

# Methanová fermentace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním hovězí kejdy

METHANE FERMENTATION OF SUGAR BEET PULPS WITH ADDITION OF CATTLE LIQUID MANURE

Bożenna Poleć, Andrzej Baryga, Tomasz Szymański, Ewelina Małczak

Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Wacława Dąbrowskiego  
Zakład Cukrownictwa, Leszno, Polsko

Po řadu let byly vyslazené cukrovarnické řízky hodnotným krmivem pro přežvýkavce, v posledních letech však poptávka po tomto vedlejším produktu z cukrovarů dramaticky poklesla. Řada cukrovarů má s využitím vyslazených řízků problémy. Je to způsobeno významným poklesem počtu skotu v Polsku a používáním jiných krmiv. Proto má rozvoj využití vyslazených řízků pro jiné než krmivářské účely (produkce bioplynu) pro cukrovarnictví velký ekonomický význam.

Výroba bioplynu z biomasy přináší vedle ekonomických výhod (výroba bioplynu s vysokým energetickým obsahem) a efektů pro životní prostředí (využití odpadu) také přínosy v sociální oblasti (1–6). Zakládání bioplynových stanic zpracovávajících nevyužitých řízků umožňuje využití volných výrobních kapacit a přináší řadu nových pracovních míst. V současnosti se v bioplynových stanicích ve světě jako hlavní zdroj bioplynu v procesu methanizace nejčastěji využívá domovní odpad (7–11). Často se jako surovina používají silážované plodiny, jako jsou kukuřice, trávy nebo energetické rostliny (11–16). Méně často se využívá odpad ze závodů různých oborů potravinářského průmyslu (2, 3, 4, 12, 17, 18).

Z literárních rešerší vyplývá, že společná fermentace odpadu a kejdy zvyšuje množství i kvalitu vyrobeného bioplynu a stupeň biokonverze organického odpadu (8, 19–23). Přes jednoznačný trend zvyšování výroby bioplynu z organického odpadu nejsou v cukrovarnickém oboru dostatečné zkušenosti i technologie.

V literatuře je jen málo údajů o výrobě bioplynu z cukrové řepy pěstované nikoli pro výrobu cukru, ale přímo pro energetické účely (2, 3). Uváděno je několik příkladů bioplynových stanic využívajících vyslazené řízky (4, 24, 25, 26).

Rozvoj trhu vedl k vývoji řady různých technických řešení odpovídajících rozmanitým potřebám uživatelů. Rozsáhlým zdrojem informací v tomto ohledu je zejména německá literatura. V SRN je již v provozu více než osm tisíc bioplynových stanic (většinou zemědělských) a Německo je tak největším producentem bioplynu v Evropě (27–31).

Cílem naší studie bylo stanovit vliv kejdy na methanizaci vyslazených cukrovarnických řízků. Smyslem práce pak bylo zpracovat pokyny pro projektování pilotní bioplynové stanice zajišťující produkci bioplynu s vysokým energetickým obsahem a obsahujícího více než 50 % methanu, při dosaženém snížení obsahu organické hmoty fermentovaných řízků na méně než 40 % výchozí sušiny.

## Materiál a metody

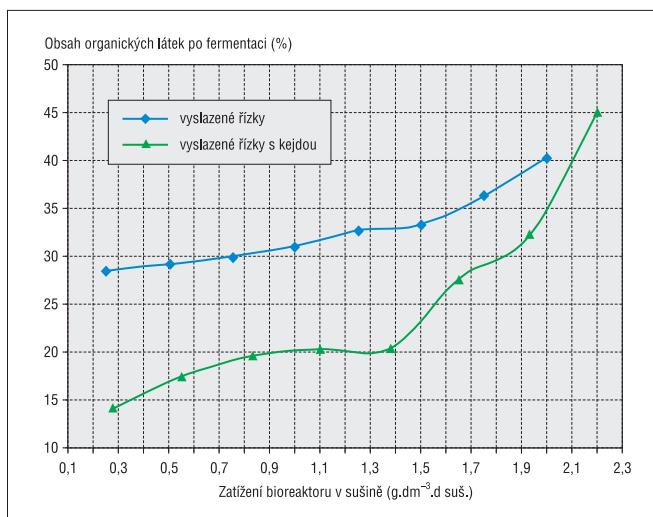
Zkoumaným materiálem byly silážované vyslazené cukrovarnické řízky, které byly použity k methanové fermentaci jednak samotné, jednak s přidáním hovězí kejdy v množství 10 % hmotnosti řízků. Hmotnostní obsah sušiny přidané kejdy byl 3,41 % a obsah organické hmoty 72,5 %. Chemické vlastnosti vyslazených cukrovarnických řízků, podstatné pro fermentační testy, jsou uvedeny v tab. I. K inokulaci fermentorů byl použit sediment z fungujícího bioreaktoru methanizační stanice využívající odpadní vody v koncentraci sušiny 30 g.dm<sup>-3</sup> bioreaktoru, s obsahem 34,8 % organické hmoty a biochemickou aktivitou 15 mg odstraněné CHSK na 1 g sušiny denně.

Studie byla provedena kontinuální fermentací v mikrotechnickém měřítku, ve fermentačním reaktoru o objemu 40 dm<sup>3</sup>. Bioreaktor byl osazen nízkorychlostním lopatkovým míchadlem a byl umístěn do vodní lázně o objemu 80 dm<sup>3</sup>, v níž byla voda ohřívána pomocí akvarijních topných těles. Teplota v bioreaktoru byla automaticky udržována úpravou teploty vodní lázně (zapínání a vypínání ohřevu), pH v bioreaktoru bylo automaticky udržováno na hodnotě 6,8 pomocí peristaltického čerpadla dávkujícího roztok hydroxidu sodného o známém pH. Množství přidaného 20% roztoku hydroxidu sodného se v závislosti na zatížení bioreaktoru pohybovalo mezi 0 a 30 cm<sup>3</sup>.d<sup>-1</sup>. Množství bioplynu vyrobeného v tomto procesu bylo soustavně měřeno pomocí speciálního plynoměru.

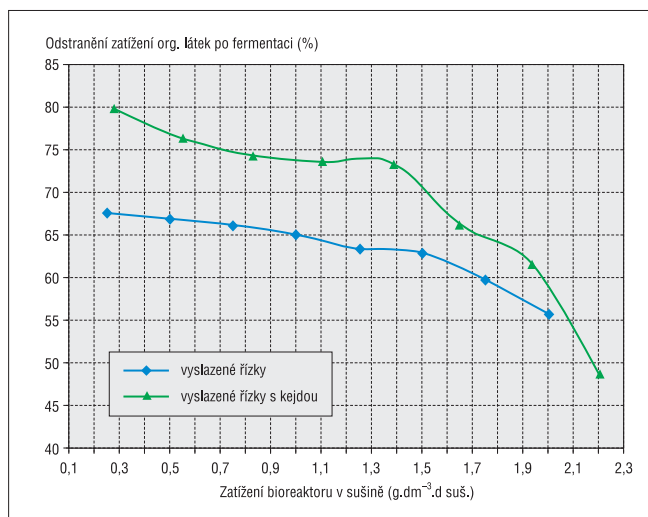
Tab. I. Kvalita vyslazených řízků použitých v experimentech

Označení	Jednotka	Řízky bez kejdy	Řízky s kejdou
Sušina	%	19,90	18,40
Kvocient popela	% suš.	3,8	6,0
Organické látky	% suš.	96,2	94,0
Obsah bílkovin celkem	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	96,5	111,9
Obsah lipidů celkem	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	8,0	9,7
Obsah vlákniny celkem	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	228,0	203,0
Bezduškatý extrakt	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	655,3	620,4
Využitelné bílkoviny	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	55,0	63,8
Využitelné lipidy	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	7,0	8,4
Využitelné glycidy	g <sub>suš.</sub> .kg <sup>-1</sup>	603,8	611,8

Obr. 1. Závislost obsahu organických látek na výstupu z bioreaktoru na zatížení bioreaktoru v sušinė substrátu



Obr. 2. Závislost odstraněného zatížení org. látek ve fermentačních substrátech na zatížení bioreaktoru v sušinė substrátu



Stálý přísun suroviny pro fermentaci – vyslazených řízků – byl zajištěn pomocí peristaltického čerpadla. Odtah z bioreaktoru (ve stejném množství jako přísun řízků) byl rovněž pomocí peristaltického čerpadla odváděn do post-fermentační nádrže. Zatížení bioreaktoru se měnilo každých 5 dnů.

Příprava jednotlivých substrátů pro testy methanizace spočívala v jejich zpracování na tekuté řízky. Za tímto účelem bylo odváženo předem stanovené množství každého materiálu a byly přidány fermentované odpadní vody. Výsledná směs byla důkladně homogenizována v mixéru.

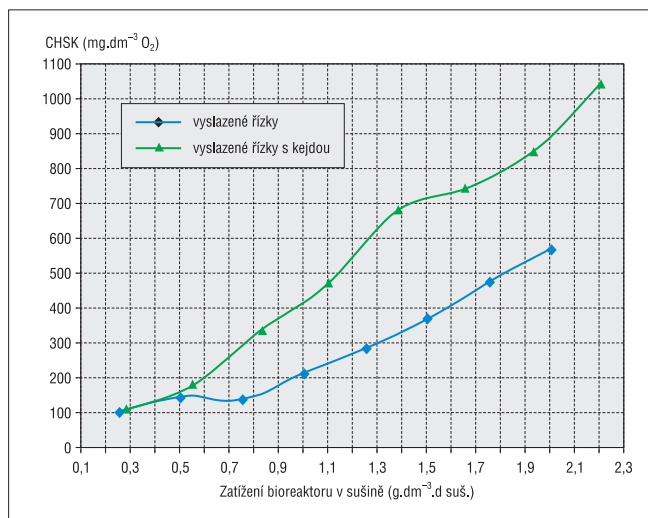
Zkoušky kontinuální fermentace byly provedeny ve dvou testovacích cyklech:

- fermentace vyslazených cukrovarnických řízků přiváděných do bioreaktoru v postupně se zvyšujícím množství odpovídajícím zatížení bioreaktoru 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50; 1,75 a 2,0 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den, což odpovídá obsahu organické hmoty 0,24; 0,48; 0,72; 0,96; 1,20; 1,44; 1,68 a 1,92 g.dm<sup>-3</sup> organické sušiny za den,
- fermentace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním 10 % hm. kejdy přiváděných do bioreaktoru v postupně se zvyšujícím množství odpovídajícím zatížení bioreaktoru 0,28; 0,55; 0,83; 1,10; 1,38; 1,65; 1,93 a 2,20 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den, což odpovídá obsahu organické hmoty 0,26; 0,52; 0,78; 1,03; 1,30; 1,55; 1,81 a 2,01 g.dm<sup>-3</sup> organické sušiny za den.

Proces byl řízen na základě každodenních měření teploty, pH a množství vyrobeného bioplynu; denně se také provádělo stanovení CHSK. Dvakrát v každém cyklu byla provedena zkouška zbytkové sušiny, obsahu organických a anorganických látek ve vodě odtékající z bioreaktoru. K tomu se dvakrát v každém testovacím cyklu provádělo stanovení biogenních látek (celkový a organický, amonný, nitratový a nitritový dusík, a dále celkový fosfor ve vzorku odebraném z vnitřního prostoru bioreaktoru).

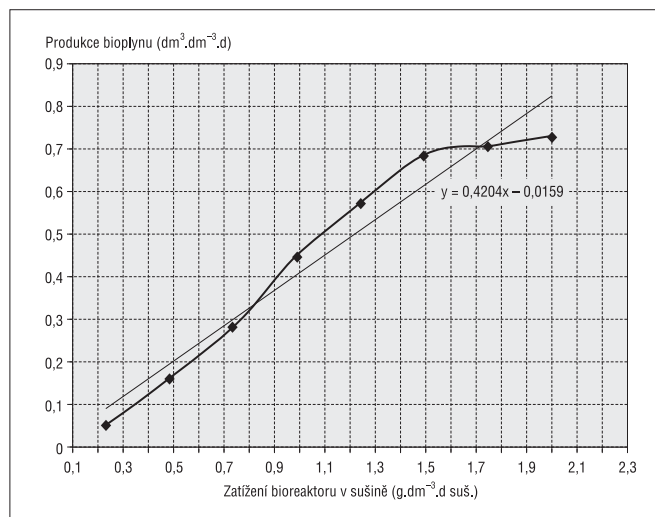
Jednou v každém zkušebním cyklu byl stanoven obsah těkavých mastných kyselin, alkalita a acidita fermentovaného média. Vzorky odtahovaného bioplynu byly testovány v Ústavu ropy a plynu (Instytut nafty i gazu) ve Varšavě. Byly zkoumány tyto parametry bioplynu: kvalita (obsah CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, nasycených uhlovodíků C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>), hustota, spalné teplo, výhřevnost a Wobbého index. Při výzkumu byly používány tyto analytické

Obr. 3. Závislost CHSK digestátu na zatížení bioreaktoru v sušinė substrátu

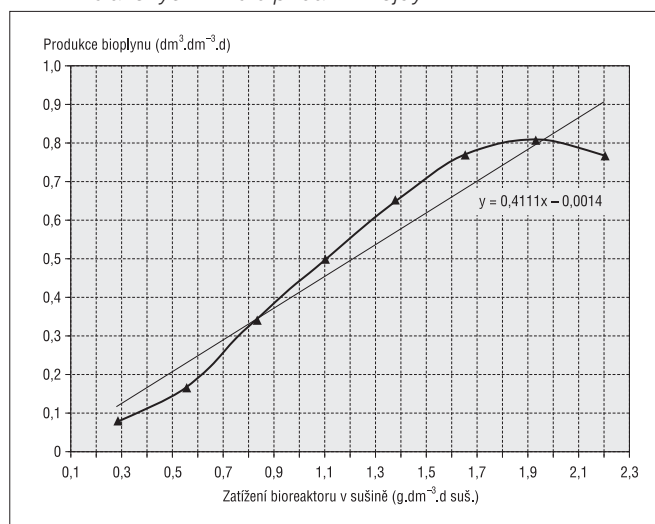


metody: reakce (potenciometrická titrace), CHSK (metoda s dichromanem draselným), celkový fosfor (molekulární absorpční spektrofotometrie – fotokolorimetrie po předchozí mineralizaci před značením), obsah sušiny (vážkově), obsah organické sušiny (vážkově), těkavé organické kyseliny (přímá destilační metoda), alkalita (titračně), obsah tuku (vážkově, Soxhletova extrakce), celkový obsah proteinů (Kjeldahlova metoda), obsah vlákniny (vážkově – Weendenská analýza), bezdusíkatý extrakt (vážkově), celkový dusík (výpočtem jako součet dusíku dle Kjeldahla, dusitanového a dusičnanového dusíku), celkový dusík dle Kjeldahla (specifická metoda – destilační, s následnou titrací po mineralizaci vzorku za katalýzy kyselinou sírovou), dusičnanový dusík (molekulární absorpční spektrofotometrická metoda – fotokolorimetrie), dusitanový dusík (molekulární absorpční spektrofotometrie – fotokolorimetrie), amoniakální dusík (titrační metoda po destilaci parou), organický dusík (výpočtem jako rozdíl mezi dusíkem dle Kjeldahla a amoniakálním dusíkem), složení bioplynu (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, nasycené uhlovodíky C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> metodou plynové chromatografie pomocí přístroje Hewlett

Obr. 4. Závislost produkce bioplynu vztažené na objemovou jednotku bioreaktoru v sušině vyslazených řízků



Obr. 5. Závislost produkce bioplynu vztažené na objemovou jednotku bioreaktoru na zatížení bioreaktoru v sušině vyslazených řízků s přidáním kejdy



Packard 5890), sirovodík v bioplynu (jodometrická titrace, analýza plynu procházejícího přes absorpční roztok přímo ze zdroje) a vlastnosti bioplynu (hustota, spalné teplo, výhřevnost, Wobbého index) výpočtem z chemického složení bioplynu.

### Výsledky a diskuse

Výsledky kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků bez přidání kejdy jsou uvedeny v tab. II. a tab. IV. a na obr. 1. až obr. 4. Výsledky kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním kejdy jsou uvedeny v tab. III. a tab. V. a na obr. 1. až obr. 3. a obr. 5.

Po celé zkušební období bylo pH ve fermentaci u obou substrátů udržováno na optimální úrovni, tedy vyšší než 6,8. V závislosti na zatížení se pohybovalo v rozsahu 7,0–8,0 v případě fermentace samotných vyslazených řízků a 7,0–7,8 při fermentaci řízků s přidáním kejdy (tab. II. a tab. III.).

Koncentrace nutrientů (N a P) byla odpovídající pro řádný průběh procesu methanizace. Poměr CHSK : N : P by měl být nejméně 100 : 2,5 : 0,5. U obou substrátů byl tento poměr vyšší, v průměru 100 : 17,1 : 1,1 při fermentaci samotných vyslazených řízků a 100 : 19,6 : 1,1 při fermentaci vyslazených řízků s přidáním kejdy (tab. II a tab. III.).

Při řádném provozu fermentace by koncentrace těkavých mastných kyselin měla zůstat na úrovni cca 1 500 mg.dm<sup>-3</sup> CH<sub>3</sub>COOH. Koncentrace těkavých mastných kyselin se při fermentačním procesu vyslazených řízků pohybovala mezi 105 a 219 mg.dm<sup>-3</sup> CH<sub>3</sub>COOH a v procesu, kdy byla do řízků přidána kejda, mezi 105 a 1 671 mg.dm<sup>-3</sup> CH<sub>3</sub>COOH (tab. II. a tab. III.).

Alkalita by se měla udržovat v rozmezí 1 000–3 000 mg.dm<sup>-3</sup> CaCO<sub>3</sub>. Při testech fermentace s jednotlivými substráty byla při fermentaci vyslazených řízků 505–3 310 mg.dm<sup>-3</sup> CaCO<sub>3</sub> a v procesu fermentace s přidáním kejdy do řízků v rozmezí 1 240–2 900 mg.dm<sup>-3</sup> CaCO<sub>3</sub> (tab. II. a tab. III.).

Kyselost byla v testech fermentace jednotlivých substrátů v rozsahu 1,6–6,6 mval.dm<sup>-3</sup> v procesu fermentace vyslazených řízků a 1,5–5,1 mval.dm<sup>-3</sup> v procesu fermentace s přidáním kejdy do řízků (tab. II. a tab. III.).

Průměrná koncentrace nečistot v digestátu z bioreaktoru vyjádřená v CHSK se zvýšením zatížení vzrostla ze 72 na 620 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub> v případě fermentace vyslazených řízků a z 92 na 1 108 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub> v případě fermentačního procesu s přidáním kejdy (obr. 3.).

Míra poklesu obsahu organických látek proti původním nefermentovaným substrátům se stoupajícím zatížením bioreaktoru klesala a během testovacího období se pohybovala mezi 55,8 % a 67,6 % v případě fermentace vyslazených řízků, v nichž bylo procento organické hmoty 96,20 %, a mezi 48,8 % a 79,9 % ve fermentačním procesu s přidáním kejdy, kde byl obsah organických látek v substrátu 94,00 % (obr. 2.).

Obsah organických látek v sušině fermentované biomasy se stoupajícím zatížením bioreaktoru rostl; v procesu fermentace vyslazených řízků byl mezi 28,56 a 40,36 % a v procesu fermentace řízků s přidáním kejdy od 14,12 do 45,16 % (obr. 1.).

Organické znečištění odbourané ve fermentačním procesu rostlo se zatížením bioreaktoru sušinou substrátu. Při fermentaci vyslazených řízků se pohybovalo v rozmezí 0,16–1,07 g.dm<sup>-3</sup> odstraněné organické hmoty za den a při fermentaci řízků s přísadou kejdy v rozmezí 0,21–1,12 g.dm<sup>-3</sup> odbourané organické hmoty za den (tab. IV. a tab. V.).

Měřením vyrobeného bioplynu byla stanovena jeho výtěžnost vyjádřená jako počet objemových jednotek bioplynu získaných z jednotky objemové kapacity bioreaktoru za časovou jednotku. Při fermentaci vyslazených řízků se pohybovala mezi 0,053 a 0,733 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den a při fermentaci řízků s přidáním kejdy mezi 0,078 a 0,810 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den (obr. 4. a obr. 5.).

Výtěžnost bioplynu vztažená na jednotku odstraněné organické sušiny se v procesu fermentace vyslazených řízků pohybovala od 0,33 do 0,76 dm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> organické sušiny a v procesu fermentace řízků s přidáním kejdy od 0,37 do 0,79 dm<sup>3</sup>.g<sup>-1</sup> organické sušiny (tab. IV. a tab. V.).

Závislost výtěžnosti bioplynu na zatížení bioreaktoru v kontinuálním procesu fermentace cukrovarnických řízků popisují rovnice:

$$y = 0,4204x - 0,0159$$

ve fermentačním procesu vyslazených řízků (obr. 4.),

Tab. II. Porovnání průměrných, minimálních a maximálních hodnot základních parametrů a ukazatelů kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků bez přidání kejdy

Zatížení bioreaktoru v sušině vysl. řízků	Typ hodnoty	Tep- lo- ta	Množství bioplynu	CHSK	pH	Sušina	Oobsah miner. látek	Oobsah organ. látek	Oobsah celk. N	Oobsah celk. P	Těkavé mast- né kyseliny	Alkalita	Acidita
g.dm <sup>-3</sup> .d		°C	dm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	mg <sub>O<sub>2</sub></sub> .dm <sup>-3</sup>	–	g.dm <sup>-3</sup>			mg.dm <sup>-3</sup>		mg <sub>CH<sub>3</sub>COOH</sub> .dm <sup>-3</sup>	mg <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> .dm <sup>-3</sup>	mval.dm <sup>-3</sup>
0,25	Průměr	35,6	2,1	105	7,7	24,23	17,31	6,92	42,8	1,6			
	Min.	35,0	0,2	72	7,4	23,26	16,98	6,28	42,5	1,4	105	505	1,6
	Max.	36,1	4,1	162	8,0	25,20	17,64	7,56	43,0	1,8			
0,50	Průměr	36,6	6,5	148	7,3	21,34	15,09	6,25	40,4	1,3			
	Min.	35,3	4,4	128	7,3	20,84	14,86	5,98	40,2	1,0	121	950	4,0
	Max.	38,9	8,6	164	7,4	21,83	15,31	6,52	40,5	1,5			
0,75	Průměr	35,8	11,4	141	7,2	20,87	14,60	6,27	37,4	3,5			
	Min.	35,0	8,8	179	7,2	19,88	13,98	5,90	33,5	2,6	114	1 140	3,6
	Max.	36,6	14,2	278	7,3	21,85	15,21	6,64	41,2	4,4			
1,00	Průměr	36,6	18,0	214	7,0	19,47	13,41	6,06	45,4	4,0			
	Min.	35,5	14,2	192	7,0	18,90	12,90	6,00	44,0	3,9	156	1 550	4,8
	Max.	37,0	20,8	231	7,0	20,04	13,92	6,12	46,8	4,1			
1,25	Průměr	36,4	23,0	288	7,0	19,55	13,16	6,40	48,7	4,7			
	Min.	35,5	20,0	244	7,0	18,62	12,37	6,25	45,9	4,6	167	1 750	6,0
	Max.	37,0	26,1	320	7,1	20,48	13,94	6,54	51,4	4,8			
1,50	Průměr	36,4	27,5	369	7,1	25,31	16,87	8,44	61,7	3,8			
	Min.	35,5	26,1	338	7,0	24,74	16,80	7,94	58,2	3,4	168	1 600	4,2
	Max.	36,9	29,3	407	7,2	25,88	16,94	8,94	65,2	4,2			
1,75	Průměr	36,4	28,3	476	7,1	26,83	17,07	9,77	65,4	3,5			
	Min.	35,6	26,0	414	7,1	26,80	16,79	9,52	63,9	2,8	203	2 820	6,6
	Max.	37,0	35,1	534	7,1	26,86	17,34	10,01	66,8	4,1			
2,00	Průměr	36,4	29,3	570	7,1	35,31	21,07	14,25	70,7	4,1			
	Min.	35,7	26,4	528	7,0	35,14	20,94	13,95	70,0	3,8	219	3 310	6,4
	Max.	37,0	31,8	620	7,2	35,48	21,19	14,54	71,4	4,4			

$$y = 0,4111x + 0,0014$$

ve fermentačním procesu řízků s přidáním kejdy (obr. 5.).

Pokud výsledky fermentačního procesu obou substrátů shrneme, lze konstatovat, že při kontinuálním přísunu surovin do bioreaktoru je u obou substrátů možné provozovat bioreaktor pod zatížením cca 2,0 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den.

Při porovnání výsledků kontinuální methanizace jednotlivých substrátů je potřeba brát v úvahu zejména množství a kvalitu vyrobeného bioplynu a kvalitu produktů fermentace (separát a fugát). V daném bioreaktoru je při zatížení sušinou 2,0 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den na základě uvedených rovnic předpokládána výťažnost bioplynu:

– 0,8187 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den při fermentaci vyslazených řízků,  
– 0,8427 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den při fermentaci řízků s přidáním kejdy.

Při stejném zatížení bioreaktoru sušinou ve výši 2,0 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den bude podíl organických látek v pevném zbytku z fermentace vyslazených cukrovarnických řízků:

– cca 40 % při fermentaci samotných řízků,  
– cca 35 % při fermentaci řízků s přidáním kejdy.

Při zatížení bioreaktoru sušinou 2,0 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den bude mít digestát CHSK:

– cca 600 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub> při fermentaci samotných řízků,  
– cca 900 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub> při fermentaci vyslazených řízků s přidáním kejdy.

Tab. III. Porovnání průměrných, minimálních a maximálních hodnot základních parametrů a ukazatelů kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním kejdy

Zatížení bioreaktoru v sušíně vysl. řízků	Typ hodnoty	Tep- lota	Množství bioplynu	CHSK	pH	Sušina	Oobsah miner. látek	Obsah organ. látek	Obsah celk. N	Obsah celk. P	Těkavé mastné kyseliny	Alkalita	Acidita
g.dm <sup>-3</sup> .d		°C	dm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	mg <sub>O<sub>2</sub></sub> .dm <sup>-3</sup>	–	g.dm <sup>-3</sup>			mg.dm <sup>-3</sup>		mg <sub>CH<sub>3</sub>COOH</sub> .dm <sup>-3</sup>	mg <sub>CaCO<sub>3</sub></sub> .dm <sup>-3</sup>	mval.dm <sup>-3</sup>
0,28	Průměr	36,1	3,1	110	7,5	25,28	21,71	3,57	95,3	5,1			
	Min.	35,6	2,2	92	7,1	22,46	19,14	3,32	94,2	4,8	105	1 240	2,6
	Max.	36,6	3,9	140	7,8	28,10	24,28	3,82	96,4	5,4			
0,55	Průměr	36,3	6,7	183	7,1	25,23	20,81	4,42	109,4	6,1			
	Min.	35,6	3,9	161	7,0	25,20	20,64	4,28	104,8	5,8	129	1 350	3,0
	Max.	37,2	8,5	197	7,1	25,26	20,98	4,56	114,0	6,3			
0,83	Průměr	37,2	13,7	340	7,1	23,23	18,67	4,56	107,9	6,2			
	Min.	36,8	8,4	293	7,1	21,34	17,24	4,10	105,5	5,8	986	2 100	4,0
	Max.	37,5	16,2	403	7,2	25,12	20,10	5,02	110,2	6,6			
1,10	Průměr	36,8	20,0	473	7,1	20,44	16,29	4,15	108,7	6,0			
	Min.	35,8	14,2	405	7,1	19,58	15,48	4,10	102,9	5,6	1 414	2 600	3,0
	Max.	37,5	22,4	585	7,2	21,30	17,10	4,20	114,4	6,4			
1,38	Průměr	36,9	26,0	681	7,1	22,74	18,07	4,67	103,0	5,8			
	Min.	36,0	21,2	596	7,0	22,72	18,00	4,62	100,6	5,4	1 671	2 825	3,5
	Max.	37,5	32,1	767	7,2	22,76	18,14	4,72	105,3	6,2			
1,65	Průměr	37,0	30,8	745	7,1	19,15	13,85	5,30	106,2	5,6			
	Min.	36,1	27,4	649	7,0	17,72	13,00	4,72	100,3	5,5	1 474	2 600	5,1
	Max.	37,5	35,3	819	7,1	20,58	14,70	5,88	112,1	5,8			
1,93	Průměr	36,8	33,2	852	7,1	15,77	10,67	5,10	112,3	7,2			
	Min.	36,0	28,1	682	7,1	14,80	9,72	5,10	108,9	4,8	1 346	2 900	1,5
	Max.	37,5	37,5	934	7,1	16,74	11,62	5,10	115,6	9,6			
2,20	Průměr	36,6	30,8	1044	7,1	13,95	7,65	6,30	121,9	5,9			
	Min.	36,1	29,5	992	7,0	13,84	6,58	5,34	118,6	5,8	411	2 700	2,0
	Max.	37,5	33,3	1108	7,2	14,06	8,72	7,26	125,2	6,0			

Část digestátu bude využita k přípravě polotekutého substrátu pro bioreaktor, vždy však bude určitý přebytek, což je odpadní voda. Zpracování přebytečného digestátu z fermentace vyslazených řízků s přidáním kejdy v čistírně odpadních vod bude tedy obtížnější.

Na žádost cukerního oddělení Ústavu ropy a plynu byly provedeny rozborů kvality získaného bioplynu. Všechny vzorky byly odebrány v posledním stadiu obou zkušebních cyklů. Údaje o složení bioplynu jsou shrnuty do tab. VI., údaje o vlastnostech bioplynu do tab. VII.

Obsah methanu v testovaných vzorcích bioplynu (tab. VI.) byl nad 50 % objemových. Ze zkoumaných substrátů pro fermentaci bylo vyššího obsahu methanu (57,97 % obj.) dosaženo u bioplynu získaného z vyslazených řízků s přidáním kejdy.

Bioplyn z fermentace pouze řízků bez přidání kejdy obsahoval 57,61 % objemových methanu.

V žádném ze vzorků bioplynu získaného fermentací testovaných substrátů nebyly nalezeny C<sub>2</sub>–C<sub>6</sub> uhlovodíky v množství větším než cca 0,001 % objemových.

Bioplyn získaný fermentací vyslazených řízků bez přidání kejdy vykazoval přítomnost vodíku v množství 0,01 % objemových. Ve složení bioplynu z fermentace vyslazených řízků s kejdou nebyla přítomnost vodíku zjištěna. Obsah oxidu uhličitého byl 37,19–40,36 %.

Bioplyn získaný v jednotlivých testech se lišil obsahem dusíku a sirovodíku. V bioplynu vyrobeném fermentací vyslazených řízků bez přidání kejdy bylo dusíku méně (2,02 % obj.) než v bioplynu z fermentace s přidáním kejdy (4,84 % obj.). Obsah

Tab. IV. Shrnutí vedlejších účinků procesu kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků bez přidání kejdy

Zatížení bioreaktoru		Obsah organických látek		Pokles obsahu organických látek	Odstraněné organické látky z řízků	Výtěžnost bioplynu	
v sušině vyslazených řízků	v organické sušině řízků	před fermentací	po fermentaci			g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	dm <sup>3</sup> .dm <sup>-3</sup> .d
g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	%		%			
0,25	0,24	96,20	28,56	67,6	0,16	0,053	0,33
0,50	0,48	96,20	29,29	66,9	0,32	0,163	0,51
0,75	0,72	96,20	30,04	66,2	0,48	0,285	0,59
1,00	0,96	96,20	31,11	65,1	0,62	0,450	0,73
1,25	1,20	96,20	32,74	63,5	0,76	0,575	0,76
1,50	1,44	96,20	33,35	62,9	0,91	0,688	0,76
1,75	1,68	96,20	36,41	59,8	1,01	0,710	0,70
2,00	1,92	96,20	40,36	55,8	1,07	0,733	0,69

Tab. V. Shrnutí vedlejších účinků procesu kontinuální fermentace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním kejdy

Zatížení bioreaktoru		Obsah organických látek		Pokles obsahu organických látek	Odstraněné organické látky z řízků	Výtěžnost bioplynu	
v sušině řízků a kejdy	v org. sušině řízků a kejdy	před fermentací	po fermentaci			g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	dm <sup>3</sup> .dm <sup>-3</sup> .d
g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	g.dm <sup>-3</sup> .d suš.	%		%			
0,28	0,26	94,00	14,12	79,9	0,21	0,078	0,37
0,55	0,52	94,00	17,52	76,5	0,40	0,168	0,42
0,83	0,78	94,00	19,63	74,4	0,58	0,343	0,59
1,10	1,03	94,00	20,30	73,7	0,76	0,500	0,66
1,38	1,30	94,00	20,54	73,5	0,96	0,650	0,68
1,65	1,55	94,00	27,68	66,3	1,03	0,770	0,75
1,93	1,81	94,00	32,34	61,7	1,12	0,810	0,74
2,20	2,01	94,00	45,16	48,8	0,98	0,770	0,79

sirovodíku byl v bioplynu získaném z vyslazených řízků bez kejdy nižší (205 mg.m<sup>-3</sup>) než v bioplynu z fermentace s přidáním kejdy (265 mg.m<sup>-3</sup>).

Bioplyn získaný fermentací obou zkoumaných substrátů se vyznačoval spalným teplem cca 23 MJ.m<sup>-3</sup> a výhřevností více než 20 MJ.m<sup>-3</sup>.

Wobbeho index, což je poměr mezi spalným teplem plynu a druhou odmocninou jeho hustoty, poskytuje základ pro rozdělení plyných paliv do skupin. V případě obou substrátů nebyl nižší než 23 MJ.m<sup>-3</sup>.

Veškerý vyprodukovaný bioplyn je možné podle polské normy PN-C-04753:2002 „Zemní plyn. Kvalita plynu dodávaného odběratelům s rozvodné sítě“ zařadit na základě jeho vlastností do podskupiny Is ve skupině zemních plynů s vyšším obsahem dusíku.

Vyrobený bioplyn ani v jednom případě nebyl dostatečné kvality, aby jej bez standardizace bylo možné dodávat do rozvodné sítě. Lze jej však využít mnoha jinými způsoby.

Po odstranění sirovodíku lze vyrobeným bioplymem napájet plynový motor, v němž se chemická energie bioplynu přeměňuje na elektřinu a teplo. Část takto získané energie lze použít na

pokrytí vlastních potřeb bioplynových stanic, zbytek se prodává externím odběratelům.

Stejně jako zemní plyn lze bioplyn využít např. ke zpracování na kapalné palivo. Rovněž jej lze přímo spalovat v kotelně nebo sušičce tak, jak se bioplyn získaný fermentací odpadních vod z výroby využívá v cukrovarech.

Srovnání methanizace vyslazených cukrovarnických řízků samotných a ve směsi s hovězí kejdou uvádí na základě výsledků získaných v testech v mikrotechnickém měřítku tab. VIII.

### Závěr

1. Bez ohledu na použitý typ substrátu je zatížení zajišťující hladké fungování procesu cca 2 g.dm<sup>-3</sup> sušiny za den, za předpokladu, že je bioreaktor inokulován biologickým materiálem s vysokým obsahem methanogenních bakterií, teplota je kolem 36 °C, pH je udržováno na hodnotě ≥6,8, obsah těkavých mastných kyselin je udržován přibližně na 1 500 mg.dm<sup>-3</sup> CH<sub>3</sub>COOH a alkalita na cca 3 000 mg.dm<sup>-3</sup> CaCO<sub>3</sub>.

Tab. VI. Chemické složení bioplynu z methanizace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním a bez přidání kejdy

Typ fermentovaného substrátu	Obsah každé složky bioplynu					
	CH <sub>4</sub>	Uhlodíky 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>
Vyslazené cukrovarnické řízky bez přidání kejdy	57,61	< 0,001	40,36	2,02	0,01	205
Vyslazené cukrovarnické řízky s přidáním kejdy	57,97	< 0,001	37,19	4,84	0	265

Tab. VII. Vlastnosti bioplynu z methanizace vyslazených cukrovarnických řízků s přidáním a bez přidání kejdy

Typ fermentovaného substrátu	Hustota	Měrná hustota	Spalné teplo	Výhřevnost	Nejvyšší Wobbeho index
	kg.m <sup>-3</sup>	–	MJ.m <sup>-3</sup>	MJ.m <sup>-3</sup>	MJ.m <sup>-3</sup>
Vyslazené cukrovarnické řízky bez přidání kejdy	1,2348	0,9550	23,04	20,71	23,58
Vyslazené cukrovarnické řízky s přidáním kejdy	1,2099	0,9359	23,18	20,84	23,96

- V procesu kontinuální methanové fermentace vyslazených řízků bez kejdy dosahuje snížení obsahu organické hmoty cca 56 %, což zajišťuje pokles obsahu organické sušiny v digestátu proti substrátu o cca 40 % a výrobu bioplynu v objemu cca 0,82 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den o výhřevnosti 23,04 MJ.m<sup>-3</sup>.
- V procesu kontinuální methanové fermentace vyslazených řízků s přidáním kejdy dosahuje snížení obsahu organické hmoty cca 59 %, což zajišťuje pokles obsahu organické sušiny v digestátu proti substrátu o cca 35 % a výrobu bioplynu v objemu cca 0,84 dm<sup>3</sup>.dm<sup>-3</sup> za den o výhřevnosti 23,18 MJ.m<sup>-3</sup>.
- Bioplyn vyrobený fermentací vyslazených řízků bez kejdy obsahuje méně dusíku (2,02 % obj.) než z fermentace řízků spolu s kejdou (4,84 % obj.).
- Bioplyn vyrobený fermentací vyslazených řízků bez kejdy obsahuje méně sirovodíku (205 mg.m<sup>-3</sup>) než z fermentace řízků spolu s kejdou (265 mg.dm<sup>-3</sup>).
- Digestát vzniklý z fermentace vyslazených řízků bez kejdy je méně koncentrovaný (CHSK cca 600 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub>) než v případě fermentace řízků s kejdou (CHSK cca 900 mg.dm<sup>-3</sup> O<sub>2</sub>).

### Souhrn

Článek prezentuje výsledky zkoušek vlivu kejdy na proces methanové fermentace vyslazených cukrovarnických řízků. Byly provedeny srovnávací studie technologie kontinuální methanové fermentace samotných vyslazených řízků a řízků s přidáním kejdy v mikrotechnickém měřítku. Byly stanoveny základní parametry a výsledky methanizace vyslazených řízků, včetně účinnosti produkce a kvality bioplynu vyrobeného touto technologií. Byl zjištěn pozitivní vliv kejdy na methanovou fermentaci.

**Klíčová slova:** vyslazené cukrovarnické řízky, kejda, anaerobní digesce, bioplyn.

### Literatura

- BRZEZIŃSKI, A.: Male biogazownie rolnicze – czy to się opłaca? *Polska Wieś*, 2011, 5, 6.

- FELDE, A.: Potenciale der Züchtung von Rüben (Zucker- und Futterrüben) für die Erzeugung von Bioenergie. In *Międzynarodowa Konferencja – Aktualne problemy w przemyśle cukrowniczym i sposoby ich rozwiązywania*. Leszno: IPC, 2008, s. 21–33.
- FELDE, A.: Innowacyjne wykorzystanie buraka cukrowego w fermentacji biogazowej. *Poradnik Plantatora Buraka Cukrowego*. 2008, (4), s. 36–38.
- GANCARZ, Z.: Alternatywne metody zagospodarowania wysłodków. *Burak Cukrowy – Gazeta dla plantatorów*, 2007 (4), s. 37–38.
- JABŁOŃSKI, W.; WNUK, J.: *Zarządzanie odnawialnymi źródłami energii: Aspekty ekonomiczne – techniczne*. Sosnowiec: Oficyna wydawnicza Humanista, 2009, 546 s.
- JANCZUR, K.: Biogazownia rolnicza – inwestycja chroniąca klimat. *Czysta Energia*, 2009, (1), s. 25–27
- BIAŁOWIEC, A.; BIERNAT K.; WOJNOWSKA-BARYLA I.: Produkcja biogazu z frakcji organicznej wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych. *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2008, (7–8), s. 50–54.
- MARSZAŁEK, M.; BANACH, M.; KOWALSKI, Z.: Utylizacja gnojowicy na drodze fermentacji metanowej i tlenowej – produkcja biogazu i kompostu. *Chemia*, 108, 2011 (2), s. 143–158.
- SADECKA, Z.; MYSZOGRAJ, S.: Wykorzystanie biogazu w oczyszczalniach ścieków. *Ekotechnika*, 2008, (1), s. 21–25.
- SADECKA, Z.: Energia z osadów do technicznego wykorzystania, *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2009 (7–8), s. 14–18.
- WITEK, M.: Małoskalowa energetyka biogazowa – perspektywy rozwoju w warunkach polskich: *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2008, (10), s. 5–9.
- KASPRZAK, A.; KRZYŚIAK L.: Biomasa jako cenny surowiec do produkcji biogazu. *Laboratorium. Przegląd Ogólnopolski*, 2007, (9), s. 60–62.
- LEWANDOWSKI, W.: *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa: WNT, 2006, 432 s.
- MIKULA, J.: Odnawialne źródła energii w programach na lata 2007–2013. In *Proc. Innowacyjna energetyka. Rolnictwo energetyczne*. Warszawa, 2008.
- ONISZK-POPLAWSKA, A.; ZOWSIK, M.; WIŚNIEWSKI, G.: *Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego*. Gdańsk – Warszawa: EC BREC, 2003.
- STEEPA, M.: *Biogazownie rolnicze*. Warszawa: IBMER, 1992.
- LEDAKOWICZ, S.; KRZYSTEK, L.: Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 2005, (10), s. 1–8.

Tab. VIII. Porovnání methanizace vyslazených řízků s přidáním hovězí kejdy a bez něj

Specifikace	Fermentace cukrovarnických řízků	Fermentace cukrovarnických řízků s přidáním hovězí kejdy
Metoda fermentace	Kontinuální mezofilní fermentace	
Teplota	36 °C ±1 °C	
pH	≥ 6,8 pH, automaticky upravované 20% roztokem hydroxidu sodného	
Suroviny	Vyslazené cukrovarnické řízky 110 t.d <sup>-1</sup> o sušíně 19,90 % na vstupu a org. sušíně 96,20 % sušiny	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyslazené cukrovarnické řízky 110 t.d<sup>-1</sup> o sušíně 19,90 % na vstupu a org. sušíně 96,20 % sušiny</li> <li>• Hovězí kejda 11 t.d<sup>-1</sup> obsahu sušiny cca 3,41 % na vstupu a organické sušíně 94,00 % sušiny</li> </ul>
Denní kapacita bioplynové stanice – sušina org. sušina	21,89 t.d <sup>-1</sup> 21,06 t.d <sup>-1</sup>	21,89 + 0,38 = 22,27 t.d <sup>-1</sup> 21,06 + 0,36 = 21,42 t.d <sup>-1</sup>
Pracovní objem bioreaktoru	11 000 m <sup>3</sup>	
Zatížení bioreaktoru – vstupní hmota celk. sušina organická sušina	10,0 kg.m <sup>-3</sup> v.h. za den 2 kg.m <sup>-3</sup> suš. za den 1,91 kg.m <sup>-3</sup> org. suš. za den	11,0 kg.m <sup>-3</sup> v.h. za den 2 kg.m <sup>-3</sup> suš. za den 1,95 kg.m <sup>-3</sup> org. suš. za den
Výtěžnost bioplynu	0,8187 N m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> za den	0,8427 N m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> za den
Obsah methanu v bioplynu	57,61 %	57,97 %
Spalné teplo bioplynu	23,04 MJ.Nm <sup>-3</sup>	23,18 MJ.Nm <sup>-3</sup>
Bioplyn Množství Energetická hodnota	9 006 Nm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> 207 498 MJ.d <sup>-1</sup> 57 638 kWh	9 270 Nm <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup> 214 879 MJ.d <sup>-1</sup> 59 689 kWh
Odbourání organické sušiny substrátu	37 %	38 %

18. SYGIT, M.: *Przetwarzanie odpadów i produktów roślinnych w biogazowniach – aspekty ekonomiczne*. Wrocław: DCZT Politechnika Wroclawska, 2005.
19. BOHDZIEWICZ, J.; KUGLARZ, M.; MROWIEC, B.: Intensyfikacja fermentacji metanowej gnojowicy świńskiej przez wprowadzenie kosubstratu w formie bioodpadów komunalnych. *Nauka Przyr. Technol.* 2011, (5, 4), 53.
20. MAGREL, L.: Unieszkodliwianie gnojowicy świńskiej w wydzielonych komorach fermentacyjnych przed jej rolniczym wykorzystaniem. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej Wrocław*, 1996, 293, s. 147–154.
21. MAGREL, L.: *Prognozowanie procesu fermentacji metanowej mieszaniny osadów ściekowych oraz gnojowicy*. Białystok: WPB, 2004.
22. ROMANIUK, W.: *Ekologiczne systemy gospodarki obornikiem i gnojowicą*. IBMER, Warszawa, 2004.
23. ROSIK-DULEWSKA, Cz.: *Podstawy gospodarki odpadami*. Wyd. Nauk. PWN: Warszawa, 2007.
24. POLEĆ, B. ET AL.: Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Część I: Fermentacja statyczna wysłodków buraczanych. *Gaz. Cukrown.*, 2009 (11–12), s. 278–283, 289, 293, 305.
25. POLEĆ, B. ET AL.: Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Cz. II. Fermentacja półciągła wysłodków buraczanych. *Gaz. Cukrown.*, 2010 (5), s. 120–125.
26. POLEĆ, B. ET AL.: Możliwość wytwarzania biogazu w procesie fermentacji metanowej wysłodków buraczanych. Cz. III. Fermentacja ciągła wysłodków buraczanych. *Gaz. Cukrown.*, 2011 (4), s. 107–112.
27. KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H.: *Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer Verlag, Berlin, 2001.
28. WEILAND, P.: *Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland*; Gülzoer Fachgespräche, tom 15: Energetische Nutzung von Biogas: „Stand der Technik und Optimierungspotenzial”, Weimar, 2000, s. 8–27.
29. WELLINGER, A. ET AL.: *Biogas-Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen*, Aarau: Verlag Wirz, 1991.
30. *Biogaz rolnyczny – produkcja i wykorzystanie*. [online] [http://www.mae.com.pl/files/poradnik\\_biogazowy\\_mae.pdf](http://www.mae.com.pl/files/poradnik_biogazowy_mae.pdf).
31. *Biogaz: produkcja, wykorzystanie*. [online] [http://www.ieo.pl/dokumenty/obszary\\_badan/Biogaz%20-%20Produkcja%20Wykorzystywanie.pdf](http://www.ieo.pl/dokumenty/obszary_badan/Biogaz%20-%20Produkcja%20Wykorzystywanie.pdf).

**Poleć B., Baryga A., Szymański T., Małczak E.: Methane Fermentation of Sugar Beet Pulps with Addition of Cattle Liquid Manure**

The article presents the results of the influence of liquid manure on the process of methane fermentation of beet pulp. Comparative microtechnical studies on the process of continuous methane fermentation of beet pulp alone and pulp with the addition of liquid manure were conducted. The basic parameters and results of the pulp methane fermentation, including the efficiency and quality of biogas obtained in this process were determined. Beneficial effects of liquid manure on methane fermentation have been found.

**Key words:** beet pulp, liquid manure, anaerobic digestion, biogas.

**Kontaktní adresa – Contact address:**

Bożenna Poleć, Ph.D., prof. Wacław Dąbrowski Institute of Agricultural and Food Biotechnology, Sugar Department, Inżynierska 4, 05-084 Leszno, Poland, e-mail: bozenna.polec@ibprp.pl