INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY

Fed-batch mezofilní anaerobní digesce organické (podsítné) frakce tuhého komunálního odpadu

Jiří Rusín, Kateřina Kašáková, Kateřina Chamrádová
VSB - Technical University of Ostrava, The Institute of Environmental Technology,
17. listopadu 15/2172, Ostrava - Poruba, 708 33, Czech Republic
E-mail: jiri.rusin@vsb.cz, katerina.kasakova@vsb.cz, katerina.chamradova@vsb.cz

Souhrn

Provedena byla jednoduchá zkouška produkce bioplynu z organické (podsítné) frakce tuhého komunálního odpadu (TKO) při vysokém obsahu sušiny. Vzorek podsítné frakce TKO byl podroben mezofilní anaerobní digesci v rotačním bubnovém bioreaktoru INFORS HT Terrafors IS s denním dávkováním odpadu a bez denního odběru digestátu. Vzorek obsahoval zejména plasty, papír, vlákna a prach z vysavačů, střepy skla a keramiky, písek, drobné kameny atd., a prakticky žádné většině částice potravin či zelené biomasy. Obsah celkové sušiny vsázky vzrostl z počátečních 7,7 % hm. na cca 25 % hm., ale ani po dodatečném navýšení neutralizační kapacity se nepodařilo zkrátit výtěžku methanu vhodného pro provozní aplikaci. Vzorek podsítné frakce TKO produkoval po dobu 50 dnů zkoušky průměrně 0,099 $m_n^3 kg^{-1}$ bioplynu o obsahu methanu 39 % obj. Anaerobní zpracování by bylo ekonomicky schůdné pouze v případě kofermentace s hodnotnějšími bioodpady.

Vstupní surovina

Vzorek podsítné frakce tuhého komunálního odpadu byl dovezen v lednu 2014 z polské firmy MIKI RECYKLING sp. z o.o., Krakow. Jednalo se o jednorázově odebraný vzorek o hmotnosti 30 kg podsítné frakce získané mechanickým třídením (MS-OFMSW) přes síto 80 x 80 mm a následně přes jemnější síto 40 x 40 mm, obsahující zejména plasty, papír, vlákna a prach z vysavačů, střepy skla a keramiky, písek, drobné kameny atd. Ve vzorku nebyly viditelně téměř žádné rozměrnější částice potravinových bioodpadů nebo zelené biomasy.

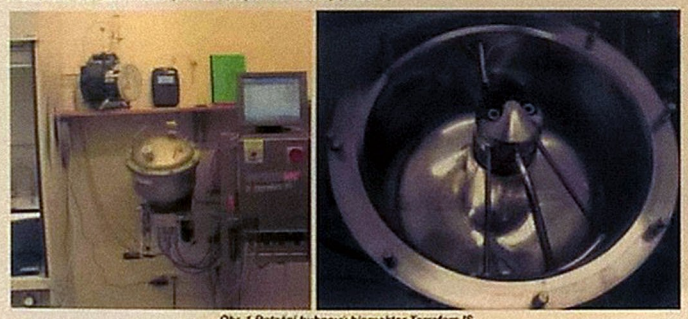
Vzorek byl převezen v černém plastovém pytli a v laboratoři přesypán do PE nádoby o objemu 0,03 m^3 s těsným víkem. V této nádobě byl vzorek uchován při laboratorní teplotě 19 až 22 °C. Pro účely fyzikálního modelování anaerobní digesce byl vzorek použit v původním stavu. Pro účely analýz byl nejprve připraven laboratorní vzorek mletím na střižném mlýnu TESTCHEM LMN-180. Analytický vzorek byl připraven následným mletím materiálu nožovým mlýnkem IKA Tube Mill Control a ponechán v mlecí nádobce v exsikátoru.

Analýzy

Sypná hmotnost vzorku byla orientačně měřena přímo v zásobní nádobě 0,03 m^3. Ve vodném výluhu vzorku byla zjištěna hodnota pH dle normy ČSN EN 15933. Vzorek byl termogravimetrickým analyzátorem LECO TGA 701 analyzován na obsah celkové sušiny (TS, 105 °C do konstantní hmotnosti, ČSN EN 15934) a ztrátu žíháním sušiny (VS, 550°C do konstantní hmotnosti, ČSN EN 15935). Obsah prvků C,H,N,S byl stanoven analyzátorem LECO Truspec CHN+S 628. Spalné teplo vzorku bylo dle normy ČSN EN 14918 stanoveno poloautomatickým izoperibolickým kalorimetrem LECO AC 600. Obsah celkového uhlíku sušiny vzorku byl měřen termickým analyzátorem LECO TOC RC612 s IČ detekcí dle normy ČSN EN 13137. Poměr org. kyselin a anorg. uhličitanu byl ověřen ruční titrací na vzorku tekutiny vytlačené z digestátu.

Laboratorní model

Mezofilní anaerobní digesce byla vedena v laboratorním bioreaktoru INFORS HT Terrafors IS, jehož reakční prostor tvoří tlaková nádoba tvaru bubnu s odnímatelným víkem, rotující kolem své osy (viz obr. 1).



Obr. 1 Rotační bubnový bioreaktor Terrafors IS

Dávkování odpadu a aditiv bylo prováděno ručně 1x denně ráno v 8:30 hodin přes vstupní hrdlo DN50 ve víku. Buben byl po vložení nové dávky po dobu 5 minut situován osou do horizontální roviny, po zbytek času byl v nakloněné poloze (+45°). Otáčky bubnu byly po celou dobu zkoušky ponechány na 1,0 min^{-1}. Odběr digestátu v průběhu zkoušky nebyl prováděn, hmotnost vsázky narůstala. Bioplyn odcházel trubicí zasahující nad úroveň vsázky a procházející stacionární hřídelí bubnu.

Produkce bioplynu byla měřena bubnovým plynoměrem Ritter TG05, bioplyn byl dále odváděn do digestoře. Složení bioplynu bylo měřeno 1x denně v 8:20 přenosným analyzátorem GEOTECH Biogas5000 s IČ senzory s dlouhou vlnovou délkou pro složky CH_4, CO_2 a H_2 a elektrochemickými senzory pro O_2 a H_2S. Analyzátor s rychlou odezvou odebral vzorek bioplynu (vždy 0,0004 m^3) přes ventil ve víku reaktoru.

Výsledky a diskuze

Rozbor vzorku odpadu v původním stavu charakteristického silným organickým zápachem a kyselostí je uveden v tabulce 1. Odpad o sypné hmotnosti minimálně 140 kg m^{-3} obsahoval 76,95 % hm. celkové sušiny, z níž ztráta žíháním činila 81 až 85 $\%_{TS}$.

Rozbor laboratorního vzorku odpadu mletého nožovým mlýnem na částice < 15 mm je rovněž uveden v tabulce 1. Při mletí se vzorek výrazně zahřál, obsah sušiny vzrostl na přibližně 89 % hm. Ztráta žíháním byla naměřena 81 $\%_{TS}$.

V tabulce 1 je rovněž uveden rozbor dvou analytických vzorků odpadu. Vzorky měly konzistenci hrubší buničité vaty. Analytický vzorek 2 byl pro analýzu připraven o týden později než vzorek 1.

Anaerobní proces byl nastartován naplněním reaktoru 7 kg tekutého inokula - čerstvé hovězí kejdy o obsahu celkové sušiny 7,7 % hm., ztráty žíháním 81 % hm. sušiny a pH 7,0. Spuštěno bylo otáčení bubnu rychlostí 1,0 min^{-1} a temperování na teplotu 40 ± 0,2 °C. Deset dnů bylo inokulum ponecháno bez jakýchkoliv přídavků. Došlo k ustálení produkce bioplynu na úrovni 0,03 $m_n^3 kg^{-1}$. Následující den bylo započato pravidelné jednorázové denní dávkování podsítné frakce TKO v pracovních dnech. První dávka byla zvolena nižší (0,05 kg), druhá dávka již byla 0,1 kg a všechny další dávky byly 0,1 kg. O víkendech dávkování prováděno nebylo.

Vzhledem ke srovnatelné velikosti částic odpadu a velikosti otvoru ve víku reaktoru nebylo možné denně odebírat vzorek digestátu, aby byla zachována hmotnost vsázky, tedy aby byl proces veden semikontinuálně. V průběhu zkoušky tedy hmotnost vsázky narůstala ze 7 kg až na cca 10 kg. Proces bylo možno označit jako „Fed-Batch". Na obr. 2 je vidět vzhled vzorku podsítné frakce (vlevo) a digestátu (vpravo). Na obr. 3 je následně zobrazen digestát v reaktoru.

15. den zkoušky bylo do reaktoru aplikováno 1,0 g přípravku SCHAUMANN BC PRO START, který podporuje anaerobní digesci jednak dodáním makro-prvků Ca, Mg, P, Fe, a mikro-prvků Zn, Cu, Mo, Co, jednak zvýšením uhličitanové neutralizační kapacity. V následujících dnech skutečně produkce bioplynu mírně narůstala. 21. den zkoušky se vyskytly obtíže s otáčením bubnu, proto byl reaktor ihned otevřen a vsázka byla částečně rozdružena přístrojem Testchem SLM (robustně provedený kuchyňský mixér) bez vyjmutí vzduchu, a poté vrácena do reaktoru. Vzorek vsázky byl analyzován na obsah sušiny, která činila 15 % hm. Rozdružení nebylo příliš efektivní, protože některé rozměrné částice byly stále přítomny. Vnesením vzduchu do vsázky při homogenizaci byl anaerobní proces dočasně utlumen. Trvalo 5 dnů, než produkce bioplynu dosáhla úrovně před homogenizací. 30. den zkoušky byl aplikován přípravek SCHAUMANN BC PRO ACUT (2,0 g) pro podporu anaerobní digesci zejména zvýšením uhličitanové neutralizační kapacity a dodáním železa. V následujících dnech byla produkce bioplynu znatelně vyrovnanější, ale obsah methanu se nezvýšil. Od 35. dne procesu docházelo k pozvolnému poklesu produkce bioplynu. 50. den byla zkouška ukončena.

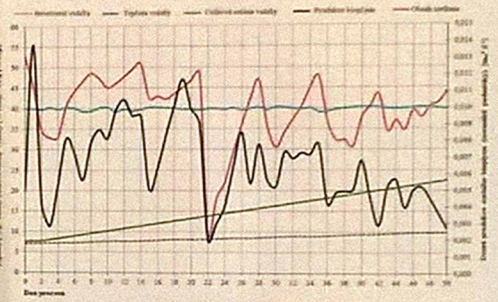
Procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 2. Průměrné zatížení 4,835 $kg_{VS} m^{-3} d^{-1}$ je relativně nízké, hodnota odpovídá spíše mokrému procesu. Doba zdržení byla díky Fed-batch režimu relativně krátká (50 dnů), ale vzhledem k denní dávce odpadu, která byla natolik nízká (maximálně 1,42 % hm. vsázky), vyplývá, že i při kontinuálním procesu by odpovídala velmi dlouhé době zdržení 187 dnů. V praxi by takto nízké dávkování samozřejmě nebylo rentabilní.

Obr. 2 Podsítná frakce (vlevo) a digestát (vpravo)

Obr. 3 Digestát v reaktoru

Tabulka 1 Parametry podsítné frakce

Původní vzorek (podsítné < 40 mm)	
- sypná hmotnost minimálně	140 kg m^{-3}
- celková sušina TS	76,95 % hm. vzorku
- ztráta žíháním ZŽ (VS)	průměrně 81 až 85 $\%_{TS}$
- pH vodného výluhu	4,0
- teoretický výtěžek methanu dle Buswella a Richardse [6 - 7]	Y_{CH4} = 0,463 $m_n^3 kg^{-1}$
Laboratorní vzorek (mletý, nevodivý)	
- celková sušina	89,26 %
- ztráta žíháním ZŽ (VS)	81,00 %
Analytické vzorky	
vzorek 1	
- celková sušina TS	68,32 %
- ztráta žíháním ZŽ (VS)	64,92 %
- celkový uhlík TC	52 - 60 %
- celkový organický uhlík TOC	> 95 $\%_{TC}$
vzorek 2	
- vlhkost W	1,22 %
- popelnatost Ash	19,89 %
- popel A	17,23 %
- čistá ztráta C_{org}	58 % (dopočtení)
- spalné teplo	20,9 MJ/kg
C	55,0 % sušiny
H	7,0%
N	1,0 %
S	0,3 %
O	30 % (odhad)
C:N	58



Obr. 4 Grafický průběh fed-batch procesu

Tabulka 2 Procesní parametry fed-batch digesce

Délka zkoušky	Průměrné parametry denní dávky vstupní směsi (bioodpadu)								Parametry digestátu				
t	m_V	p_V	V_V	Z	HRT	pH	TS	VS	VS_{TS}	t	pH	TS	VS	VS_{TS}
d	kg d^{-1}	kg dm^{-3}	$dm^3 d^{-1}$	$kg_{VS} m^{-3} d^{-1}$	d		% hm.			°C		% hm.		
50	0,066	1,400	0,047	4,835	187	4,5	76,95	63,9	83,0	40,0	7,5	13,8	12,0	81,5

Produkce bioplynu						Produkce methanu				
$B_{n,celk}$	B_n	B_{TS}	B_{VS}	B_t	B_t	CH_4	$M_{n,celk}$	M_n	M_{TS}	M_{VS}	M_t	M_t
$m_n^3 d^{-1}$	$m_n^3 kg^{-1}$	$m_n^3 kg_{TS}^{-1}$	$m_n^3 kg_{VS}^{-1}$	$m_n^3 m^{-3} d^{-1}$	$m_n^3 kg^{-1} d^{-1}$	$\%_{vol}$	$dm_n^3 d^{-1}$	$m_n^3 kg^{-1}$	$m_n^3 kg_{TS}^{-1}$	$m_n^3 kg_{VS}^{-1}$	$m_n^3 m^{-3} d^{-1}$	$m_n^3 kg^{-1} d^{-1}$
0,00052	0,099	0,128	0,155	0,93	0,0005	39	2,6	0,039	0,050	0,061	0,37	0,0002

Vysvětlivky:
m_V – hmotnost denní dávky vstupní směsi
V_V – orientační objem denní dávky vstupní směsi
HRT – průměrná hydraulická doba zdržení biomasy v bioreaktoru
$B_{n,celk}$ – průměrná denní produkce suchého bioplynu (obdobně pro methan M_n)
B_{VS} – měrná produkce bioplynu vzhledem ke ztrátě žíháním sušiny vstupní směsi
B_t – průměrná intenzita produkce bioplynu vzhledem k předpokládanému objemu vsázky
B_t – průměrná intenzita produkce bioplynu vzhledem k hmotnosti denní dávky vstupní směsi
p_V – orientační měrná hmotnost vstupní směsi
Z – průměrné objemové zatížení bioreaktoru
B_n – měrná produkce bioplynu ze vstupní směsi
B_{TS} – měrná produkce bioplynu z TS vstupní směsi

Denní produkce bioplynu se pohybovala nejčastěji mezi 0,003 až 0,013 m^3 (viz obrázek 4). K této hodnotě bylo nutno v pracovních dnech přičíst konstantu 0,0005 m^3, která zohledňuje součet odběru vzorku bioplynu analyzátorem (0,0004 m^3) a odhadovaný únik bioplynu při dávkování substrátu (0,0001 m^3). Produkce bioplynu měla s prodlužující se dobou procesu nad 35 dnů klesající tendenci, což přičítáme více stárnoucímu vzorku odpadu v zásobním množství, než akumulaci inhibujících látek v reaktoru. Lze říci, že v průběhu pracovního týdne produkce spíše mírně narůstala, což působilo rostoucí zatížení pozvolna rozkládanými látkami. Během víkendů bez dávkování produkce bioplynu rychle poklesla. Zvýšení zatížení hmotností denních dávek odpadu nad 0,1 kg (1,4 % počáteční hmotnosti vsázky) za celou dobu experimentu provedeno nebylo, neboť obsah methanu v bioplynu jen výjimečně přesáhl hranici 50 % obj. a bylo také potřeba nepřetěžovat pohon rotace bioreaktoru. Nízký obsah CH_4 byl jistě způsoben zanedbatelným podílem lipidů a proteinů v odpadu, ale do určité míry i potlačeným rozvojem methanogenní kultury vlivem toxických látek. Vzhledem k finančním omezením však nebylo možno tyto předpoklady doložit analytickými rozbory. Pro provozní zařízení je potřeba místo Fed-batch procesu doporučit (semi)kontinuální proces, ale předně by při něm měla být uplatněna kodigesce podsítné frakce s bioodpady bohatšími na dusík pro snížení celkového poměru C:N pod 30.

Průměrná produkce bioplynu z podsítné frakce činila 0,099 $m_n^3 kg^{-1}$ při průměrném obsahu methanu 39 %. Průměrný obsah sušiny 10 vzorků digestátu na konci zkoušky činil 22,5 % hm. při ztrátě žíháním sušiny 78,0 % hm. Zápach digestátu při laboratorní teplotě byl zejména amoniakální, ale subjektivně méně obtěžující, než zápach surového odpadu.

Závěr

Padesátidenní zkouškou fed-batch mezofilní anaerobní digesce podsítné frakce získané mechanickou separací tuhého komunálního odpadu byla prokázána možnost produkce bioplynu při obsahu celkové sušiny vsázky v reaktoru 8 – 22 %. Pro provozní zařízení doporučujeme místo fed-batch procesu semikontinuální proces, ale v každém případě je nutné počítat s produkcí bioplynu nepřesahující 0,1 $m^3 kg^{-1}$ a s relativně nízkým obsahem methanu v bioplynu, do 50 % obj. Efektivitu procesu zvýší především kodigesce s dusíkem bohatšími bioodpady - předně se stájovými hnojivy, a s rostlinnou biomasou typu siláží apod. Konstrukce bioreaktoru pro suchý proces musí odolávat vysoké abrazivitě podsítné frakce, namotávání umělých vláken či kovových drátů apod. a měla by využívat systém míchání celého objemu vsázky.

Literatura

[1] De Baere, L.: Anaerobic digestion of solid waste: state-of-the-art. Water Science and Technology, vol 41(3), 2000, pp. 283-290.
[2] Khalid, A., Arshad, M., Anjum, M., Mahmood, T., Dawson, L.: The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Management, vol 31, 2011, pp 1737-1744.
[3] Niella, A., Cano, R., Vinot, M., Fernández, E., Fdz-Polanco, M.: Anaerobic digestion modeling of the main components of organic fraction of municipal solid waste. Process Safety and Environmental Protection, vol 94, 2015, pp 180–187.
[4] Dhar, H., Kumar, P., Kumar, S., Mukherjee, S., Vaidya, A. N.: Effect of organic loading rate during anaerobic digestion of municipal solid waste. Bioresource Technology, In Press December 2015.
[5] De Baere, L.; Mattheeuws, B.: Anaerobic digestion of MSW in Europe. 2010 update and trends. Biocycle, February 2010, pp. 24-26.
[6] Buswell, A. M., Mueller, H. F.: Mechanism of Methane Fermentation, Ind. Eng. Chem. 1952, 44 (3), pp. 550–552.
[7] Richards BK, Cummings RJ, White TE, Jewell WJ (1991) Methods for kinetic analysis of methane Fermentation in high-solids biomass digesters. Biomass and Bioenergy 1 (2), pp. 65-73.

Poděkování

Práce vznikla v rámci projektu Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu *„Národní program udržitelnosti I"*, projekt LO1208 *„Teoretické aspekty energetického zpracování odpadů a ochrany prostředí před negativními dopady"* (2014-2018). Výsledky pocházejí také z projektu TA ČR EPSILON TH01030513 *„Výzkum vysoko-sušinové (suché) anaerobní kodigesce organické frakce směsného komunálního odpadu a dalších bioodpady a vývoj (semi)kontinuálně pracující kontejnerové bioplynové stanice s systémem převrstvování vsázky"* (2015-2017).