

Methanový fermentační proces cukrovarnických odpadů

METHANE FERMENTATION PROCESS OF THE SUGAR INDUSTRY WASTE

Bożenna Poleć, Andrzej Baryga

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

Řepné řízky, kořínky, úlomky bulev a řepné listy jsou dlouhodobě využívány jako cenné krmivo pro přežvýkavce. Avšak v poslední době poptávka po těchto vedlejších produktech v Polsku dramaticky klesla. Řada cukrovarů má velké problémy s využitím řepných řízků, stejně jako kořínků a úlomků bulev. V krajních případech jsou odváženy do lesů jako krmivo pro zvěř. Chrást je ponechán na polích a zaorán. Tato situace je způsobena značným poklesem stavu skotu v Polsku a využíváním alternativních krmiv. Mimo to, vysoký obsah vody ve vedlejších produktech cukrovky zvyšuje náklady na přepravu a skladování. Tyto ekonomické aspekty přinutily výrobce cukru hledat nové způsoby využití tohoto materiálu. Dalším důvodem, proč cukrová řepa již není využívána jako krmivo, je skutečnost, že dřívější vazby mezi rostlinnou a živočišnou výrobou byly v zemědělském sektoru porušeny. Je totiž stále častější, že zemědělec – produkující cukrovku – nepotřebuje řepné řízky, protože nechová dobytek. Vývoj nových způsobů využití výše uvedených odpadů mimo krmiva má tedy pro cukrovarnický průmysl zásadní ekonomický význam.

V posledních letech byl odborem cukrovarnictví na IBPRS (Institutu biotechnologie zemědělství a potravinářství prof. Waclawa Dąbrowského) realizován výzkumný projekt nazvaný Výzkum a vývoj technologií methanové fermentace cukrovarnických vyslazených řízků a dalších organických odpadů (kořínků a řepné listů) k výrobě vysokoenergetického bioplynu. Výstupem tohoto výzkumu je technologie methanové fermentace vyslazených řízků společně s pokyny, jak navrhnout bioplynovou

stanici. Získané výsledky výzkumu potvrdily, že výroba bioplynu je velmi dobrý a nákladově nenáročný způsob zpracování řízků a dalších organických odpadů cukrovarnictví (1, 2, 3, 4). Podobný výzkum byl již prováděn na pokročilé úrovni v západní Evropě, ale publikace týkající se fermentace řepy, vyslazených řízků a řepných listů se převážně věnují procesu vycházejícího ze směsí odpadů, které nepocházejí z cukrovaru (5, 6, 7, 8, 9, 10). V současnosti je nejčastěji používána v bioplynových jednotkách ve světě siláž (kukuřice, tráva, energetické plodiny ad.) jako hlavní zdroj bioplynu v methanovém fermentačním procesu, ostatní substráty (např. kejda, obilí a odpady z jiných odvětví zemědělského průmyslu) jsou používány méně často v závislosti na specifických podmínkách (11, 12, 13, 14, 15, 16).

V Polsku se provádí výzkum především v oblasti bioplynového zpracování komunálních odpadních vod. Také vznikly první publikace výzkumu průmyslových odpadů (v průmyslu papíru a celulosy). V posledních letech narůstá na významu získání a využití zemědělského bioplynu, zvláště získávaného z hnoje. Bylo vydáno mnoho zpráv o tomto tématu (11, 13, 14, 15, 17). Bohužel v literatuře je jen málo zpráv zabývajících se bioplynovými jednotkami věnovanými výhradně vyslazeným řízkům a dalším vedlejším produktům cukrovarnictví (6, 17). Vzhledem k narůstající poptávce po bioenergii se na trhu objevila řada výrobců systémů pro získání bioplynu a společností nabízejících produkty v této oblasti. Oproti jasně vzestupnému trendu v produkci bioplynu z organických odpadů je zřejmý nedostatek specifických znalostí a technologií pro cukrovarnictví. Vývoj trhu umožnil nárůst počtu různých technických řešení na míru pro různé potřeby uživatelů. Avšak není dostatečný přehled o momentálně dostupných technologiích na trhu, které by byly nezávislé na zájmu společností, a který by byl podpořen vědeckými argumenty. Získávání energie z obnovitelných zdrojů – z bioplynu – může být výhodně spojeno se správným využíváním materiálů. Proto jsou mnohé cukrovary a společnosti ochotny do zařízení na získávání bioplynu investovat.

Tab. 1. Kvalita substrátů použitých v methanovém fermentačním výzkumu

Označení	Jednotka	Hodnoty		
		řepné řízky	úlomky a kořínky	listy cukrovky
Sušina	%	16,98	12,46	18,21
Kvocient popela	% suš.	5,12	5,09	17,93
Organické látky	% suš.	94,88	94,91	82,07
Obsah bílkovin	% suš.	12,34	12,85	25,80
Obsah tuku	% suš.	0,71	0,96	0,66
Obsah vlákniny	% suš.	21,79	14,78	11,53
Bezdušičkatý extrakt	% suš.	60,02	66,41	45,95
Celkový fosfor	g P · kg ⁻¹ suš.	49,60	60,00	66,40
Celkový dusík	g N · kg ⁻¹ suš.	239,24	251,04	407,12

Materiál a metody

Použitý studovaný materiál zahrnoval silážované řepné (vyslazené) řízky, kořínky, úlomky bulev a listy cukrovky. Jejich charakteristika je uvedena v tab. I. Fermentory byly inokulovány kalem z tanku methanové fermentace odpadní vody cukrovaru o obsahu sušiny 30 g.dm⁻³, obsahu 30,7 % organických prvků, s biochemickou aktivitou odstraněné chemické spotřeby kyslíku 14 mg.g⁻¹ sušiny za den. Výzkum kontinuální fermentace byl prováděn v mikrotechnickém měřítku v reaktoru s pracovní

Tab. II. Porovnání základních průměrných parametrů a indikátorů kontinuální fermentace vyslazených řízků

Zatížení reaktoru v sušině vyslazených řízků	Veličina a naměřené hodnoty											
	teplota	množství bioplynu	CHSK	pH	sušina	min. látky	org. látky	celkový dusík	celkový fosfor	těkavé mast. kys.	alkalita	acidita
(g·dm ⁻³ suš. · d ⁻¹)	(°C)	(dm ³ ·d ⁻¹)	(mg·dm ⁻³ O ₂)	(1)	(g·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³ CH ₃ COOH)	(mg·dm ⁻³ CaCO ₃)	(mval·dm ⁻³)	
0,5	36,0	7,07	150	7,28	15,55	10,93	4,62	46,6	5,2	163	1 100	1,8
0,9	36,0	12,31	204	7,11	17,00	11,64	5,36	65,6	6,3	360	1 600	2,3
1,2	36,0	16,41	226	7,29	16,54	11,02	5,52	96,7	5,6	510	2 100	2,5
1,6	35,9	20,30	266	7,45	16,92	10,76	6,16	105,5	5,2	503	2 200	2,5
2,0	36,0	22,89	355	7,42	16,83	10,23	6,59	101,2	5,9	523	2 250	2,5

Tab. III. Porovnání parametrů a indikátorů kontinuální fermentace úlomků bulev a kořínků

Zatížení reaktoru v sušině vyslazených řízků	Veličina a naměřené hodnoty											
	teplota	množství bioplynu	CHSK	pH	sušina	min. látky	org. látky	celkový dusík	celkový fosfor	těkavé mast. kys.	alkalita	acidita
(g·dm ⁻³ suš. · d ⁻¹)	(°C)	(dm ³ ·d ⁻¹)	(mg·dm ⁻³ O ₂)	(1)	(g·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³ CH ₃ COOH)	(mg·dm ⁻³ CaCO ₃)	(mval·dm ⁻³)	
0,5	36,0	6,48	196	7,23	22,44	15,16	7,28	98,3	8,4	296	1 150	1,5
0,9	35,7	11,37	273	7,10	23,56	15,53	8,03	91,6	7,7	454	1 200	1,5
1,2	36,0	14,14	350	7,10	24,57	15,44	9,13	96,6	6,6	720	1 250	1,2
1,6	35,9	17,16	468	7,13	25,94	15,39	10,55	99,85	7,3	1 033	1 300	1,1
2,0	36,0	19,80	539	7,04	27,67	15,26	12,41	106,2	7,5	1 065	1 350	1,4

kapacitou 40 dm³, který byl vybaven míchadlem s nízkým počtem otáček. Fermentor byl obklopen vodním pláštěm o kapacitě 80 dm³, přičemž voda byla vyhřívána akvaristickým topením. Teplota fermentoru byla řízena na hodnotu 35–37 °C nastavením teploty vody v plášti (spínáním a vypínáním topení). pH fermentoru bylo řízeno na žádanou hodnotu 6,8 pomocí peristaltického čerpadla dávkujícího roztok hydroxidu sodného. Kontinuální dávkování řízků přicházejících s fermentovaným materiálem bylo realizováno rovněž peristaltickým čerpadlem. Substrátová drť byla připravena smícháním s odtokem z fermentoru a byla kontinuálně dávkována peristaltickým čerpadlem v postupně zvyšovaném množství, odpovídajícím zatížení fermentoru 0,5; 0,9; 1,0; 1,3; 1,7 a 2,0 g·dm⁻³ sušiny za den.

Zatížení fermentoru se měnilo každých 5 dní. Výtok z fermentoru do nádrže (rovnající se množství vstupujících řízků) byl zajišťován rovněž pomocí peristaltického čerpadla. Výzkum kontinuální fermentace se prováděl ve třech cyklech:

- Cyklus I – fermentace, při které vstupovaly do fermentoru pouze upravené řízky v množství odpovídajícím 0,5; 0,9, 1,3; 1,7 a 2,0 g·dm⁻³ sušiny za den, což odpovídalo množství organické hmoty 0,47; 0,85; 1,23; 1,61 a 1,90 g·dm⁻³ org. suš. za den.
- Cyklus II – fermentace úlomků a kořínků vstupujících do fermentoru, v množství odpovídajícím 0,5; 0,9, 1,3; 1,7 a 2,0 g·dm⁻³ suš. za den, což odpovídalo množství organické hmoty 0,47; 0,85; 1,23; 1,61 a 1,90 g·dm⁻³ org. suš. za den.
- Cyklus III – fermentace řepných listů vstupujících do fermentoru, v množství odpovídajícím 0,5; 0,9, 1,3; 1,7 a 2,0 g·dm⁻³

suš. za den, což odpovídalo množství organické hmoty 0,41; 0,74; 1,07; 1,39 a 1,64 g·dm⁻³ org. suš. za den.

Proces byl řízen na základě měření teploty, pH, množství získaného bioplynu a analýzy CHSK, zbytkové sušiny, obsahu anorganických a minerálních látek, obsahu nutrientů (amoniak, dusitany a dusičnany, obsah organického a celkového dusíku, celkový obsah fosforu, obsah těkavých mastných kyselin), alkality a acidity.

Vzorky získaného bioplynu byly hodnoceny ve Výzkumném ústavu ropy a plynu ve Varšavě. Byly sledovány tyto parametry bioplynu: kvalita bioplynu (obsah CH₄, N₂, CO₂, O₂, H₂, H₂S, nasycené uhlovodíky C₂–C₆), jeho hustota, spalné teplo, výhřevnost a Wobbeův index. Použity byly následující výzkumné testovací postupy: reakce (potenciometrická metoda), CHSK (metoda s dichromanem draselným), celkový fosfor (molekulární absorpční spektrofotometrická metoda – fotokolorimetrie, po předchozí mineralizaci), 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 (výpočetem jako součet obsahu dusíku dle Kjeldahla, dusičnanů a dusitanů), celkový dusík dle Kjeldahla (specifická metoda – destilační, s následnou titrací po mineralizaci vzorku za katalýzy kyselinou sírovou), dusičnanový dusík (molekulární absorpční spektrofotometrická metoda – fotokolorimetrie),

Tab. IV. Porovnání průměrných parametrů a indikátorů kontinuální fermentace řepných listů

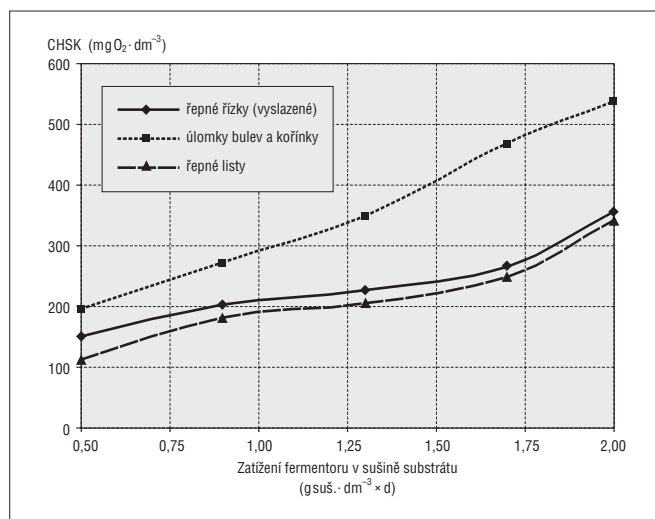
Zatížení reaktoru v sušině vyslazených řízků	Veličina a naměřené hodnoty											
	teplota	množství bioplynu	CHSK	pH	sušina	min. látky	org. lát-ky	celkový dusík	celkový fosfor	těkavé mast. kys.	alkalita	acidita
(g·dm ⁻³ suš.·d ⁻¹)	(°C)	(dm ³ ·d ⁻¹)	(mg·dm ⁻³ O ₂)	(1)	(g·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³)		(mg·dm ⁻³ CH ₃ COOH)	(mg·dm ⁻³ CaCO ₃)	(mval·dm ⁻³)	
0,5	35,8	3,53	112	7,46	15,20	10,76	4,37	65,3	8,1	171	1 000	1,0
0,9	36,0	6,73	182	7,39	15,60	11,09	4,51	86,6	9,2	326	1 220	2,8
1,2	36,0	9,24	206	7,29	16,19	11,30	4,89	103,7	9,0	598	1 480	8,0
1,6	35,8	11,76	248	7,41	16,44	11,13	5,27	113,0	9,8	708	1 900	13,5
2,0	35,9	12,38	342	7,36	17,66	11,26	6,40	118,2	10,0	996	2 260	14,0

dusitanový dusík (molekulární absorpční spektrofotometrická metoda – fotokolorimetrie), amoniakální dusík (titrační metoda po destilaci parou), organický dusík (výpočetem jako rozdíl mezi dusíkem dle Kjeldahla a amoniakálním dusíkem), složení bioplynu (CH₄, N₂, CO₂, O₂, H₂, nasycené uhlovodíky C₂–C₆-metodou plynové chromatografie pomocí přístroje Hewlett Packard 5890), sirovodík v bioplynu (jodometrická titrace, analýza plynu procházejícího přes absorpční roztok přímo ze zdroje) a vlastnosti bioplynu (hustota, spalné teplo, výhřevnost, Wobbeův index; výpočetem z chemického složení bioplynu).

Výsledky a diskuse

Výsledné parametry a indikátory testovaných substrátů kontinuální fermentace jsou shrnuty do tab. II. až IV. Podle údajů v tabulkách byly všechny parametry fermentačního procesu udržovány na optimální hodnotě. Teplota procesu byla udržována na hodnotě 36 °C ± 1 °C, což je optimum pro mesofilní fermentaci, přičemž se pohybovala v rozmezí 35,9–36,0 °C při fermentaci řepných řízků, 35,7–36,0 °C při fermentaci kořínků a úlomků a 35,8–36,0 °C při fermentaci řepných listů. Po celou dobu fermentace jednotlivých substrátů dosahovalo pH hodnot

Obr. 1. Vztah mezi CHSK na výstupu z fermentoru a zatížením reaktoru v sušině substrátu



7,11–7,45 při fermentaci řepných řízků, 7,04–7,23 při fermentaci kořínků a úlomků bulev, a 7,29–7,46 při fermentaci řepných listů (mělo by být v průměru nad 6,8).

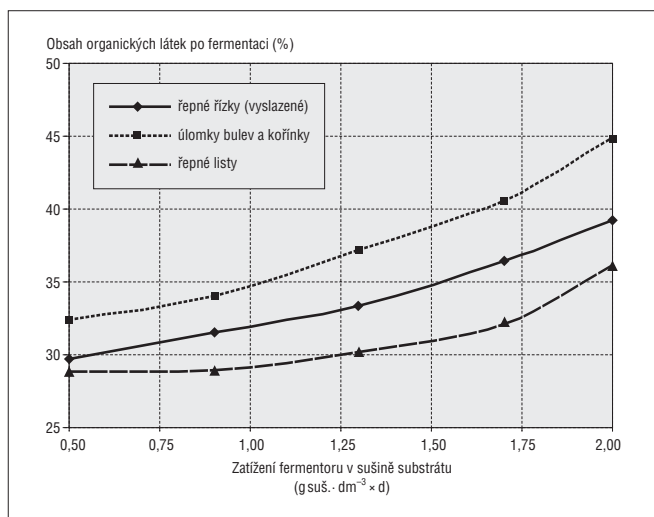
Koncentrace nutrientů (N a P) byla odpovídající pro správný průběh procesu methanové fermentace. Poměr CHSK : N : P by měl být nejméně 100 : 2,5 : 0,5. Pro všechny substráty byl tento poměr vyšší (vypočtený na základě údajů v tab. II., III. a IV.) a v průměru dosahoval hodnoty 100 : 34,6 : 2,3 při fermentaci řepných řízků, 100 : 29,4 : 2,2 při fermentaci kořínků a úlomků, a 100 : 44,7 : 4,2 při fermentaci řepných listů. Pokud fermentace probíhá řádně, koncentrace těkavých organických kyselin by měla být udržována na hodnotách do 1000 mg·dm⁻³ CH₃COOH. Koncentrace těchto kyselin ve fermentačním procesu jednoduchého substrátu se pohybovala 163–523 mg·dm⁻³ CH₃COOH pro fermentaci řepných řízků, 296–1065 mg·dm⁻³ CH₃COOH pro fermentaci úlomků a kořínků, a 171–996 mg·dm⁻³ CH₃COOH pro fermentaci řepných listů. Alkalita by měla být udržována na hodnotě 1000–3000 mg·dm⁻³ CaCO₃. Při fermentaci jednotlivých substrátů byla v rozmezí: 1 100–2 250 mg·dm⁻³ CaCO₃ pro fermentaci řepných řízků, 1 150–1 350 mg·dm⁻³ CaCO₃ pro fermentaci úlomků a kořínků, a 1 000–2 260 mg·dm⁻³ CaCO₃ pro fermentaci řepných listů. Při fermentaci jednotlivých substrátů byla alkalita v rozmezí: 1,8–2,5 mval·dm⁻³ při fermentaci řepných řízků, 1,1–1,5 mval·dm⁻³ při fermentaci kořínků a úlomků bulev a 1,0–14,0 mval·dm⁻³ při fermentaci řepných listů.

Jak je ukázáno na obr. 1., vztah mezi chemickou spotřebou kyslíku (CHSK) výstupu z fermentace a zatížením reaktoru v sušině substrátu ukazuje na to, že CHSK na výstupu z fermentoru narůstalo s narůstajícím zatížením u všech typů substrátu: 150–355 mg·dm⁻³ O₂ při fermentaci řepných řízků (tab. II. a obr. 1.); 196–539 mg·dm⁻³ O₂ při fermentaci kořínků a úlomků bulev (tab. III. a obr. 1.), a 112–342 mg·dm⁻³ O₂ při fermentaci řepných listů (tab. IV. a obr. 1.).

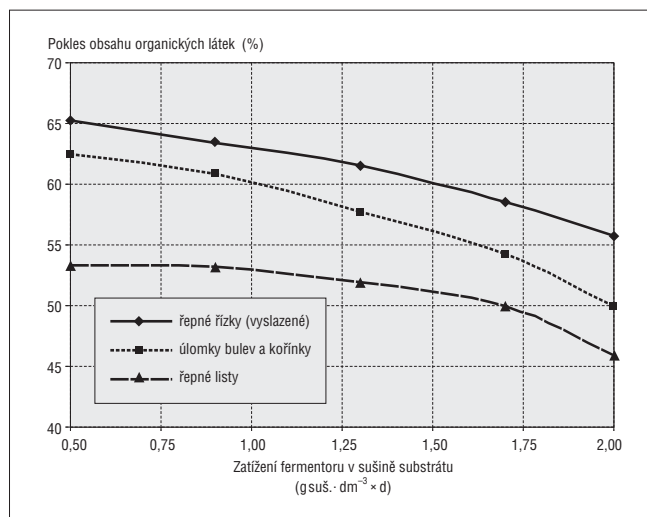
Mělo by být zdůrazněno, že je sice část vystupujících toků z fermentoru využita pro přípravu šarže polotuhé vstupní suroviny pro fermentor, ale tento tok bude vždy v přebytku, tedy vzniká odpad. Tento přebytek z výstupu fermentoru po rozkladu kořínků a úlomků bulev půjde velmi těžce využít v čistírně odpadních vod.

Obsah organických látek v sušině ve fermentované biomase narůstal se zvýšením zatížením reaktoru (obr. 2.) a dosahoval hodnot: 29,7–39,2 % při fermentaci řepných řízků; 32,4–44,9 % při fermentaci kořínků a úlomků; a 28,8–36,2 % při fermentaci řepných listů.

Obr. 2. Vztah mezi obsahem organických látek v produktu fermentace a zatížením reaktoru v sušině substrátu



Obr. 3. Vztah mezi poklesem obsahu organických látek v produktu fermentace a zatížením reaktoru v sušině substrátu



Pokles obsahu organických látek vztažený k surovému nefermentovanému substrátu klesal se zvyšujícím se zatížením reaktoru (obr. 3.) a kolísal během sledování v rozmezí: 55,7–65,2 % při fermentaci řepných řízků, podíl organických látek před procesem byl 94,88 %; 50,0–62,5 % při fermentaci kořínků a úlomků bulev, podíl organických látek před procesem byl 94,91 %; a 45,9–53,3 % při fermentaci řepných listů, podíl organických látek před procesem byl 82,07 %.

Zatížení organických látek, odstraňovaných při fermentačním procesu, narůstalo s narůstajícím zatížením reaktoru v sušině (obr. 4.) a pohybovalo se v rozmezí: 0,31–1,06 g.dm⁻³ org. suš. za den při fermentaci řepných řízků, 0,28–0,90 g.dm⁻³ org. suš. za den při fermentaci kořínků a úlomků, a 0,22–0,75 g.dm⁻³ org. suš. za den při fermentaci řepných listů.

Produkce bioplynu (obr. 5.) měřená v jednotkách průtoku vztažených na jednotku objemu reaktoru byla v rozmezí: 0,177–0,552 dm³.dm⁻³ za den při fermentaci řepných řízků, 0,162–0,495 dm³.dm⁻³ za den při fermentaci kořínků a úlomků, a 0,088–0,310 dm³.dm⁻³ za den při fermentaci řepných listů. Vztah mezi produkcí bioplynu a zatížením reaktoru v kontinuálním fermentačním procesu je vyjádřen rovnicemi:

$$y = -0,0452x^2 + 0,3743x + 0,0029$$

při fermentaci řepných řízků,

$$y = -0,0354x^2 + 0,3023x + 0,0259$$

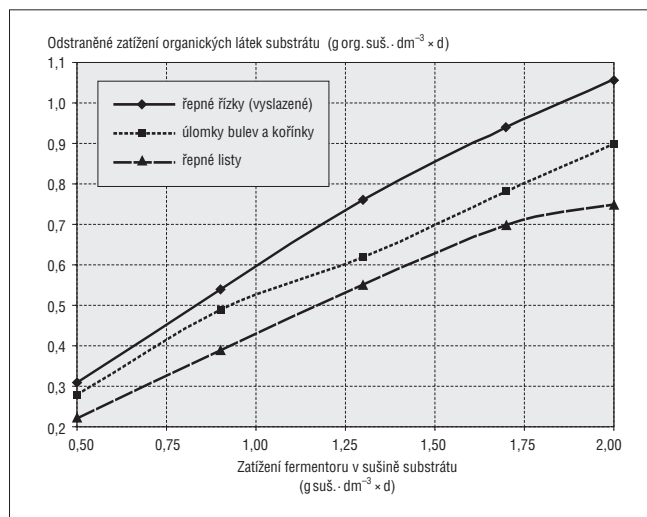
při fermentaci kořínků a úlomků bulev,

$$y = -0,0491x^2 + 0,2739x - 0,0378$$

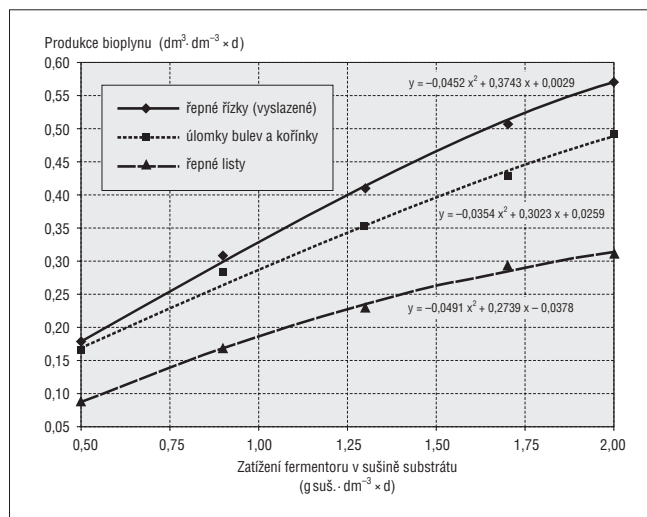
při fermentaci řepných listů.

Údaje o chemickém složení a energetické hodnotě bioplynu získané z každého substrátu při methanové fermentaci jsou uvedeny v grafech na obr. 6. až 9. Obr. 6. ukazuje, že obsah methanu překročil 50 % obj. ve všech případech. Mezi studovanými fermentovanými substráty byl pozorován nejvyšší obsah methanu (56,08 % obj.) v bioplynu získaném z řepných řízků. Pokud jde o bioplyn získaný fermentací kořínků a úlomků bulev, množství bylo nižší – 51,11 % obj., u řepných listů 51,56 % obj. V důsledku toho bioplyn z fermentace řízků měl vyšší spalné

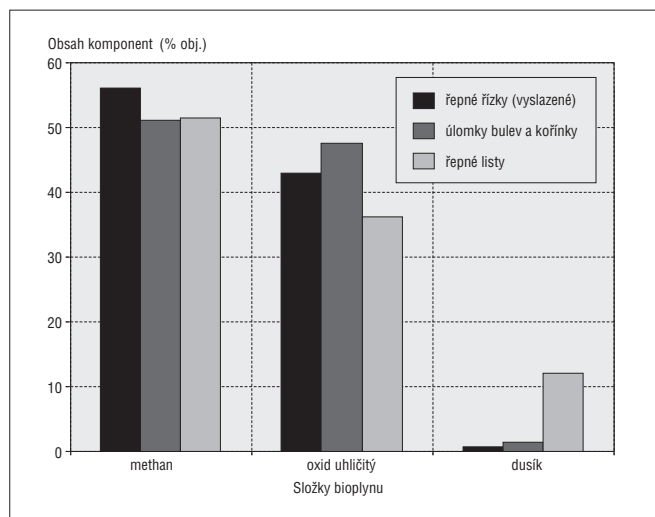
Obr. 4. Vztah mezi odstraněným zatížením org. látek ve ferm. substrátech a reaktorovým zatížením v sušině substrátu



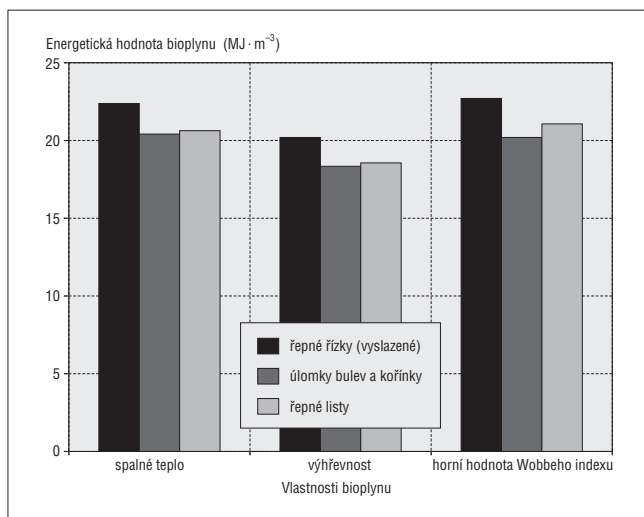
Obr. 5. Vztah mezi produkcí bioplynu vztaženou na objemovou jednotku reaktoru a zatížením reaktoru v sušině



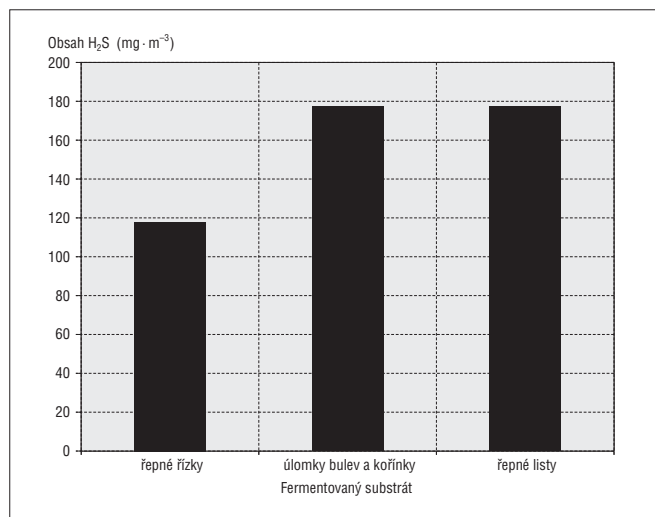
Obr. 6. Porovnání obsahu methanu, oxidu uhličitého a dusíku v bioplynu v závislosti na typu fermentovaného substrátu



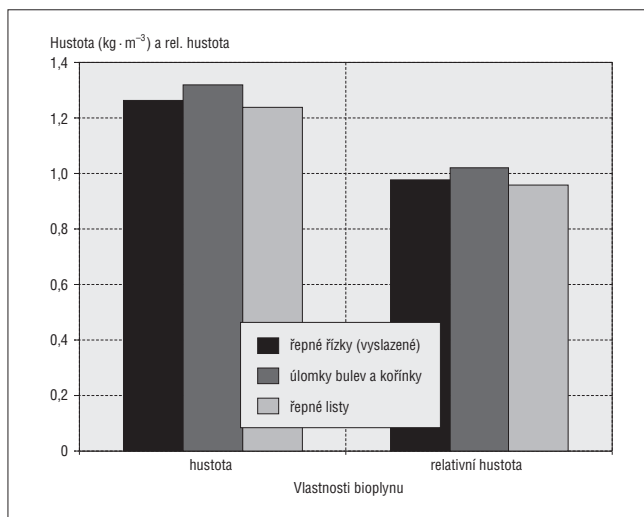
Obr. 8. Porovnání energetické hodnoty bioplynu v závislosti na typu fermentovaného substrátu



Obr. 7. Porovnání obsahu sirovodíku v bioplynu v závislosti na typu fermentovaného substrátu



Obr. 9. Srovnání hustoty bioplynu v závislosti na typu fermentovaného substrátu



teplo (asi 2 MJ.m⁻³) a vyšší výhřevnost než bioplyn z kořínků, úlomků a řepných listů. Wobbeho index, definovaný jako poměr spalného tepla plynu k odmocnině jeho hustoty a poskytující základ rozdělení plyných paliv do podskupin, dosahoval 22,70 MJ.m⁻³ pro produkci bioplynu z řepných řízků, 20,22 MJ.m⁻³ z řepných kořínků a úlomků bulev, a 21,06 MJ.m⁻³ pro řepné listy. V žádném z bioplynů produkovaných fermentací studovaných substrátů nepřesáhlo množství uhlovodíků C₂-C₆ 0,001 % obj. Množství oxidu uhličitého bylo přibližně 40 % obj. Přítomnost vodíku nebyla detekována v žádném z testovaných bioplynů. Podíl obsahu dusíku v bioplynu byl nejvyšší v případě produkce z řepných listů, kde činil 12,07 % obj. U ostatních substrátů byl v rozmezí 0,81–1,28 % obj. Dusík byl přítomen většinou ve formě amoniaku. Obsah sirovodíku v bioplynu produkovaném z řízků byl 118 mg.m⁻³, obsah v druhých dvou substrátech byl stejný – 177 mg.m⁻³. Podle polské normy PN-C-04753:2002 „Zemní plyn. Kvalita plynu dodávaného zákazníkům potrubní sítí“ a podle složení produkovaného bioplynu a jeho vlastností, nemůže být zkoumaný bioplyn zařazen do žádné skupiny zemních plynů

s vysokým obsahem dusíku (přes 7 %). Požadavky pro nejnižší podskupinu (LS) jsou následující:

- Wobbeho index 32,6 MJ.m⁻³ ≤ Ws < 37,6 MJ.m⁻³;
- spalné teplo alespoň 26,0 MJ.m⁻³;
- výhřevnost alespoň 24,0 MJ.m⁻³;
- obsah sirovodíku max. 7 mg.m⁻³.

Získané bioplyny neměly kvalitu, která by umožňovala, aby byly přímo dodávány do distribuční sítě, aniž by byly standardizovány. Avšak mohou být využity mnoha jinými způsoby. Po odstranění sirovodíku lze vyrobený bioplyn dopravit do plynové turbíny, která přemění chemickou energii bioplynu na elektřinu a teplo. Část této energie může být využita k pokrytí potřeb bioplynové stanice a zbylá část může být prodána externím zákazníkům.

Po zkapalnění může být bioplyn rovněž použit podobným způsobem jako zemní plyn. Dále může být využit jako palivo v kotli nebo sušárně podobně jako bioplyn získaný fermentačním procesem průmyslových odpadních vod v cukrovaru. Vyjdeme-li

z výsledků kontinuální fermentace substrátů, lze konstatovat, že je možné, aby do fermentoru s dobou zdržení 20 dní bylo kontinuálně dávkováno zatížení asi 2,0 g.dm⁻³ suš. za den. Porovnáváme-li účinky kontinuální methanové fermentace různých substrátů, na prvním místě musí být uvažována kvantita a kvalita bioplynu a kvalita produktů fermentace (fermentovaného média a permanentního výluhu z fermentace).

Pokud je přípustné zatížení reaktoru 2,0 g.dm⁻³ suš. za den, je třeba uvést, že efektivita bioplynu dosažená v kontinuálním fermentačním procesu řízků, úlomků a kořínků je srovnatelná. V případě řepných listů je účinnost asi o 20 % nižší. Při tomto zatížení bude podíl organických látek v pevném produktu fermentace řepných řízků asi 39 %, u úlomků a kořínků asi 45 % a v případě fermentace řepných listů 36 %. Za těchto podmínek lze výluh z fermentace charakterizovat pomocí CHSK asi 350 mg.dm⁻³ O₂ při fermentaci řepných řízků, asi 540 mg.dm⁻³ O₂ při fermentaci úlomků a kořínků a asi 340 mg.dm⁻³ O₂ při fermentaci listů.

Závěr

V kontinuální methanové fermentaci řepných řízků, úlomků bulev, kořínků a řepných listů umožňoval chod reaktoru při zatížení 2 g.dm⁻³ sušiny za den dosáhnout snížení organických látek v jednotlivých substrátech:

- 55,7 % – při fermentaci řepných řízků, zajišťujících 39,2 % obsahu organických látek ve fermentovaném substrátu, výtěžek bioplynu 0,572 dm³.dm⁻³ za den a 0,54 dm³.g⁻¹ org. suš., při výhřevnosti 22,43 MJ.m⁻³,
- 44,9 % – při fermentaci úlomků a kořínků, zajišťujících 44,9 % obsahu organických látek ve fermentovaném substrátu, výtěžek bioplynu 0,495 dm³.dm⁻³ za den a 0,55 dm³.g⁻¹ org. suš., při výhřevnosti 20,45 MJ.m⁻³,
- 45,9 % – při fermentaci řepných listů, zajišťujících 36,2 % obsahu organických látek ve fermentovaném substrátu, výtěžek bioplynu 0,310 dm³.dm⁻³ za den a 0,41 dm³.g⁻¹ org. suš., při výhřevnosti 20,61 MJ.m⁻³.

Kvalita produkovaného bioplynu prokázala, že po odstranění sirovodíku může být zpracován v plynové turbíně, ve které je chemická energie převedena na elektřinu a teplo, nebo může být použita jako palivo pro kotel nebo sušárnu. Pokud se zkapalní, může být využíván podobně jako zemní plyn.

Souhrn

Cílem výzkumu bylo vyvinout technologii výroby vysokoenergetického bioplynu (obsahujícího více než 50 % methanu) z cukrovarnických vyslazených řízků a dalších organických odpadů vznikajících v cukrovarech. Kontinuální fermentační test byl realizován v mikrotechnickém měřítku. Výzkum zahrnoval tři zkoušky fermentace: řepných řízků, úlomků a kořínků, a řepných listů. Byly určeny parametry a stanoveny efekty při následujících zatíženích reaktoru: 0,5; 0,9; 1,3; 1,7 a 2,0 g.dm⁻³ suš. za den. Testy kontinuální fermentace ukázaly, že při zatížení substrátu 2 g.dm⁻³ suš. za den pokles obsahu organických látek v závislosti na použitém substrátu činil 45,9–55,7 %, přičemž obsah organických látek ve fermentovaném produktu byl 36,2–44,9 %. Množství získaného bioplynu v závislosti na použitém substrátu bylo v rozmezí 0,310–0,572 dm³.dm⁻³ za den a 0,41–0,54 dm³.g⁻¹ org. suš., výhřevnost činila 20,45–22,43 MJ.m⁻³.

Klíčová slova: cukrovarnictví, vyslazené řízky, úlomky a kořínky, řepné listy, methanová fermentace, bioplyn, cukrovarnické odpady.

Literatura

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. BARYGA, A.: Cukrownie wytwarzające gaz?. *Xapoo6uk (Przemysł Spożywczy)*, 2014 (11–12), s. 1–5.
5. HUTNAN, M. ET AL.: Two-Step Pilot-Scale Anaerobic Treatment of Sugar Beet Pulp. *Pol. J. Environ. Stud.*, 10, 2001 (4), s. 237–243.
6. BROOKS, L. ET AL.: Biogas from sugar beet press pulp as substitute of fossil fuel in sugar beet factories. *Water. Sci. Technol.*, 58, 2008 (7), s. 1498–1504.
7. SEPPALA, M. ET AL.: Biogas from energy crops—optimal pre-treatments and storage, co-digestion and energy balance in boreal conditions. *Water. Sci. Technol.*, 58, 2008 (9), s. 1857–1863.
8. KARWOWSKA, A.; GOŁASZEWSKI, J.; ŻELAZNA, K.: Przydatność Beta vulgaris L. jako substratu biogazowni rolniczej Bałtyckie forum biogazu. *Ekoenergetyka – Biogaz*, 2012 (17–18), s. 222–228.
9. MONTAÑÉS, R.; PÉREZ, M.; SOLERA, R.: Anaerobic mesophilic co-digestion of sewage sludge and sugar beet pulp lixiviation in batch reactors: Effect of pH control. *Chem. Eng. J.*, 2014 (255), s. 492–499.
10. ZIEMIŃSKI, K.; KOWALSKA-WENTEL, M.: Effect of enzymatic pretreatment on anaerobic co-digestion of sugar beet pulp silage and vinasse. *Bioresource Technol.*, 2015 (180), s. 274–280.
11. BIAŁOWIEC, A.; BERNAT, K.; WOJNOWSKA-BARYLA, I.: Produkcja biogazu z frakcji organicznej wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych. *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2008 (7–8), s. 50–54.
12. FELDE, A.: Potenziale der Züchtung von Rüben (Zucker- und Futterrüben) für die Erzeugung von Bioenergie. In *Materiały z konferencji międzynarodowej „Aktualne problemy w przemyśle cukrowniczym i sposoby ich rozwiązywania“*, Leszno: IPC, 2008, s. 21–33.
13. LEDAKOWICZ, S.; KRZYSTEK, L.: Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego. *Biotechnologia*, 2005 (10), s. 1–8.
14. ONISZK-POPLAWSKA, A.; ZOWSIK, M.; WIŚNIEWSKI, G.: *Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego*. Gdańsk – Warszawa: EC BREC, 2003.
15. SADECKA, Z.: Energia z osadów do technicznego wykorzystania. *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2009 (7–8), s. 14–18.
16. WITEK, M.: Małoskalowa energetyka biogazowa – perspektywy rozwoju w warunkach polskich. *Gaz, Woda, Techn. Sanit.*, 2008 (10), s. 5–9.
17. GANCARZ, Z.: Alternatywne metody zagospodarowania wysłodków. *Burak Cukrowy – Gazeta dla plantatorów*, 2007 (4), s. 37–38.

Poleć B., Baryga A.: Methane Fermentation Process of the Sugar Industry Waste

The objective of the study was to develop technologies for producing high-energy biogas (containing more than 50% methane) from sugar beet pulp and other organic waste generated in sugar factories. A continuous fermentation test was carried out at a micro technical scale. The study was conducted in three trials of fermentation: sugar beet pulp, tails and tailings and sugar beet leaves. The parameters were established and the effects were determined at the following

LISTY CUKROVARNICKÉ a ŘEPAŘSKÉ

reactor loads of dry matter: 0.5; 0.9; 1.3; 1.7 and 2.0 g DM/dm³×d. Tests of continuous methane fermentation showed that at the reactor load of dry matter of the substrate 2 g DM/dm³×d the reduction of organic matter, depending on the substrate, was 45.9–55.7% and the content of organic dry matter in the fermentation products was 36.2–44.9%.

Kontaktní adresa – Contact address:

Dr. Inż. Andrzej Baryga, Instytut Biotechnologii Przemysłu Rolno-Spożywczego im. prof. Wacława Dąbrowskiego, Zakład Cukrownictwa, ul. Inżynierska 4, 05-084 Leszno, Polska, e-mail: baryga@poczta.onet.pl

The amount of yielded biogas, depending on the fermentation substrate, was in the range of 0.310 to 0.572 dm³/dm³×d and 0.41 to 0.54 dm³/g ODM and the heat of combustion 20.45–22.43 MJ/m³.

Key words: sugar industry, sugar beet pulp, beet tails and beet tailings, sugar beet leaves, methane fermentation, biogas, sugar industry waste.