	2143	2250	1,6
	Minimum	35,5	10,4	201	7,0	23,32	17,5	5,61	57,1	2,4			
	Maksimum	36,6	14,8	213	7,1	23,82	18,21	5,82	61,5	3,7			

1,00	Średnia	36,3	17,8	273	7,0	22,09	16,85	5,74	72,1	4,5	2529	3350	2,0
	Minimum	35,7	14,4	235	7,0	21,84	15,78	5,42	67,6	3,6			
	Maksimum	36,6	20,6	288	7,1	22,34	17,92	6,06	76,6	5,4			
1,25	Średnia	35,7	24,7	352	7,1	22,55	16,53	6,02	82,3	4,2	2657	3500	2,1
	Minimum	35,6	23,2	315	7,0	22,28	16,43	5,65	80,4	4,0			
	Maksimum	36,1	26,2	411	7,1	22,82	16,63	6,39	84,2	4,4			
1,50	Średnia	36,0	29,0	566	7,1	21,55	15,30	6,25	92,6	2,5	1414	3480	3,5
	Minimum	35,6	27,6	424	7,1	20,28	14,58	5,70	87,6	2,4			
	Maksimum	36,5	30,1	677	7,2	22,82	16,02	6,80	97,6	2,6			
1,75	Średnia	35,7	33,2	703	7,1	19,54	13,23	6,31	100,1	2,6	1303	3540	3,8
	Minimum	35,6	29,8	560	7,1	19,48	12,86	6,00	97,8	2,4			
	Maksimum	36,1	35,3	732	7,2	19,60	13,60	6,62	102,4	2,7			
2,00	Średnia	35,8	33,2	853	7,1	17,91	11,31	6,60	99,8	3,5	707	3360	3,6
	Minimum	35,7	30,8	788	7,1	17,90	11,20	6,48	96,7	2,7			
	Maksimum	36,0	34,8	921	7,2	17,92	11,42	6,72	102,8	4,2			

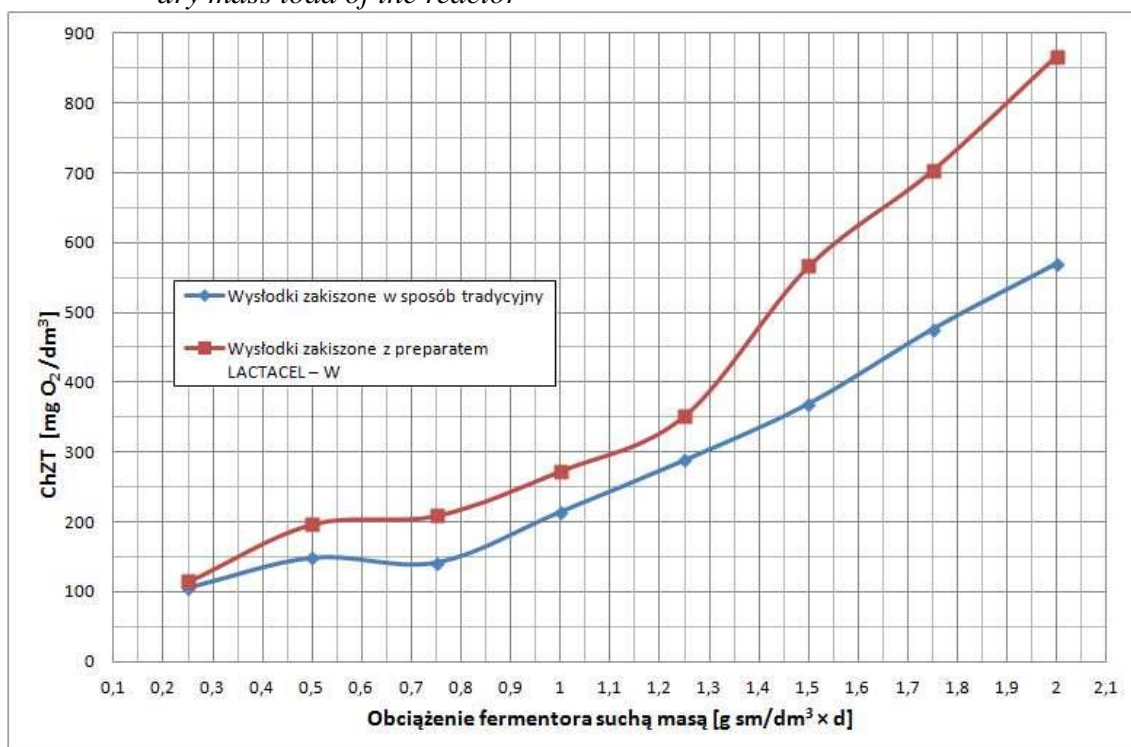
Porównanie efektywności przebiegu fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny oraz zakiszonych z preparatem LACTACEL-W w zakresie stopnia przefermentowania wysłodków, wydajności biogazu i stężenia powstającego odcieku pofermentacyjnego przedstawiono na rysunkach 1–4.



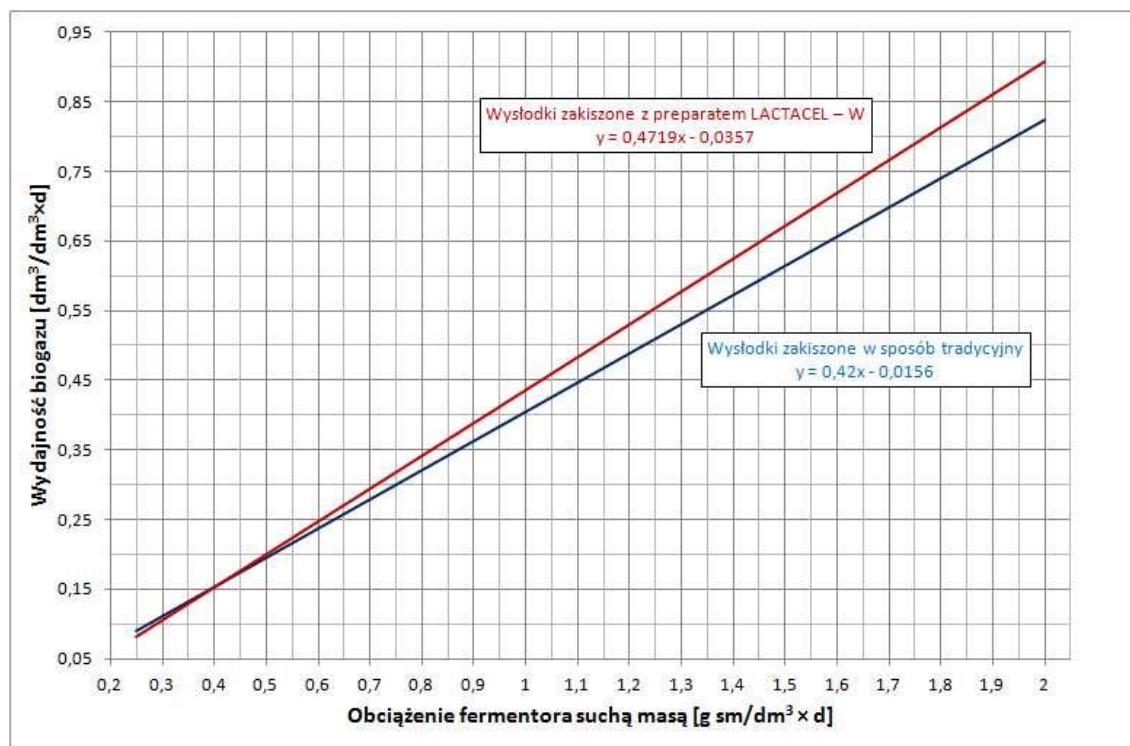
**Rysunek 1.** Zależność zawartości substancji organicznych w produktach fermentacji od obciążenia reaktora suchą masą substratów  
*Relationship between organic substance content in the fermentation products and the substrate dry mass load of the reactor*



**Rysunek 2.** Zależność redukcji substancji organicznych w substratach fermentacji od obciążenia reaktora suchą masą substratów  
*Relationship between the reduction of the organic substances and the substrate dry mass load of the reactor*



**Rysunek 3.** Zależność ChZT odcieku pofermentacyjnego od obciążenia reaktora suchą masą substratów  
*Relationship between COD of the post-fermentation reflux and the substrate dry mass load of the reactor*



**Rysunek 4.** Porównanie wydajności biogazu z jednostki pojemności reaktora od obciążenia suchą masą wysłódków  
*Comparison of the biogas yield from the volume unit of reactor and the dry mass load of beet pulp*

Wszystkie podstawowe parametry procesu mieściły się w zakresach wymaganych do optymalnej pracy fermentora (tabele 3 i 5).

Jak wynika z uzyskanych wyników badań, parametry takie jak: temperatura, odczyn, zawartość związków biogenych (azotu i fosforu), stężenie lotnych kwasów organicznych, alkaliczność i kwasowość utrzymywały się w granicach przyjętych za charakterystyczne dla prawidłowo przebiegającej fermentacji metanowej, zarówno w przypadku wysłódków zakiszonych w sposób tradycyjny, jak i wysłódków zakiszonych z preparatem LACTACEL-W (tabele 3 i 5).

Porównanie efektów fermentacji wysłódków zakiszonych w sposób tradycyjny oraz zakiszonych z preparatem LACTACEL-W wykazało istotny, korzystny wpływ preparatu LACTACEL-W na mineralizację wysłódków w procesie fermentacji metanowej.

Jak wynika z rysunku 1, w przefermentowanej biomacie zawartość substancji organicznych w suchej masie wzrastała w miarę wzrostu obciążenia reaktora, ale przy porównywalnych obciążeniach korzystniejsze wyniki uzyskiwano w procesie fermentacji wysłódków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym (28,56–40,36%) niż w procesie fermentacji wysłódków zakiszonych w sposób tradycyjny (20,49–36,85%).

Redukcja substancji organicznych w stosunku do substratów surowych,



nieprzefermentowanych, malała wraz ze wzrostem obciążenia reaktora (rysunek 2). Wskaźnik ten sięgał 67,6%, w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych tradycyjnie w stosunku do początkowej zawartości 96,20% substancji organicznych w substracie poddawanym fermentacji. Po zakiszeniu z preparatem bakteryjno-enzymatycznym wysłodków, w których udział substancji organicznych wynosił 94,30%, najwyższa redukcja wynosiła 73,8%.

Średnie stężenie zanieczyszczeń (ChZT) w odpływie z fermentora wzrastało w miarę wzrostu obciążeń w przypadku obydwu rodzajów substratów (rysunek 3), ale przy porównywalnych obciążeniach fermentora utrzymywało się na wyższym poziomie w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym niż w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny.

Usuwany ładunek substancji organicznych wzrastał w miarę wzrostu obciążenia reaktora suchą masą substratów i utrzymywał się na nieco wyższym poziomie w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym (tabele 4 i 6).

Pomiary wydzielającego się biogazu wskazały na wyższą jego wydajność, określoną w jednostce objętości wydzielanego biogazu z jednostki pojemności reaktora w jednostce czasu, w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym niż w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny (rysunek 4).

Wydajność biogazu, określona w odniesieniu do jednostki usuwanej suchej masy organicznej, również była wyższa w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym niż w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny (tabele 4 i 6).

Zależność wydajności biogazu od obciążenia reaktora w procesie fermentacji ciągłej wysłodków opisują równania:

- $y = 0,4204 x - 0,0159$  w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny (rys. 4).
- $y = 0,4809 x - 0,0425$  w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym (rys. 4).

Dane dotyczące składu biogazu zebrano w tabeli 7, a dotyczące właściwości biogazu w tabeli 8.

**Tabela 7.** Skład chemiczny biogazu z procesu ciągłej fermentacji metanowej wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu i z preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL-W

*The chemical composition of the biogas from the continuous methane fermentation of the beet pulp ensilaged with or without the enzymatic-bacterial LACTACEL-W preparation*

Rodzaj fermentowanego substratu	Zawartość poszczególnych komponentów biogazu					
	CH <sub>4</sub>	Węglowodory C <sub>2</sub> -C <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
	% obj.	% obj.	% obj.	% obj.	% obj.	mg/m <sup>3</sup>
Wysłodki buraczane zakiszone bez preparatu LACTACEL-W	57,61	< 0,001	40,36	2,02	0,01	205
Wysłodki buraczane zakiszone z preparatem LACTACEL-W	56,66	< 0,001	42,52	0,82	0	136

**Tabela 8.** Właściwości biogazu z procesu ciągłej fermentacji metanowej wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu i z preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL-W

*Properties of the biogas from the continuous methane fermentation of the beet pulp ensilaged with or without the enzymatic-bacterial LACTACEL-W preparation*

Rodzaj fermentowanego substratu	Gęstość	Gęstość względna	Ciepło spalania	Wartość opałowa	Liczba Wobbego górna
	kg/ m <sup>3</sup>	-	MJ/ m <sup>3</sup>	MJ/ m <sup>3</sup>	MJ/ m <sup>3</sup>
Wysłodki buraczane zakiszone bez preparatu LACTACEL-W	1,2348	0,9550	23,04	20,71	23,58
Wysłodki buraczane zakiszone z preparatem LACTACEL-W	1,2556	0,9711	22,66	20,37	23,00

Zawartość metanu w badanych biogazach objętościowo przekraczała 50% (tabela 7). W biogazie z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu bakteryjno-enzymatycznego wynosiła 57,61% obj., a w biogazie z procesu fermentacji z preparatem LACTACEL-W 56,66% obj.

W żadnym z biogazów uzyskiwanych z fermentacji badanych substratów nie stwierdzono obecności węglowodorów C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> w ilości powyżej 0,001% obj.

Uzyskane w badaniach biogazy różniły się zawartością azotu, wodoru i siarkowodoru. Mniej zaazotowany był biogaz uzyskany z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych z preparatem LACTACEL-W – 0,82% obj., bardziej z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu – 2,02% obj. Biogaz uzyskiwany

z fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu LACTACEL–W wykazywał obecność wodoru w ilości 0,01% obj. Obecności wodoru nie stwierdzono w składzie biogazu pochodzącego z fermentacji z preparatem LACTACEL–W. Zawartość siarkowodoru była niższa w biogazie uzyskiwanym z wysłodków buraczanych zakiszonych z preparatem LACTACEL–W i wynosiła 136 mg/ m<sup>3</sup>, a wyższa – 205mg/m<sup>3</sup> w biogazie z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych w sposób tradycyjny – bez preparatu LACTACEL–W.

Biogaz pochodzący z fermentacji obydwu badanych substratów charakteryzował się ciepłem spalania ok. 23 MJ/m<sup>3</sup> i wartością opałową ponad 20 MJ/m<sup>3</sup>. Liczba Wobbego, będąca stosunkiem ciepła spalania gazu do pierwiastka kwadratowego jego gęstości i stanowiąca podstawę do podziału paliw gazowych na podgrupy, w przypadku obydwu substratów nie była niższa niż 23 MJ/m<sup>3</sup>.

Biorąc pod uwagę skład otrzymywanych biogazów i ich właściwości, można na podstawie Polskiej Normy PN-C-04753:2002 zakwalifikować wszystkie biogazy do podgrupy Ls grupy gazów ziemnych zaazotowanych.

Uzyskane biogazy nie posiadają jakości umożliwiającej bezpośrednio dostarczanie ich do sieci rozdzielczej bez ustandaryzowania. Mogą być wykorzystywane na wiele innych sposobów. Po usunięciu siarkowodoru mogą być kierowane do silnika gazowego, w którym energia chemiczna biogazu ulega konwersji na energię elektryczną oraz cieplną. Część tej energii może być przeznaczana na pokrycie potrzeb własnych biogazowni, pozostała sprzedawana odbiorcom zewnętrznym. Biogaz może być wykorzystywany również, podobnie jak gaz ziemny, np. poprzez konwersję do paliw płynnych. Może być także wykorzystany jako paliwo bezpośrednio w kotłowni lub suszarni, tak są wykorzystywane w cukrowniach biogazy uzyskiwane w procesie fermentacji ścieków przemysłowych.

Podsumowując wyniki badań procesu fermentacji obydwu substratów, opracowano wytyczne do zaprojektowania pilotażowej biogazowni w dwóch wariantach:

- wariant I – fermentacja wysłodków buraczanych zakiszonych bez udziału preparatu bakteryjno-enzymatycznego,
- wariant II – fermentacja wysłodków buraczanych zakiszonych z dodatkiem preparatu LACTACEL–W.

Zakłada się dostawę surowców do biogazowni w okresie kampanii cukrowniczej, zakiszanie i magazynowanie na jej terenie.

W obydwu wariantach zakłada się budowę biogazowni pracującej w ciągu całego roku, o pojemności roboczej reaktora 20 000 m<sup>3</sup>, z wydajnością 70 000 t świeżej masy

wysłodków/rok, tj. ok. 200 t śm/d. Będzie to odpowiadało przepustowości biogazowni w przeliczeniu na suchą masę odpowiednio w wariantach I i II 40 i 38 t sm/d, a w przeliczeniu na suchą masę organiczną odpowiednio 38 i 36 t smo/d.

Przy takich założeniach obciążenie fermentora suchą masą organiczną będzie wynosiło: w wariantach I –  $1,9 \text{ kg smo/m}^3 \times \text{d}$  i  $1,8 \text{ kg smo/m}^3 \times \text{d}$  w wariantach II.

Z przeprowadzonych badań wynikało, że przy ciągłym sposobie podawania surowców do fermentora możliwe będzie obciążanie go ładunkiem suchej masy wynoszącym ok.  $2,0 \text{ kg Sm/m}^3 \times \text{d}$  w przypadku każdego substratu i zachowanie czasu przebywania 20 dób, pod warunkiem utrzymania temperatury fermentacji na poziomie  $36^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  i odczynu  $\geq 6,8 \text{ pH}$ , automatycznie regulowanego roztworem 20% sody kaustycznej i zaszczepieniu reaktora osadem bogatym w bakterie metanowe.

Na podstawie uzyskanych wyników badań należy przewidzieć, przy ustalonym obciążeniu reaktora ładunkiem suchej masy wynoszącym  $2,0 \text{ kg sm/m}^3 \times \text{d}$ , następujące wskaźniki:

- wydajność biogazu ustaloną na podstawie równań (rysunek 4) wynoszącą w wariantach I –  $0,81 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \times \text{d}$  i  $0,92 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \times \text{d}$  w wariantach II,
- stopień odfermentowania substratów (rysunek 3) wynoszący w wariantach I – 56% i 57% w wariantach II,
- udział substancji organicznej w stałym produkcie fermentacji wysłodków (rysunek 2) wynoszący: ok. 40% w wariantach I i 37% w wariantach II,
- ChZT odcieku pofermentacyjnego (rysunek 3) wynoszące ok.  $600 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$  w wariantach I i ok.  $850 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$  w wariantach II.

W efekcie procesu fermentacji wysłodków produktami będą:

- przefermentowana biomasa w ilości ok.  $67 \text{ t św m/d}$ ,
- odciek po fermentacji w ilości ok.  $135 \text{ m}^3/\text{d}$ ,
- biogaz w ilości  $30780 \text{ Nm}^3/\text{d}$  w wariantach I i  $33120 \text{ Nm}^3/\text{d}$  w wariantach II, o wartości energetycznej w wariantach I –  $726408 \text{ MJ/d}$  ( $201\,870 \text{ kWh}$ ) i  $761\,760 \text{ MJ/d}$  ( $211\,600 \text{ kWh}$ ) w wariantach II.

Wytwarzana energia elektryczna wykorzystywana będzie częściowo na potrzeby własne biogazowni, a nadwyżki wprowadzane do sieci. Wytwarzana energia cieplna wykorzystywana będzie również częściowo na potrzeby własne, a nadwyżki sprzedawane lokalnemu odbiorcy końcowemu.

Masa pofermentacyjna (po odwodnieniu na prasach filtracyjnych) wykorzystywana będzie rolniczo do nawożenia pól uprawnych. Odciek po prasie filtracyjnej wykorzystywany będzie w biogazowni do rozcieńczania wsadu do fermentora do zawartości 12–16% suchej masy, jego nadmiar będzie odprowadzany do biologicznej oczyszczalni ścieków cukrowniczych lub wykorzystywany do nawożenia gleby.

### **WNIOSKI**

1. Zarówno w przypadku wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym, jak i w sposób tradycyjny możliwe jest prowadzenie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych, gwarantującej wytwarzanie wysokoenergetycznego biogazu o zawartości ponad 50% metanu i redukcję zawartości substancji organicznych w wysłodkach do poziomu poniżej 40% suchej masy, przy obciążeniu ok.  $2 \text{ g sm /dm}^3 \times \text{d}$  i czasie retencji ok. 20 dób.
2. W procesie fermentacji metanowej, prowadzonym w optymalnych warunkach, produkt fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym jest lepiej odfermentowany (udział substancji organicznej ok. 37%) niż produkt fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny (udział substancji organicznej ok. 40%).
3. W procesie fermentacji wysłodków zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym uzyskuje się wyższą wydajność biogazu ( $0,92 \text{ dm}^3/\text{dm}^3 \times \text{d}$ ), niż w procesie fermentacji wysłodków zakiszonych w sposób tradycyjny ( $0,81 \text{ m}^3/\text{dm}^3 \times \text{d}$ ).
4. Zawartość metanu w badanych biogazach wahała się w wąskich granicach (56,66–57,61% obj.), ciepło spalania, niezależnie od substratu, wynosiło ok.  $23 \text{ MJ/m}^3$ , wartość opałowa ok.  $20 \text{ MJ/ m}^3$ , a liczba Wobbego, stanowiąca podstawę do podziału paliw gazowych na podgrupy, ok.  $23 \text{ MJ/ m}^3$ .
5. Uzyskane w badaniach biogazy różniły się zawartością azotu, wodoru i siarkowodoru:
  - biogaz uzyskany z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL–W zawierał mniej azotu (0,82% obj.) niż biogaz z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu (2,02% obj.),
  - zawartość siarkowodoru w biogazie uzyskiwanym z wysłodków buraczanych zakiszonych z preparatem bakteryjno-enzymatycznym LACTACEL–W była niższa ( $136 \text{ mg/m}^3$ ) niż w biogazie z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu ( $205 \text{ mg/m}^3$ ),
  - w składzie biogazu pochodzącego z fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych

z preparatem LACTACEL–W nie stwierdzono wodoru, w biogazie z procesu fermentacji wysłodków buraczanych zakiszonych bez preparatu stwierdzono obecność tego gazu w ilości 0,01% obj.

### **PIŚMIENNICTWO**

1. Białowiec A., Biernat K., Wojnowska-Baryła I. (2008). Produkcja biogazu z frakcji organicznej wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych. *Gaz, Woda, Technika Sanitarna*, 7–8, 50-54
2. BN-59/0541-03/05: Oznaczanie siarkowodoru w biogazie. Metoda jodometryczna
3. BN-74/9162-01: Metody oceny jakości i wartości pokarmowej kiszzonek
4. Brzeziński A. (2011). Małe biogazownie rolnicze – czy to się opłaca? *Polska Wieś*, 5, 6
5. Chweduk D. (1999). Potencjał i wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w kraju. *Aura*, 7-8, 4-7
6. Denisiuk W. (2005). Energetyczne wykorzystanie biomasy w Austrii. *Aura*, 3, 14-16
7. Felde A. (2008). Potenziale der Züchtung von Rüben (Zucker- und Futterrüben) für die Erzeugung von Bioenergie. Międzynarodowa Konferencja – Aktualne problemy w przemyśle cukrowniczym i sposoby ich rozwiązywania, Leszno, 2008
8. Gancarz Z. (2007). Alternatywne metody zagospodarowania wysłodków. *Burak Cukrowy – Gazeta dla plantatorów*, 4, 37-38
9. Hermanowicz W., Dojlido J., Dożańska W., Jabłoński W., Koziarowski B., Zerbe J. (1999). Fizykochemiczne badanie wody i ścieków. Warszawa: Arkady
10. Jabłoński W., Wnuk J. (2009). Zarządzanie odnawialnymi źródłami energii, aspekty ekonomiczno-techniczne. Sosnowiec: Oficyna wydawnicza Humanista
11. Janczur K. (2009). Biogazownia rolnicza – inwestycja chroniąca klimat. *Czysta Energia*, 1, 25-27
12. Kasprzak A., Krzysiak L. (2007). Biomasa jako cenny surowiec do produkcji biogazu. *Laboratorium. Prz. Ogólnopolski*, 9, 60-62
13. Kowalska M. (2006). Zagadnienia mikrobiologiczne procesu produkcji cukru z buraka cukrowego. Warszawa: Ośrodek Wydawniczo-Poligraficzny „SIM”
14. Kowalska M., Mossakowska K., Gozdek K. (1999). Zakiszanie wysłodków o zawartości suchej substancji powyżej 18%. Warszawa: IPC
15. Ledakowicz S., Krzystek L. (2005). Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 10, 1-8
16. Lewandowski W. (2006). Proekologiczne odnawialne źródła energii. Warszawa: WNT
17. Magrel L. (2004). Prognozowanie procesu fermentacji metanowej mieszaniny osadów

- ściekowych oraz gnojowicy. Białystok: WPB
18. Mikula J. (2008). Odnawialne źródła energii w programach na lata 2007–2013. Ogólnopolska Konferencja – Innowacyjna energetyka. Rolnictwo energetyczne. Warszawa, maj 2008
  19. Myszograj S. (2005). Metan – gaz cieplarniany i źródło energii, *Ekotechnika*, 3, 53-55
  20. Oniszk-Popławska A., Zowski M., Wiśniewski G. (2003). Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego. Gdańsk – Warszawa: EC BREC
  21. Piątek R. (2005). Produkcja i energetyczne wykorzystanie biogazu – przykłady nowoczesnych technologii. Konferencja Naukowo-Techniczna. Katowice, 2005
  22. PN-C-04541:1978. Woda i ścieki. Oznaczanie suchej pozostałości, pozostałości po prażeniu, straty przy prażeniu oraz substancji rozpuszczonych, substancji rozpuszczonych mineralnych i substancji rozpuszczonych lotnych. Metoda wagowa
  23. PN-C-04753:2002. Gaz ziemny. Jakość gazu dostarczanego odbiorcom z sieci rozdzielczej
  24. PN-70/OC – 84901. Pobieranie próbek produktów gazowych
  25. PN-EN 25663:2001. Jakość wody. Oznaczanie azotu Kjeldahla. Metoda po mineralizacji z selenem
  26. PN-ISO 5664:2002. Oznaczanie azotu amonowego. Metoda destylacyjna z miareczkowaniem
  27. PN-ISO 6060: 2006. Jakość wody. Oznaczanie chemicznego zapotrzebowania tlenu. Metoda dwuchromianowa, miareczkowa
  28. Podkówka W. (1974). Nowoczesne metody kiszzenia pasz. Warszawa: PWRiL
  29. Połec B., Gozdek K., Baryga A., Szymański T. (2009). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Cz. 1. Fermentacja statyczna wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 11-12, 278-283, 289, 293, 305
  30. Połec B., Baryga A., Szymański T., Wołyńska W., Toboła A. (2010). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Cz. II. Fermentacja półciągła wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 5, 120-125
  31. Połec B., Baryga A., Szymański T., Wołyńska W., Toboła A. (2011). Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Cz. III. Fermentacja ciągła wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 4, 107-112
  32. Procedura badawcza własna PB-PWGiOŚ-01:2011. Obliczanie azotu ogólnego w ściekach. Metoda obliczeniowa

33. Procedura badawcza własna PB-PWGiOŚ-02:2011. Oznaczanie pH w wodzie i ściekach. Metoda potencjometryczna z zastosowaniem elektrody jonoselektywnej
34. Procedura badawcza własna PB-PGWiOŚ-03:2011. Oznaczanie fosforu ogólnego w ściekach. Metoda molibdenowanadowa z wcześniejszą mineralizacją próby nadsiarczaniem w środowisku kwaśnym
35. Procedura badawcza własna PB- PGWiOŚ-04: 2011. Oznaczanie azotu azotanowego w wodzie i ściekach. Metoda redukcji kadmem
36. Procedura badawcza własna PB- PGWiOŚ- 05: 2011. Oznaczanie azotu azotynowego w wodzie i ściekach. Metoda dwuazowania
37. Sadecka Z. (2009). Energia z osadów do technicznego wykorzystania, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 7–8, 14-18
38. Sadecka Z., Myszograj S. (2008). Wykorzystanie biogazu w oczyszczalniach ścieków. *Ekotechnika*, 1, 21-25
39. Stepa M.(1992). *Biogazownie rolnicze*. Warszawa: IBMER
40. Skorek J., Kalina J. (2005). *Gazowe układy kogeneracyjne*. Warszawa: WNT
41. Sygit M. (2005). *Przetwarzanie odpadów i produktów roślinnych w biogazowniach – aspekty ekonomiczne*. Wrocław: DCZT Politechnika Wrocławska
42. Witek M. (2008). *Małoskalowa energetyka biogazowa – perspektywy rozwoju w warunkach polskich*. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 10, 5-9
43. Zielińska K., Miecznikowski A. (1996). Lactacel – biopreparat przeznaczony do kiszenia i podniesienia strawności wysłodków buraczanych. *Gazeta Cukrownicza*, 11, 209-210