

# Výzkum vysokosušiny anaerobní digesce podsítné frakce směšného komunálního odpadu a vývoj kontejnerové bioplynové stanice

Ing. Jiří Rusín, Ph.D., Institut env. technologií VŠB-TU Ostrava; tel. +420 597 327 728

Ing. Kateřina Chamrádová, Ph.D., Institut env. technologií VŠB-TU Ostrava; tel. +420 597 327 307

RNDr. Václav Holuša, AGRO-EKO, spol. s r.o.; tel. +420 596 429 017

## Souhrn

V letech 2015 až 2017 je řešen projekt s podporou TA ČR, jehož cílem je výzkum procesu vysokosušiny anaerobní digesce organické frakce směšného komunálního odpadu (OFŠKO) a vývoj (semi)kontinuálně pracující kontejnerové bioplynové stanice. V prvních dvou letech byly připraveny a analyzovány vzorky OFŠKO, provedeny byly laboratorní zkoušky digesce a kodigesce a byl vyvinut prototyp kontejnerového bioreaktoru s mícháním vsázky hřeblovým dopravníkem, konstrukčně vycházející z aerobního fermentoru EWA. V závěrečném roce proběhne testování bioreaktoru s anaerobní vsázkou a sestavena bude pilotní bioplynová stanice.

## Úvod

Zbytkový komunální odpad je složka komunálního odpadu, která zbývá po vytrídění využitelných a nebezpečných složek a objemného odpadu [1]. Tento zbytkový odpad je zdrojem podsítné frakce využitelné k výrobě bioplynu.

Surová podsítná frakce uvolňuje výluh s poměrně vysokými koncentracemi z pohledu současné legislativy nežádoucích látek, například organický uhlík a rizikové prvky. Kompostování podsítné frakce TKO je obtížné, neboť materiál obsahuje baterie, rozbité žárovky, lékovky a další nebezpečné či závadné složky. Spolukompostováním dochází ke snížení ukazatelů až na desetinu původních hodnot, nicméně kompost často překračuje dnešní limity pro skládkování, takže jej v podstatě někdy nelze použít ani jako technologický materiál pro úpravu skládek [2]. Provozní testy anaerobní digesce a analýzy digestátu ukazují na stejné problémy, navíc je toto zpracování velmi nákladné [3].

Podsítnou frakci TKO je před i po anaerobní úpravě nutno dle Katalogu odpadů zařazovat do skupiny 19 06, a musí být hodnocena zkouškou vyluhovatelnosti, což je v souladu s nálezy ze zahraničí [4]. Produkty podsítné frakce TKO po biologickém aerobním nebo anaerobním zpracování v zemích s podobným složením odpadu a porovnatelnými přírodními poměry (Německo, Rakousko) jsou po úpravě a stabilizaci ukládány na skládku. Ke stejným závěrům dospěl v ČR provozními testy například projekt VaV č. SL-7-183-05 [5]. Podle rozboru vyluhovatelnosti je hlavním problematickým ukazatelem kategorie DOC, ekotoxicita a některé další.

Za těchto podmínek je nutno v ČR legislativně umožnit praktické nakládání s produkty biologické úpravy podsítné frakce např. zavedením speciální kategorie, jak je tomu v případě ukládání směšného KO na skládky nebo v případě praxe v SRN, kde byla pro upravenou podsítnou frakci zavedena speciální kategorie skládek. Limity pro ukládání na ně jsou však zhruba třikrát vyšší než u běžných skládek komunálního odpadu a znamenají proto větší ohrožení životního prostředí.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava ve spolupráci s firmou AGRO-EKO, spol. s.r.o. a Zemědělský výzkum, spol. s.r.o. řeší projekt Technologické agentury ČR ev. č. TH01030513 s názvem „Výzkum vysoko-sušinné (suché) anaerobní kodigesce organické frakce směsného komunálního odpadu a vývoj (semi)kontinuálně pracující kontejnerové bioplynové stanice se systémem převrstvování vsázky“. Cílem projektu je vyvinutí (semi)kontinuálně pracující mobilní kontejnerové bioplynové stanice o elektrickém výkonu do 30 kW. Iniciátorem projektu je firma AGRO-EKO, spol. s.r.o., která je výrobcem aerobního kontejnerového fermentoru EWA určeného pro hygienizaci a zintenzivněné kompostování veškerých bioodpadů včetně VŽP 2. a 3. kategorie [6]. Výhodou fermentoru EWA je zintenzivnění přeměny vsázky jejím převrstvováním pomocí systému s hřeblovým dopravníkem. Někteří zákazníci poptávali možnost výroby bioplynu v malém měřítku intenzivní suchou fermentací, právě při použití převrstvování vsázky hřeblovým dopravníkem. Část zákazníků projevila zájem o výrobu bioplynu ze zbytkového komunálního odpadu respektive podsítné frakce, což je v souladu s požadavky Evropské unie [7].

### Postup řešení - přehled

Projekt je rozdělen do tří ročních etap: etapa 1 - fyzikální model vysokosušinného (semi)kontinuálního bioreaktoru, etapa 2 - prototyp kontejnerového bioreaktoru, etapa 3 – pilotní jednotka kontejnerové bioplynové stanice.

### Etapa 1 - fyzikální model vysokosušinného (semi)kontinuálního bioreaktoru

V první etapě byly ve spolupráci s firmou OZO Ostrava s.r.o. ze skládky komunálního odpadu Ostrava – Hrušov získány vzorky čerstvě dovezeného směsného komunálního odpadu z oblastí Ostrava Hrabůvka a Bělský les (rajóny B14, B18, sídlištní a smíšený typ zástavby) a pomocí dvoustupňového třídění rotačními bubnovými separátory byly připraveny vzorky podsítné frakce (označeno OFSKO). OFSKO obsahovaly veškeré částice, které prošly sítím s otvory a) 40x40 mm, b) 24x24 mm, c) 15x15 mm, d) 3,5x3,5 mm. První stupeň třídění proběhl za pomoci průmyslového separátoru Terra Select Trommelscreen T4 s kruhovými otvory 80 mm, viz obrázek 1. Pro druhý stupeň třídění byla vyrobena malá přenosná bubnová síta se čtvercovými otvory, viz obrázek 2. Vzorky OFSKO byly analyzovány v laboratořích VŠB a firmy Laboratoř MORAVA s.r.o. Studénka. Parametry jsou uvedeny v tabulce 1.



Obrázek 1 – Bubnové síto s otvory  $\varnothing$  80 mm



Obrázek 2 – Síto s otvory 15x15 mm

Tabulka 1 – Parametry organické frakce SKO

Parametr	Značka, jednotka	OFSKO ≤ 3,5 mm	OFSKO ≤ 15 mm	OFSKO ≤ 24 mm	OFSKO ≤ 40 mm
Sušina celková	TS, %	58,5	52,0	59,70	76,95
Spalitelné látky (ztráta žiháním)	VS, % <sub>TS</sub>	43,0	40,9	38,50	83,0
Celkový organický uhlík	TOC, % <sub>TS</sub>	19,8	19,4	20,4	19,2
Uhlík	TC, % <sub>TS</sub>	20,0	19,7	20,7	19,5
Vodík	H, % <sub>TS</sub>	3,3	2,5	2,7	2,5
Dusík	TN, % <sub>TS</sub>	0,9	0,9	1,1	1,0
Síra	S, % <sub>TS</sub>	0,3	0,8	1,5	0,5
Kyslík	O,	14,8	13,4	14,7	14,5
Celková hořlavina	Č, % <sub>TS</sub>	44,0	41,6	39,2	86,5
Prchavá hořlavina	V, % <sub>TS</sub>	39,5	37,0	35,1	83,6
Fixní uhlík	FC, % <sub>TS</sub>	4,5	4,6	4,1	2,9
pH-H <sub>2</sub> O	pH, -	6,4	6,5	6,2	4,5
Suma nižších mastných kyselin C2-C5	VFA, %	3,59	4,54	3,39	
Aerobní aktivita AT <sub>4</sub>	AT <sub>4</sub> , mg O <sub>2</sub> /g <sub>TS</sub>	65,1	60,4	62,0	
Popeloviny	A, % <sub>TS</sub>	57,00	59,1	61,5	
Lipidy	CL, % <sub>TS</sub>	1,42	3,18	2,41	
Sacharidy	CH, % <sub>TS</sub>	0,10	1,61	0,55	
Škrob	ST, % <sub>TS</sub>	2,70	5,54	2,78	
Vláknina	CF, % <sub>TS</sub>	9,40	3,51	7,50	
Proteiny	CP, % <sub>TS</sub>	0,62	0,68	0,69	
Bezdušikaté látky výtažkové	NFE, % <sub>TS</sub>	24,10	24,40	15,80	
Dušikaté látky	NC, % <sub>TS</sub>	6,15	5,90	6,61	
Dusík amoniakální	N <sub>NH4+</sub> , % <sub>TS</sub>	0,13	0,01	0,12	
Dusík dusičnanový	N <sub>NO3-</sub> , % <sub>TS</sub>	0,003	0,001	0,003	
Fosfor	TP, % <sub>TS</sub>	0,19	0,19	0,15	
Vápník	Ca, % <sub>TS</sub>	2,18	3,53	2,92	
Draslík	K, % <sub>TS</sub>	0,56	0,41	0,40	
Hořčík	Mg, % <sub>TS</sub>	0,29	0,38	0,20	
Arsen	As, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	6,7	4,0	5,8	
Kadmium	Cd, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	1,4	1,2	1,0	
Kobalt	Co, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	8,7	7,0	5,5	
Chrom	Cr, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	25,8	154,0	12,2	
Měď	Cu, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	85,6	84,3	61,7	
Železo	Fe, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	16400	24800	11800	
Nikl	Ni, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	12,2	58,7	7,8	
Olovo	Pb, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	19,0	72,0	15,9	
Zinek	Zn, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	158,0	1320,0	104,0	
Molybden	Mo, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	0,5	3,9	0,5	
Rtuť	Hg, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	0,1	2,2	0,1	
Enterokoky	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	7 x 10 <sup>5</sup>	5 x 10 <sup>1</sup>	8 x 10 <sup>4</sup>	
Termotolerantní koliformní bakterie	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	1 x 10 <sup>4</sup>	5 x 10 <sup>1</sup>	5 x 10 <sup>1</sup>	
Escherichia coli	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	1 x 10 <sup>4</sup>	5 x 10 <sup>1</sup>	5 x 10 <sup>1</sup>	
Salmonella	pozit./ negat.	negativní	negativní	negativní	
Listeria monocytogenes (25g vzorku)	pozit./ negat.	negativní	negativní	negativní	
Celkový počet mikroorganismů	KTJ g <sup>-1</sup>	2 x 10 <sup>7</sup>	1 x 10 <sup>8</sup>	2 x 10 <sup>7</sup>	
Kvasinky	KTJ g <sup>-1</sup>	6 x 10 <sup>6</sup>	4 x 10 <sup>3</sup>	4 x 10 <sup>5</sup>	
Plísňe	KTJ g <sup>-1</sup>	3 x 10 <sup>5</sup>	7 x 10 <sup>1</sup>	2 x 10 <sup>5</sup>	
Termofilní mikroorganismy	KTJ g <sup>-1</sup>	4 x 10 <sup>6</sup>	1 x 10 <sup>7</sup>	4 x 10 <sup>5</sup>	
Mezofilní bakterie	KTJ g <sup>-1</sup>	8 x 10 <sup>6</sup>	1 x 10 <sup>8</sup>	2 x 10 <sup>5</sup>	
Psychofilní bakterie	KTJ g <sup>-1</sup>	1 x 10 <sup>7</sup>	1 x 10 <sup>8</sup>	2 x 10 <sup>6</sup>	

nestanovené

Poznámka: normy viz tabulka 4.

Pro laboratorní anaerobní digesci v objemu 0,4 m<sup>3</sup> při vysokém obsahu sušiny při denním dávkování OFSKO byl původně uvažován vývoj speciálního reaktoru s převrstvováním vsázky hřeblovým dopravníkem dle principu fermentoru EWA, ale vzhledem ke snížení dotace o 20 % byl použit pouze upravený válcový horizontální bioreaktor CSTR400 vlastní konstrukce (pracovní objem až 0,4 m<sup>3</sup>), viz obrázek 3 a rotační bubnový reaktor Terrafors IS (pracovní objem 0,013 m<sup>3</sup>), viz obrázek 4. Jako tekuté inokulum byl použit digestát ze zemědělské bioplynové stanice Pustějov II. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulce 2.



Obrázek 3 – Bioreaktor CSTR400



Obrázek 4 – Bioreaktor Terrafors IS

Digesci OFSKO  $\leq 40$  mm byla provedena v reaktoru Terrafors po dobu 50 dnů (březen - duben). Dávka substrátu v pracovních dnech byla 0,1 kg a teplota 40 °C. Při průměrném organickém zatížení (OLR) 4,84 kg<sub>VS</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a hydraulické době zdržení (HRT) 187 dnů vzrostl obsah celkové sušiny vsázky až na 23 % hm. Průměrná intenzita produkce bioplynu z objemu vsázky činila 0,93 m<sub>N</sub><sup>3</sup> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Měrná produkce bioplynu OFSKO činila 0,099 m<sub>N</sub><sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>, průměrný obsah CH<sub>4</sub> 39,2 % obj.

Digesci OFSKO  $\leq 24$  mm byla provedena v reaktoru CSTR400 po dobu 40 dnů (květen - červen 2015). Dávka substrátu v pracovních dnech byla nastavena na 7,5 kg a teplota na 39 °C. Při průměrném OLR 5,40 kg<sub>VS</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a HRT 90 dnů vzrostl obsah celkové sušiny vsázky na 17,7 % hm. Průměrná intenzita produkce bioplynu z objemu vsázky činila 1,91 m<sub>N</sub><sup>3</sup> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Měrná produkce bioplynu OFSKO činila 0,108 m<sub>N</sub><sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>, průměrný obsah CH<sub>4</sub> 57,8 % obj.

Digesci OFSKO  $\leq 15$  mm byla provedena v reaktoru Terrafors po dobu 120 dnů (duben - červenec 2015). Dávka substrátu v pracovních dnech byla 0,4-0,8 kg a teplota 40 °C. Při průměrném OLR 7,55 kg<sub>VS</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a HRT 34 dnů vzrostl obsah celkové sušiny vsázky až na 56 % hm. Průměrná intenzita produkce bioplynu z objemu vsázky činila 2,08 m<sub>N</sub><sup>3</sup> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Měrná produkce bioplynu OFSKO činila 0,065 m<sub>N</sub><sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>, průměrný obsah CH<sub>4</sub> 59,5 % obj.

Digesci OFSKO  $\leq 3,5$  mm byla provedena v reaktoru Terrafors po dobu 73 dnů (květen - červenec 2015). Dávka substrátu v pracovních dnech byla 0,07-0,14 kg a teplota 55 °C. Při průměrném OLR 2,26 kg<sub>VS</sub> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> a HRT 138 dnů vzrostl obsah celkové sušiny vsázky až na 30 % hm. Průměrná intenzita produkce bioplynu činila 0,79 m<sub>N</sub><sup>3</sup> m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>. Měrná produkce bioplynu OFSKO činila 0,088 m<sub>N</sub><sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>, průměrný obsah CH<sub>4</sub> 58,7 % obj. Výsledky jsou v souladu s literárními daty [8-11]. Například Freindank (2014) uvádí měrnou produkce methanu ručně tříděné OFSKO v rozsahu 0,04 - 0,09 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> (laboratorní a poloprovozní

výsledky z Německa a Švédska). Jako limitní organické zatížení lze označit hodnotu 7-8  $\text{kg}_{\text{VS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ , což uvádí například i Karnchanawong [12].

Ko-digestce směsi OFSKO  $\leq 15$  mm a kukuřičné siláže KWS AGRO VITALLO (v poměru 1:1) byla provedena v reaktoru CSTR400 po dobu 56 dnů (duben - červen 2016). Dávka vstupní směsi v pracovních dnech byla 5,0-17,2 kg a teplota 40 °C. Při průměrném OLR 7,04  $\text{kg}_{\text{VS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$  a HRT 53 dnů vzrostl obsah celkové sušiny vsázky až na 28 % hm. Průměrná intenzita produkce bioplynu z objemu vsázky činila 3,45  $\text{m}_N^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$ . Měrná produkce bioplynu vstupní směsi činila 0,171  $\text{m}_N^3 \text{kg}^{-1}$ , průměrný obsah  $\text{CH}_4$  53,5 % obj. Porovnáním tohoto výsledku s produkcemi z jednotlivých substrátů zjistíme, že došlo k synergickému vlivu. Vyprodukováno bylo o 11 % více bioplynu, respektive o 15 % více  $\text{CH}_4$ , než by odpovídalo váženému průměru produkcí substrátů.

Tabulka 2 Výsledky digestce organické (podsítné) frakce SKO

Substrát	Pozn.	Průměrný obsah celkové sušiny v substrátu	Průměrný obsah celkové sušiny v reaktoru	Průměrné organické zatížení	Prům. hydraul. doba zdržení	Intenzita produkce bioplynu vzhledem k objemu vsázky	Produkce bioplynu	Produkce methanu	Teoretická produkce methanu dle prvkového složení	Výtěžek methanu
		TS % hm.	TS <sub>r</sub> % hm.	OLR $\text{kg}_{\text{VS}} \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$	HRT dny	B <sub>r</sub> $\text{m}_N^3 \text{m}^{-3} \text{d}^{-1}$	B <sub>TS</sub> $\text{m}_N^3 \text{kg}_{\text{TS}}^{-1}$	M <sub>TS</sub> $\text{m}_N^3 \text{kg}_{\text{TS}}^{-1}$	M <sub>TS-teor</sub> $\text{m}_N^3 \text{kg}_{\text{TS}}^{-1}$	$\eta$ %
Rotační bubnový reaktor o pracovním objemu přibližně 0,013 m <sup>3</sup> , teplota 40 °C										
OFSKO $\leq 40$ mm	-	77,0	15,1	4,84	187	0,93	0,128	0,050	0,195	25,6
OFSKO $\leq 15$ mm	-	52,0	42,4	7,55	34	2,08	0,125	0,075	0,201	37,3
OFSKO $\leq 3,5$ mm	-	58,5	24,7	2,26	138	0,79	0,151	0,088	0,253	34,8
Horizontální CSTR reaktor o pracovním objemu 0,300 m <sup>3</sup> , teplota 39 °C										
OFSKO $\leq 24$ mm	-	59,7	16,0	5,40	90	1,91	0,181	0,105	0,207	50,7
Horizontální CSTR reaktor o pracovním objemu 0,380 m <sup>3</sup> , teplota 39 °C										
OFSKO $\leq 15$ mm: kukuřičná siláž (1:1)	-	46,5	17,1	7,04	53	3,45	0,367	0,197	0,326	60,4
OREO: kukuřičná siláž (1:1)	OREO - odpadní sušenky Opávia	66,0	29,7	8,33	76	5,82	0,676	0,398	0,474	84,0

Kromě těchto zkoušek byly na CSTR reaktorech s objemy vsázky 0,06 a 0,80 m<sup>3</sup> ověřovány produkce methanu z různých substrátů, které by mohly sloužit pro podpoření digestce OFSKO, viz tabulka 3. Na základě všech laboratorních zkušeností byl vytvořen užitečný vzor CZ 29831 U1 [13] specifikující konstrukci anaerobního bioreaktoru míchaného hřeblovým dopravníkem.

Sledovány byly rovněž parametry a vlastnosti digestátu z podsítné frakce SKO. Nejvýznamnější výsledky jsou uvedeny v tabulce 5. Zatímco spalné teplo sušiny podsítných frakcí v původním stavu se pohybovalo mezi 6,0-10,4  $\text{MJ kg}_{\text{TS}}^{-1}$ , digestáty se vyznačovaly hodnotou 7,0-7,7  $\text{MJ kg}_{\text{TS}}^{-1}$ .

Zemědělský výzkum, spol. s.r.o. provedl ověření vhodnosti, případně fytoxicity digestátu jako doplňku kultivačních substrátů pro zemědělské plodiny. Provedeny byly testy klíčivosti (fyziologické dle metodiky ISTA), vzcházivosti (při dávce 30 t/ha), výnosu zelené hmoty a kvality zelené hmoty v důsledku hnojení na VŠB-TUO připraveným vysokosušivým mezofilním digestátem. Uvádíme výsledky dvou nejdůležitějších vzorků: a) digestát OFSKO  $\leq 24$  mm a b) digestát z OFSKO  $\leq 15$  mm: kukuřičné siláže (1:1), viz tabulka 4.



V případě salátu hlávkového byly všechny koncentrace digestátu při testech klíčivosti absolutně fytotoxické. U vzcházivosti byla manifestace fytotoxicity méně výrazná. Při nízkých koncentracích digestátu v zálivce (do 50 %) byla vzcházivost na dostatečné úrovni. Rozdíly makroprvků v plodinách nebyly kvalitou digestátu ovlivněny příliš výrazně.

Tabulka 3 Výsledky doprovodných testů produkce methanu

Substrát	Pozn.	Průměrný obsah celkové sušiny v substrátu	Průměrný obsah celkové sušiny v reaktoru	Průměrné organické zatížení	Prům. hydraul. doba zdržení	Intenzita produkce bioplynu vzhledem k objemu vsázky	Produkce bioplynu	Produkce methanu	Teoretická produkce methanu dle prvkového složení	Výtěžek methanu
		TS % hm.	TS <sub>r</sub> % hm.	OLR kg <sub>VS</sub> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	HRT dny	B <sub>r</sub> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup>	B <sub>TS</sub> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	M <sub>TS</sub> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	M <sub>TS-teor</sub> m <sub>N</sub> <sup>3</sup> kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	η %
<b>Rotační bubnový reaktor o pracovním objemu přibližně 0,013 m<sup>3</sup>, teplota 40 °C</b>										
Kukuřičná siláž	Agro Vitallo	35,0	30,8	6,53	43	4,42	0,698	0,342	0,422	81,0
<b>Vertikální CSTR reaktor o pracovním objemu 0,060 m<sup>3</sup>, teplota 40 °C</b>										
Ligno	kapalná směs enzymů lakáz	31,6	1,0	0,24	2200	0,12	0,487	0,274	0,452	60,6
Mycelium PNC	tuhý substrát	27,8	1,0	0,11	1260	0,08	0,621	0,302	0,367	82,3
Sacharomyces	tekutý substrát	22,3	1,2	0,48	444	0,16	0,407	0,207	0,471	43,9
Lanolin	odpad ze zpracování vlny	46,2	10,9	0,88	266	0,22	0,150	0,073	0,515	14,2
Kukuřičné zrnko mačkané	Agro Vitallo	66,2	5,1	0,75	798	0,64	0,831	0,415	0,464	89,4
<b>Horizontální CSTR reaktor o pracovním objemu 0,80 m<sup>3</sup>, teplota 41 °C</b>										
BRO DEPOS	BRO z údržby městské zeleně	35,0	6,6	2,52	112	1,04	0,307	0,168	0,387	43,4
Suché listí	listí z areálu VŠB	68,0	12,5	6,69	86	1,02	0,124	0,061	0,309	19,7

Tabulka 4 Výsledky kultivačních testů s digestáty

Digestát z	Klíčivost	Vzcházivost	Výnos zelené hmoty	Kvalita zelené hmoty
Testovací plodina: pšenice ozimá (Bohemie), ječmen ozimý (Ariane), řepka ozimá (Sherpa), špenát setý (Clarinet F1), salát hlávkový (Kráľ máje)				
Obsah digestátu v zálivce: 0 %, 10 %, 25 %, 50 %, a 100 %				
OFSKO ≤ 24 mm	inhibice většinou již při 25 % digestátu	pšenice a ječmen vzcházely i při 100 % digestátu v zálivce; nejcitlivější byla řepka	přibližně stejná hmotnost nadzemní zelené hmoty u všech variant; rozdíly korespondovaly se vzcházivostí	se zvyšujícím se obsahem digestátu v zálivce stoupal obsah N v zelené hmotě; u ostatních makroprvků byly rozdíly minimální
OFSKO ≤ 15 mm: kukuřičná siláž (1:1)	digestátu v zálivce	pšenice a ječmen vzcházely i při 100 % digestátu v zálivce; nejcitlivější byly salát a špenát		

Tabulka 5 – Parametry digestátů

Parametr	Značka, jednotka	Norma (postup)	Digestát z OFSKO ≤ 3,5 mm 7. 7. 2015	Digestát ze směsi OFSKO ≤ 15 mm: kukuřičná siláž (1:1) 2. 6. 2016	
Sušina celková	TS, %	ČSN EN 15934	26,03	25,39	
Spalitelné látky (ztráta žiháním)	VS, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 15935	48,70	46,60	
Celkový organický uhlík	TOC, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 15936	24,2	26,1	
Uhlík	TC, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 15104	24,3	26,2	
Dusík	TN, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 16169	2,24	2,16	
Síra	S, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 15289	0,44	0,35	
Chemická spotřeba kyslíku	COD <sub>Cr</sub> , kg m <sup>-3</sup>	ČSN ISO 6060	47,5	49,2	
pH-H <sub>2</sub> O	pH, -	ČSN EN 15933	8,44	8,20	
Suma nižších mastných kyselin C2-C5	VFA, %	ČSN P CEN ISO/TS	0,19	0,17	
Suma nižších mastných kyselin (pH 4,4)	VFA, mg dm <sup>-3</sup>	metoda HACH-Lange (prof. Weiland)	9550	7390	
Celkový anorganický uhlíčan (pH 5,0)	TIC, mg dm <sup>-3</sup>		22800	28500	
Poměr FOS/TAC	VFA/TIC, -		0,42	0,26	
Kyselinová neutralizační kapacita	TA <sub>pH4,5</sub> , mol m <sup>-3</sup>	ČSN EN ISO 9963-1	540	500	
Aerobní aktivita AT <sub>4</sub>	AT <sub>4</sub> , mg O <sub>2</sub> /g <sub>TS</sub>	ÖNORM S 2027-1.4	23,4	14,0	
Popeloviny	A, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 15935	51,30	53,40	
Lipidy	CL, % <sub>TS</sub>	ČSN 467092-7	1,25	1,00	
Sacharidy	CH, % <sub>TS</sub>	ČSN 46 7092-22	0,05	0,10	
Škrob	ST, % <sub>TS</sub>	ČSN 560512-16	0,25	0,45	
Vláknina	CF, % <sub>TS</sub>	ČSN EN ISO 6865	14,21	10,87	
Proteiny	CP, % <sub>TS</sub>	ČSN 467092-27	0,26	1,19	
Bezdušikaté látky výtažkové	NFE, % <sub>TS</sub>	ČSN 46 7092-24	19,20	20,70	
Dusikaté látky	NC, % <sub>TS</sub>	ČSN 46 7092-4	13,98	13,50	
Dusík amoniakální	N <sub>NH4+</sub> , % <sub>TS</sub>	ČSN P CEN/TS 16177	1,20	1,04	
Dusík dusičnanový	N <sub>NO3-</sub> , % <sub>TS</sub>		0,03	0,01	
Fosfor	TP, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 14672	0,68	0,41	
Vápník	Ca, % <sub>TS</sub>	ČSN EN 16174	4,39	4,56	
Draslík	K, % <sub>TS</sub>		1,46	1,33	
Hořčík	Mg, % <sub>TS</sub>		0,54	0,61	
Arsen	As, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		1,5	6,5	
Kadmium	Cd, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		0,4	1,6	
Kobalt	Co, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		7,3	9,0	
Chrom	Cr, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		32,10	148,0	
Měď	Cu, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		104	584	
Železo	Fe, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		11400	20600	
Nikl	Ni, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		19,4	68,8	
Olovo	Pb, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		19,1	42,6	
Zinek	Zn, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		269	591	
Molybden	Mo, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		0,9	2,5	
Rtuť	Hg, mg kg <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		ČSN 757440	0,2	1,0
Enterokoky	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>		ČSN EN ISO 7899-2	<5 x 10 <sup>1</sup>	6 x 10 <sup>4</sup>
Termotolerantní koliformní bakterie	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	ČSN ISO 4832	<5 x 10 <sup>1</sup>	2 x 10 <sup>3</sup>	
Escherichia coli	KTJ g <sub>TS</sub> <sup>-1</sup>	ČSN 757835	<5 x 10 <sup>1</sup>	6 x 10 <sup>2</sup>	
Salmonella	pozit./ negat.	ČSN ISO 19250	negativní	negativní	
Listeria monocytogenes (25g vzorku)	pozit./ negat.	ČSN EN ISO 11290-	negativní	negativní	
Celkový počet mikroorganismů	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN EN ISO 4833-1,2	4 x 10 <sup>6</sup>	1 x 10 <sup>8</sup>	
Kvasinky	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN ISO 21527-1,2	<1 x 10 <sup>1</sup>	3 x 10 <sup>5</sup>	
Plísně	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN ISO 21527-1,2	<1 x 10 <sup>1</sup>	5 x 10 <sup>2</sup>	
Termofilní mikroorganismy	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN EN ISO 8199	7 x 10 <sup>5</sup>	6 x 10 <sup>7</sup>	
Mezofilní bakterie	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN 75 7841	1 x 10 <sup>6</sup>	8 x 10 <sup>7</sup>	
Psychrofilní bakterie	KTJ g <sup>-1</sup>	ČSN 757842	8 x 10 <sup>5</sup>	9 x 10 <sup>7</sup>	

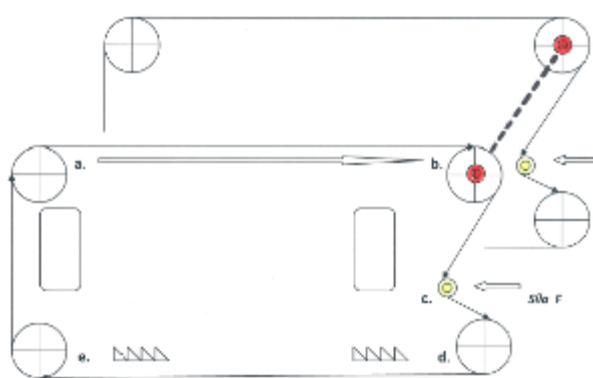
## Etapa 2 - Prototyp kontejnerového bioreaktoru

Ve druhé etapě byl vyvinut prototyp mobilního anaerobního bioreaktoru pro vysokosušinou digesci. Prototyp byl nazván GEWA (Gas Ecological Waste Apparatus), viz obrázek 5. Z konstrukce aerobního fermentoru EWA byl využit kontejnér 40' HC ISO s vnitřní minerální izolací a nerezovým tubusem. Z počátku byla využita většina vnitřních komponent, ty však byly postupně upravovány. Míchací systém na bázi hřeblového dopravníku chráněného překlopnými frézami byl nejprve vyvíjen pro tuhou vsázku o objemové hmotnosti max.  $700 \text{ kg m}^{-3}$ , ale od tohoto řešení bylo nutno ustoupit. Nároky na pohony a pevnost komponent byly příliš vysoké. Z toho důvodu byl systém přebudován pro tekutou vsázku o objemové hmotnosti do cca  $1100 \text{ kg m}^{-3}$  a obsahu sušiny do cca 40 % hm.

Změna přístupu si vyžádala demontáž překlopných fréz určených pro „postupné odtrhávání“ spodní vrstvy tuhé vsázky. Stěny tubusu byly částečně zpevněny. Pro pohon hřeblového dopravníku s řetězy 10x50 mm byly místo orbitových hydromotorů použity 2 účinnější hydromotory radiální pístové v novém umístění, viz obrázek 6. Dopravník byl doplněn o napínací mechanismus řetězů (obrázek 7) s elektronikou tak, aby v případě zaseknutí došlo k omezení tahu a automatickému uvolnění. Upraveny byly řetězové dráhy. Počet hřebel (obrázek 8) byl postupně upravován až na konečných 54 kusů. Demontován byl naskladňovací pásový dopravník a byl nahrazen šnekovým dávkovačem. Instalováno bylo teplovodní podlahové vytápění reaktoru s elektrickým kotlem o max. příkonu 3x6 kW a účinnosti 98,3 % a sekundární vrstva tepelné izolace PUR pěnou zesponu kontejneru. Zadní čelo reaktoru bylo osazeno šoupátkem DN150 pro výpusť digestátu. Do stropu reaktoru byl instalován výstup bioplynu o světlosti DN100. Dmychadlo vzduchu bylo nahrazeno plynovou klapkou pro zkoušky těsnosti. Pod strop a pod hřeblový dopravník byly instalovány trubky DN50 pro přívod tekutého inokula či perkolátu. Servisní dvířka byla opatřena plynovým těsněním. Otestován byl prototyp šnekového dávkovače tuhé biomasy, viz obrázky 9-10, který bude vstupní směs dopravovat pod hladinu vsázky.



Obrázek 5 – Prototyp bioreaktoru GEWA



Obrázek 6 – Uspořádání hřeblového dopravníku



Obrázek 7 – Napínací mechanismus dopravníku



Obrázek 8 – Detail řetězu a hřebela





Obrázek 9 – Šnekový dávkovač biomasy



Obrázek 10 – Detail šneku DN125

Hlavní rozdíly konstrukce prototypu GEWA oproti fermentoru EWA (dosavadní dosažené znalosti při řešení Etapy 2) jsou uvedeny v tabulce 6.

Tabulka 6 Parametry bioreaktorů EWA a GEWA

Parametr	Aerobní fermentor EWA	Anaerobní bioreaktor GEWA
Kontejnér	40° HC ISO	40° HC ISO
Objem pro vsázku	36 m <sup>3</sup>	max. 38 m <sup>3</sup>
Objem pro plyn	-	min. 16 m <sup>3</sup>
Vsázka	tuhá, 12-23 tun, max. 60 % sušiny	tekutá, 20-25 tun, max. 40 % sušiny
Míchací zařízení	hřeblový dopravník + překlopné frézy	hřeblový dopravník + napínací prvky
Naskladňovací zařízení	pásový dopravník	šnekový dopravník
Vyskladňovací zařízení	pásový dopravník	potrubí se šoupátkem
Výstup plynu	stropní otvor	potrubí bioplynu
Topný systém	-	podlahový teplovodní
Maximální teplota	90 °C	60 °C
Instalovaný příkon	15 kW	20 kW
Maximální souběh příkonů	6,1 kW	19 kW

Pro budoucí zvýšení efektivity reaktoru GEWA je předpokládána například úprava konstrukce pro 40 tun vsázky, ověření vlivu různých profilů a vertikálních pozic hřebel dopravníku na zintenzivnění míchání, vytvoření topného systému pro bočnice reaktoru apod., ale také optimalizace tekutosti vsázky a látkového složení. V neposlední řadě se nabízí možnost po ukončení digesce převést proces do aerobního režimu, pásovým dopravníkem doskladnit strukturální substráty (kůra, štěpka, ...) a vyrábět z digestátu aerobní fermentát (kompost).

### Etapa 3 - Pilotní jednotka kontejnerové bioplynové stanice

Ve třetí etapě (2017) je na základě kontejnerového bioreaktoru GEWA a zkoušek s různou kvalitou a kvantitou vsázky vyvíjena pilotní (demonstrační) jednotka bioplynové stanice, která bude umístěna v areálu firmy AGRO-EKO, spol. s.r.o. v Albrechticích. Předpokládáme provozní úpravu bioplynu sušením a odsířením a zpracování optimální mikro-kogenační jednotkou, jejíž výkon zřejmě nepřesáhne 30 kW<sub>el</sub>. Pro plynovou trasu byl rozpracován prototyp adsorbéru sulfanu s aktivním uhlím. Vyrobená elektrická energie může sloužit pro potřeby firmy a teplem může být v pozdější fázi vytápěna výrobní hala. Digestát může být aerobně kofermentován v technologii EWA a uvažováno je dosušování fermentátu za účelem distribuce jako certifikovaného biopaliva.

## Závěr

Cílem výzkumného projektu bylo ověřit proces vysokosušinnové anaerobní digesce organické respektive podsítné frakce směsného komunálního odpadu a vyvinout nový typ kontejnerové bioplynové stanice. Přípraveny a analyzovány byly vzorky podsítné frakce. Z rizikových prvků byl ve vyšší koncentraci přítomen zejména zinek. Obsah toxických organických látek nebyl sledován. Výsledky testů na přítomnost Salmonelly a Listerií byly negativní. Hodnoty  $AT_4$  se pohybovaly v rozsahu 60-65 mg  $O_2/g_{TS}$ . Pro laboratorní zkoušky vysokosušinnové digesce byly využity horizontální reaktory s pádlovými míchadly a rotační bubnový reaktor. Výtěžek methanu z podsítné frakce OFSKO dosahoval 33-51 % teoretické hodnoty vypočtené dle prvkového složení sušiny. Z 1 kg podsítné frakce bylo získáno 0,050-0,105  $m_N^3$  methanu, což odpovídá literárním údajům. Testovány byly i další substráty, neboť kofermentace bude pro efektivní provoz nezbytná. Ověřena byla konzistence a složení digestátu. Ujasněny byly nároky na konstrukci bioreaktoru, zejména míchacího systému a periférií. V souladu s novým užitným vzorem byla vyvinuta varianta prototypu semikontinuálně pracujícího kontejnerového bioreaktoru s hřeblovým dopravníkem. Technicky a technologicky je řešení v ověřovací fázi. V roce 2017 proběhne testování bioreaktoru s anaerobní vsázkou a sestavena bude pilotní bioplynová stanice.

## Literatura

- [1] Česko. Zákon č. 264/2011 Sb., kterým se mění zákon, zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech ve znění pozdějších předpisů. In *Sbírka zákonů, Česká republika*. 2011, částka 92, s.1-185.
- [2] Česko. Vyhláška č. 341/2008 Sb., kterou se mění vyhláška, vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady) ve znění pozdějších předpisů. In *Sbírka zákonů, Česká republika*. 2008, částka 110, s. 1-23.
- [3] García-Albacete M., Tarquis A. M., Cartagena A. C. Risk of Leaching in Soils Amended by Compost and Digestate from Municipal Solid Waste. *The Scientific World Journal*. Vol 2014, 1-8, 2014.
- [4] Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G., Adani F. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource Technology*, Vol 100, Issue 12, p. 3140–3142, 2009.
- [5] Durdil J, Horsák Z, Bartoš P: Projekt SL/7/183/05 - Ověření použitelnosti metody mechanicko-biologické úpravy komunálních odpadů a stanovení omezujících podmínek z hlediska dopadů na životní prostředí (2005-2007, MZP/SL).
- [6] AGRO-EKO spol. s r. o., Ostrava, CZ. Způsob přeměny biodegradabilního hygienicky nestabilizovaného substrátu na hygienicky stabilizovaný výrobek. Václav HOLUŠA, Petr VANÍČEK, David ŠINDELÁŘ. Česká republika. Patentový spis CZ 295922 B6. 22.9.2005.
- [7] Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste.
- [8] Kayhanian M. Biodegradability of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Waste Management & Research*, Vol. 13, Issue 2, 123-136, (1995).
- [9] Ghosh S., Henry P. M., Sajjad A. and Mensinger C. M. (2000) Pilot-scale gasification of municipal solid wastes by high-rate and two-phase anaerobic digestion (TPAD), *Water Science and Technology*, 41 (3), pp. 101-110.
- [10] Freindank T. et al. (2014) Midterm Output report – Pilot B in Sweden, O 4.5. Ostfalia University of Applied Sciences, Institute for Biotechnology and Environmental Engineering Wolfenbüttel.

- [11]Nielfa A. et al. (2015) Theoretical Methane Production Generated by the Co-Digestion of Organic Fraction Municipal Solid Waste and Biological Sludge. *Biotechnology Reports* 5, 14–21.
- [12]Karnchanawong, S., Uparawanna, S. (2007) Performance of Single-phase Complete-mix Anaerobic Digestion of Organic Fraction of Municipal Solid Waste. *Asian Journal on Energy and Environment*, 08(04), 627-634.
- [13]VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. Zařzení pro anaerobní digesci tekuté vsázky. Původce: Jiří RUSÍN. Česká republika. Užitiný vzor CZ 29831 U1. 27.09.2016.

### **Poděkování**

Práce vznikla v rámci projektu Technologické agentury ČR v programu EPSILON, ev. č. projektu TH01030513 „Výzkum vysoko-sušinové (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) a 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).

### **Abstract**

In the years 2015-2017 project supported by TA CR, whose aim is to research the process of high-solids anaerobic digestion of the organic fraction of mixed municipal waste (OFMSW) and to develop (semi)continuously operating contained biogas plant, is being dealt with. In the first two years OFMSW samples were prepared and analyzed, lab-scale digestion and co-digestion tests were conducted and a prototype contained bioreactor with a batch agitation using scraper conveyor, based on the design of the aerobic fermentor EWA, was developed. In the final year bioreactor tests with anaerobic batch will be realized and a pilot biogas plant will be built.