

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

Jiří Rusín, Kateřina Kašáková, Kateřina Chamrádová

VSB - Technical University of Ostrava, The Institute of Environmental Technologies,
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 digesti v reaktoru typu rotujícího bubnu 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 viditelné částice potravin či zelené biomasy. Obsah celkové sušiny vsázky vzrostl z počátečních 7,7 % hm. na cca 25 % hm., ale ani umělým navýšením neutralizační kapacity se nepodařilo dosáhnout výtěžku methanu vhodného pro provozní aplikaci. Vzorek podsítné frakce TKO produkoval po dobu 50 dnů zkoušky průměrně $0,099 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu o obsahu methanu 39 % obj.

1. Úvod

Na konci 80. letech představovalo skládkování a spalování hlavní metody zpracování organické frakce tuhého komunálního odpadu (TKO). Počet kompostáren a tedy zpracování organické frakce (TKO) pomocí kompostování bylo velmi obtížné z hlediska kvality odpadu, který obsahoval těžké kovy a inertní materiály. Bohužel recyklace byla omezena pouze na papír, sklo a snadno obnovitelné materiály [1].

Po vytrídění využitelných složek z tuhého komunálního odpadu zbývá směsný odpad s většinou značným obsahem organické frakce, která je z velké části biologicky rozložitelná. Vedle přímého kompostování respektive termofilní aerobní stabilizace se v posledních 20 letech stává anaerobní digesce stále populárnější alternativní metodou zpracování tohoto materiálu [2], [3], [4]. I přesto že ostatní termické metody zpracování (zplyňování, pyrolýza, plazmová technologie) se stávají rozšířenější a počet těchto zařízení roste, není tento růst tak exponenciální jako v případě instalací zařízení pracujících na principu anaerobní digesce pro výrobu bioplynu.

Anaerobní digesce zaujímá asi 20 % z celkového množství zpracování TKO v Evropě. Zařízení na zpracování TKO s největší kapacitou se nacházejí v Německu s 2 milionem tun ročně a ve Španělsku se 1,6 milionem tun ročně [5].

2. Materiály a metody

Vstupní surovina

Vzorek podsítné frakce tuhého komunálního odpadu byl získán v lednu 2014 z polské firmy MIKI RECYKLING, Krakow. Jednalo se o jednorázově odebraný vzorek o hmotnosti 30 kg podsítné frakce získané mechanickým tříděním (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 viditelné žádné částice potravinových bioodpadů nebo biomasy.

Vzorek byl převezen v černém plastovém pytli, v laboratoři anaerobní digesce přesypán do plastové nádoby o objemu $0,03 \text{ m}^3$ a následně nádoba byla uzavřena těsným víkem. V této nádobě byl vzorek uchován při laboratorní teplotě (19 až 22 °C).

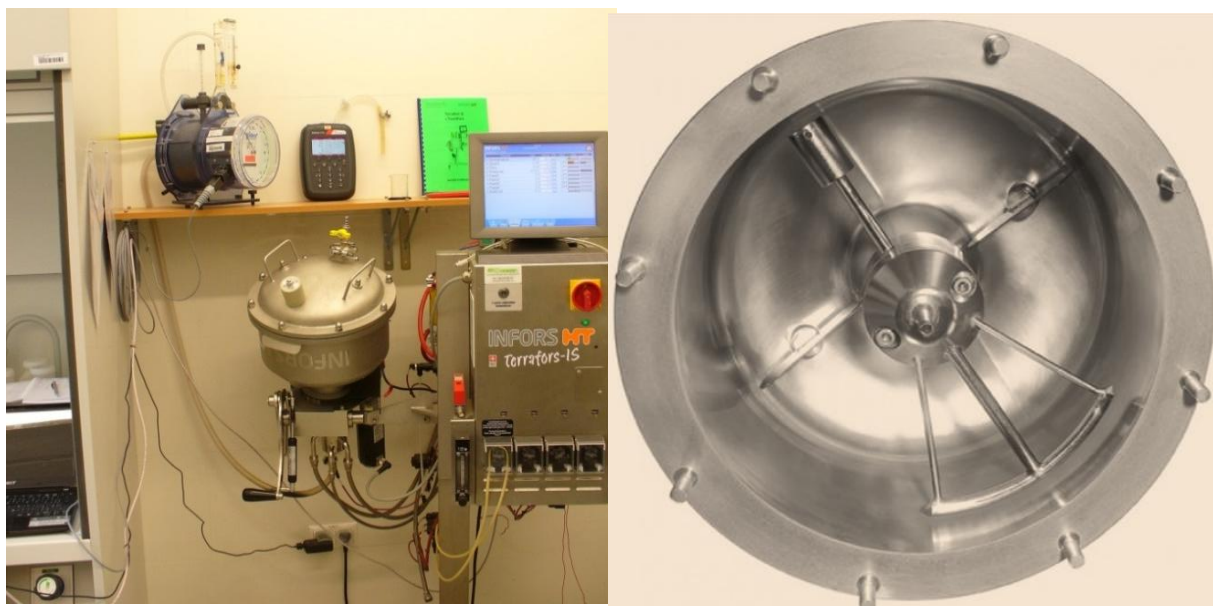
Pro účely modelové digesce za laboratorních podmínek byl vzorek použit v původním stavu. Pro účely analýz byl nejprve připraven laboratorní vzorek mletím na střížném mlýnu TESTCHEM LMN-180. Analytický vzorek byl připraven z laboratorního vzorku následným mletím stolního mlýnku IKA Tube Mill a posléze vzorek byl vysušen do konstantní hmotnosti. Analytický vzorek byl před analýzami uchován v uzavřené mlecí nádobce IKA Tube Mill v excikátoru.

Analýzy

Sypná hmotnost vzorku byla měřena orientačně přímo v zásobní nádobě 0,03 m³. Ve vodném výluhu vzorku byla orientačně měřena hodnota pH. Vzorek byl termogravimetricky analyzován na obsah celkové sušiny (TS, 105 °C do konst. hm.) a ztrátu žiháním sušiny (VS, 550°C do konst. hm.) analyzátozem LECO TGA 701. Prvkové složení sušiny vzorku bylo měřeno analyzátozem LECO Truspec CHN+S. Spalné teplo vzorku bylo dle normy ČSN ISO 1928 stanoveno poloautomatickým izoperibolickým kalorimetrem LECO AC 600. Obsah celkového uhlíku sušiny vzorku byl měřen termickým analyzátozem LECO TOC RC612 s IČ detekcí dle normy ČSN EN 13137.

Laboratorní model

Mezofilní anaerobní digesce byla vedena v laboratorním bioreaktoru INFORS Terrafors IS, jehož reakční prostor tvoří tlaková nádoba tvaru bubnu rotující kolem své osy při sklonu osy 0° nebo 45° nad horizontální rovinou (viz obr. 1).



Obr. 1 Modelová aparatura včetně bubnového bioreaktoru

Dávkování odpadu a aditiv bylo prováděno ručně jedenkrát denně ráno v 8:30 hodin přes vstupní otvor DN50 ve víku reaktoru. Buben byl po vložení nové dávky po dobu 5 minut skloněn osou do horizontální roviny. Otáčky bubnu byly po celou dobu zkoušky ponechány na 1 min⁻¹. Odběr digestátu v průběhu zkoušky nebyl prováděn. Bioplyn odcházel přes vyvýšenou sběrnici se soustavou otvorů a přes trubici v ose bubnu.

Produkce bioplynu byla měřena bubnovým plynoměrem Ritter TG05, bioplyn byl dále odváděn do digestoře. Složení bioplynu bylo měřeno jedenkrát denně v 8:20 přenosným analyzátozem GEOTECH Biogas5000 s IČ senzory s duální vlnovou délkou pro složky CH₄, CO₂ a H₂ a elektrochemickými senzory pro O₂ a H₂S. Analyzátor s velmi rychlou odezvou odebíral vzorek bioplynu (vždy 0,0004 m³) přes vzorkovací ventil ve víku reaktoru.

3. Výsledky a diskuze

Rozbor vzorku odpadu v původním stavu charakteristického silným organickým zápachem je uveden v tabulce 1. Odpad o sypné hmotnosti minimálně 140 kg.m⁻³ obsahoval 76,95 % hm. celkové sušiny, z níž ztráta žiháním činila 81 až 85 % hm.

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 žiháním byla naměřena 81 % hm. sušiny.

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

Tabulka 1 Rozbor vzorku podsítné frakce TKO získané z MIKI RECYKLING, Krakow

Původní vzorek (podsítné < 40 mm)	
-	sypná hmotnost minimálně 140 kg.m ⁻³
-	celková sušina TS 76,95 % hm. vzorku
-	ztráta žíháním ZZ (VS) přibližně 81 až 85 % hm. sušiny
-	pH vodného výluhu 4,5
-	teoretický výtěžek methanu na základě prvkového složení a Buswellovy rovnice modifikované Richardsem [6], [7] $Y_{CH_4} = 0,463 \text{ m}_N^3 \text{ kg}^{-1}$
Laboratorní vzorek (pouze mletý nožovým mlýnem, nesušený)	
-	celková sušina TS 89,26 %
-	ztráta žíháním ZZ (VS) 81,00 %
Analytický vzorek (přibližně sušina)	
VZOREK 1	
-	celková sušina TS 98,32 %
-	ztráta žíháním ZZ (VS) 84,92 %
-	celkový uhlík TC 57 - 60 %
VZOREK 2	
-	vlhkost W 1,22 %
-	prchavá hořlavina Daf 78,95 %
-	popel A 12,33 %
-	fixní uhlík C _{fix} 7,50 % (dopočet)
-	spalné teplo 26,8 MJ/kg
-	C 55,0 % sušiny
-	H 7,0%
-	N 1,0 %
-	S 0,5 %
-	O 30 % (odhad)
-	C:N 58

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 min⁻¹ a temperování na teplotu 40 ± 0,2 °C. Deset dnů bylo inokulum ponecháno bez jakýchkoliv přísad. Došlo k ustálení produkce bioplynu na úrovni 0,03 m_N³.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 (semi)kontinuálně. 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 srovnání velikosti vzorku vstupního odpadu (vlevo) s digestátem (vpravo). Na obr. 3 je následně zobrazen digestát v reaktoru.



Obr. 2 Srovnání velikosti vzorku vstupního odpadu (vlevo) s digestátem (vpravo)



Obr. 3 Digestát v reaktoru

15. den zkoušky bylo do reaktoru aplikováno 1 g přípravku SCHAUMANN BC PRO START, který podporuje anaerobní digesci zejména dodáním makro-prvků Ca, Mg, P, Fe, a mikro-prvků Zn, Cu, Mo, Co a pomáhá zvýšit uhlíčitanovou neutralizační kapacitu. V následujících dnech skutečně produkce bioplynu mírně narůstala. 21. den zkoušky byl reaktor otevřen a vsázka byla částečně homogenizována přístrojem Testchem SLM (robustně provedený kuchyňský mixér) bez vytěsnění vzduchu a poté vrácena do reaktoru. Vzorek vsázky byl analyzován na obsah sušiny, která činila 15 % hm. Homogenizace nebyla příliš efektivní, protože rozměrné částice nebyly rozduženy. 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 g), který podporuje anaerobní digesci zejména zvýšením uhlíčitanové neutralizační kapacity. 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 TKO ukončena.

Procesní parametry jsou uvedeny v tabulce 2. Průměrné zatížení $4,835 \text{ kg}_{\text{VS}} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ 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 nebylo samozřejmě rentabilní.

Tab 2 Procesní parametry Fed-batch digesce TKO

Délka zkoušky	Průměrné parametry denní dávky vstupní směsi (bioodpadu)										Parametry digestátu				
T	m_d	ρ_d	V_d		Z	HRT	pH	TS	VS	VS_{TS}	t	pH	TS	VS	VS_{TS}
d	kg d^{-1}	kg dm^{-3}	$\text{dm}^3 \text{d}^{-1}$	% d ⁻¹	$\text{kg}_{\text{VS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$	d	-	% hm.			°C	-	% hm.		
50	0,066	1,400	0,047	0,47	4,835	187	4,5	76,95	63,9	83,0	40,0	7,5	13,8	12,0	81,5
Produkce bioplynu						CH ₄	Produkce methanu								
$B_{N, \text{suchý}}$	B_m	B_{TS}	B_{VS}	B_r	B_i	suchý	$M_{N, \text{suchý}}$	M_m	M_{TS}	M_{VS}	M_r	M_i			
$\text{m}_N^3 \text{d}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}_{TS}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}_{VS}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$	% _N	$\text{dm}_N^3 \text{d}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}_{TS}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}_{VS}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$	$\text{m}_N^3 \text{kg}^{-1} \text{d}^{-1}$			
0,00652	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_d – hmotnost denní dávky vstupní směsi

ρ_d – orientační měrná hmotnost vstupní směsi

V_d – orientační objem denní dávky vstupní směsi a procentuální podíl na předpokládaném objemu vsázky v bioreaktoru

Z – průměrné objemové zatížení bioreaktoru

HRT – průměrná hydraulická doba zdržení biomasy v bioreaktoru

$B_{N, \text{suchý}}$ – průměrná denní produkce suchého bioplynu (obdobně pro methan)

B_m – měrná produkce bioplynu ze vstupní směsi

B_{TS} – měrná produkce bioplynu z celkové sušiny vstupní směsi

B_{VS} – měrná produkce bioplynu vzhledem ke ztrátě žháním sušiny vstupní směsi

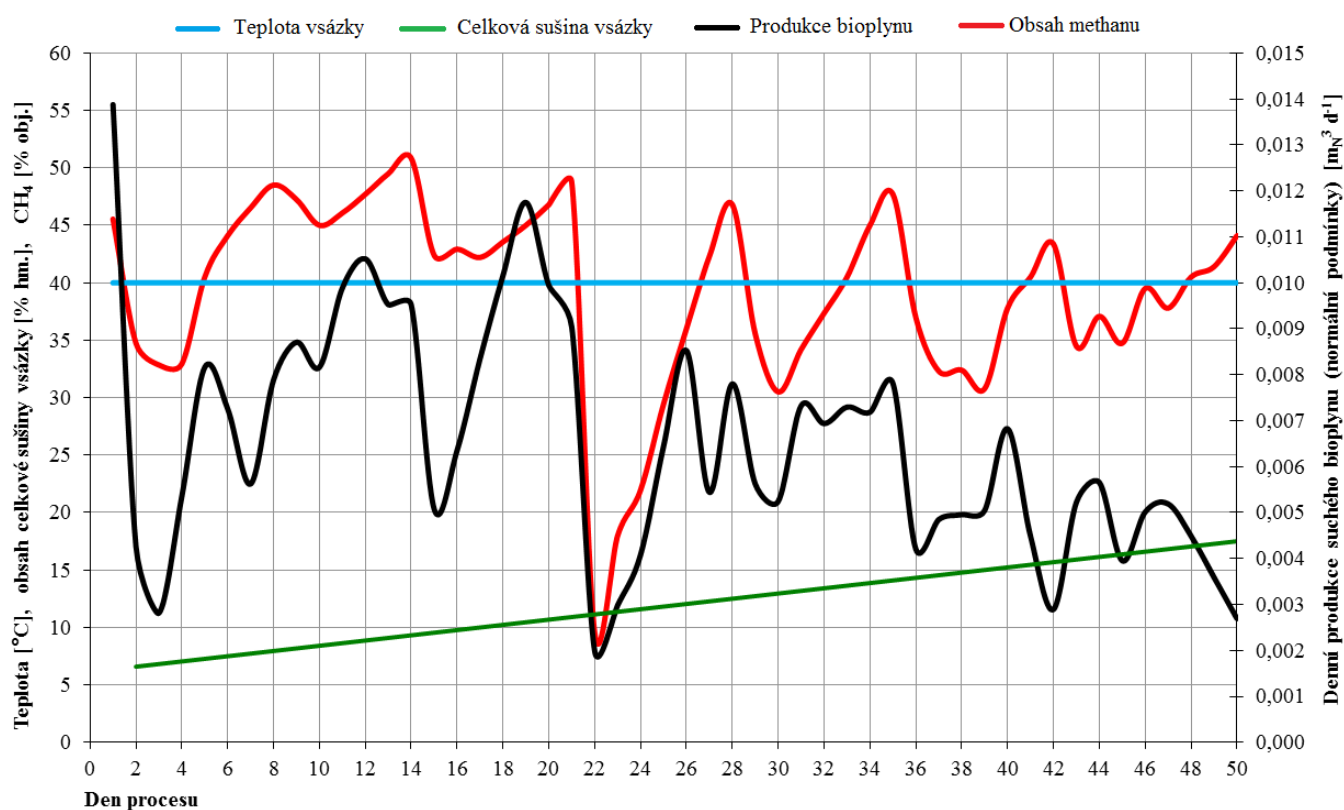
B_r – průměrná intenzita produkce bioplynu vzhledem k předpokládanému objemu vsázky

B_i – průměrná intenzita produkce bioplynu vzhledem k hmotnosti denní dávky vstupní směsi

Denní produkce bioplynu měřená plynoměrem se pohybovala nejčastěji mezi 0,003 až 0,013 m^3 . K této hodnotě bylo nutno v pracovních dnech přičíst konstantu 0,0005 m^3 , která zohledňuje součet odběru vzorku bioplynu analyzátozem (0,0004 m^3) a 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 než akumulaci inhibujících látek. Lze říci, že v průběhu pracovního týdne produkce spíše mírně narůstala, což indikovalo 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 potřeba nepřetěžovat pohon rotace bioreaktoru. Nízký obsah methanu byl zřejmě způsoben zanedbatelným obsahem lipidů a proteinů v odpadu, nebo potlačeným rozvojem methanogenní kultury. Vzhledem k finančním omezením však nebylo možno tyto předpoklady doložit analytickými rozbory. Pro provozní zařízení lze místo Fed-batch procesu doporučit (semi)kontinuální proces, ale uplatněna by v něm měla být kodigesce podsítné frakce s bioodpady bohatšími na dusík pro snížení celkového poměru C:N pod 30.

Průměrná produkce bioplynu z podsítné frakce činila $0,099 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ při průměrném obsahu methanu 39 %. Průměrný obsah sušiny 10 vzorků digestátu činil 22,5 % hm. při ztrátě žiháním sušiny 78 % hm. Zápach digestátu při laboratorní teplotě byl zejména amoniakální, ale subjektivně méně obtěžující, než u surového odpadu. Na obr. 4 je graficky znázorněn celý průběh Fed-batch procesu TKO.



Obr. 4 Grafický průběh Fed-batch procesu

4. Závěr

Provedená 50-denní zkouška procesu Fed-batch mezofilní anaerobní digesce TKO při vysokém obsahu sušiny prokázala možnost produkce bioplynu z daného vzorku podsítné frakce získané mechanickou separací tuhého komunálního odpadu. Pro provozní zařízení lze místo Fed-batch procesu doporučit (semi)kontinuální proces, ale v každém případě je nutné počítat s produkcí bioplynu nepřesahující $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ a nízkým obsahem methanu do 50 % obj. Procesní parametry vylepší především kodigesce s dusíkatými bioodpady (předně se stájovými hnojivy). Konstrukce bioreaktoru musí odolávat vysoké abrazivitě odpadu, případnému namotávání umělých vláken i kovových drátů, dále zahrnovat systém míchání v celém objemu a systém odvodu těžkého sedimentu.

Acknowledgment

Práce vznikla za finančního přispění projektu TA ČR EPSILON TH01030513 „Výzkum vysoko-sušinné (suché) anaerobní kodigesce organické frakce směsného komunálního odpadu s dalšími bioodpady a vývoj (semi)kontinuálně pracující kontejnerové bioplynové stanice se systémem převrstvování vsázky (2015-2017). Podpora přišla rovněž od 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).

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] Nielfa, 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.