Mendelova univerzita v Brně

MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY

ZBYTKOVÁ PRODUKCE BIOPLYNU Z FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ BIOPLYNOVÝCH STANIC

Závěrečná zpráva

Tomáš Koutný, Jan Kudělka, Jan Mareček, Milan Geršl, Tomáš Vítěz, Martin Šotnar, Jana Šofrová

Brno 2015

Název	**ZBYTKOVÁ PRODUKCE BIOPLYNU Z FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ BIOPLYNOVÝCH STANIC**
Objednatel	**Ministerstvo zemědělství ČR,** **Praha 1, Těšnov 17, PSČ 117 05** **Odbor bezpečnosti potravin a zemědělsko potravinářského inženýrství** **IČO: 00020478**
Číslo klienta	
Důvěrnost, copyright a kopírování	Tento dokument byl zpracován v rámci Smlouvy o dílo Čj.: 27330/2015-MZE-18111 o poskytnutí prostředků z funkčních úkolů MZe ČR z rozpočtu běžných výdajů pro rok 2015. Obsah nesmí být poskytován třetím stranám za jiných podmínek, než jak je uvedeno ve smlouvě.
Jednací číslo	
Zpráva číslo	
Status zprávy	Vydání 1 34 stran
Zhotovitel	**Mendelova univerzita v Brně** **Agronomická fakulta** **Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky** **Zemědělská 1, 613 00 Brno**

	Jméno	**Podpis**	**Datum**
Vypracoval	**Ing. Tomáš Koutný**		
Kolektiv autorů	**Ing. Jan Kudělka** **prof. Ing. Jan Mareček, Dr.Sc. dr.h.c.** **Mgr. Milan Geršl, Ph.D.** **Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.** **Ing. Martin Šotnar** **Ing. Jana Šofrová, Ph.D.**		
Schválil	**prof. Ing. Jan Mareček, Dr.Sc., dr.h.c.**		

Brno, listopad 2015

Mendelova univerzita v Brně

Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky

Zemědělská 1, 613 00 Brno

Kolektiv autorů

Ing. Tomáš Koutný

Ing. Jan Kudělka

prof. Ing. Jan Mareček, Dr.Sc.

Mgr. Milan Geršl, Ph.D.

Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.

Ing. Martin Šotnar

Ing. Jana Šofrová, Ph.D.

Závěrečná zpráva

Stran 34

Brno, listopad 2015

OBSAH

1 ÚVOD 6

2 PROBLEMATIKA VZNIKU A VYUŽITÍ FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ 7

2.1 ROZDĚLENÍ FERMENTAČNÍHO ZBYTKU A MOŽNOSTI VYUŽITÍ 7

2.1.1 Rozdělení podle vstupních surovin 8

2.1.2 Rozdělení podle způsobu následného využití fermentačního zbytku 8

2.2 METODY STABILIZACE FERMENTAČNÍCH ZBYTKŮ 14

2.3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ZBYTKOVÉ PRODUKCE BIOPLYNU 15

2.3.1 Zbytkový bioplyn – ovlivnění životního prostředí 15

2.3.2 Opatření pro omezení emisí NH_3 a CH_4 16

2.3.3 Využití zbytkového bioplynu z uskladňovacích jímek 16

3 TESTY ZBYTKOVÉ PRODUKCE BIOPLYNU 18

3.1 METODIKA TESTŮ 20

3.1.1 Použité vybavení 20

3.1.2 Analýza vstupních materiálů 21

3.1.3 Průběh testů 22

3.1.4 Vyhodnocení testů 22

4 ZÁVĚR 30

LITERÁRNÍ ZDROJE 32

Seznam obrázků

Obr. č. 1 Technologie a způsob nakládání s fermentačním zbytkem (Černý, Holba, 2015) 7
Obr. č. 2 Schéma pásové sušárny Stella BTL (zdroj www. pawlica.cz)..... 12
Obr. č. 3 systém překrytí uskladňovací nádrže na fermentační zbytek (Balsari et al., 2013) .. 17
Obr. č. 4 Průměrný denní výnos metanu z uskladňovací jímky o objemu 6000 m^3 (podle Balsari et al., 2013) 17
Obr. č. 5 Zastřešení koncového skladu digestátu, BPS Bratčice, září 2015 (foto M. Geršl) ... 18
Obr. č. 6 Laboratorní vsázkové fermentory (foto J. Kudělka) 20
Obr. č. 7 Měření složení bioplynu (foto J. Kudělka)..... 22
Obr. č. 8 Denní produkce metanu vzorek A1..... 24
Obr. č. 9 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A1 25
Obr. č. 10 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A1 25
Obr. č. 11 Denní produkce metanu vzorek A2..... 26
Obr. č. 12 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A2 26
Obr. č. 13 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A2 27
Obr. č. 14 Obsah metanu v bioplynu vzorek A1 a A2 27
Obr. č. 15 Denní produkce metanu vzorek B1, B2 a B3 28
Obr. č. 16 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek B1, B2 a B3 29
Obr. č. 17 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek B1, B2 a B3 29
Obr. č. 18 Obsah metanu v bioplynu B1, B2 a B3..... 30

Seznam Tabulek

Tabulka 1 Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech (vyhláška MŽP 474/2000 sb) 10
Tabulka 2 Požadavky na fermentační zbytek (příloha č. 3 vyhlášky MŽP 476/ 2000 sb)..... 10
Tabulka 3 Období zákazu používání dusíkatých hnojivých látek (N. V. č. 103/ 2003 Sb.) 11
Tabulka 4 Přehled testovaných materiálů 19
Tabulka 5 Teploty testování jednotlivých materiálů..... 19
Tabulka 6 Souhrnné výsledky testování při teplotě 41 a 43°C 31

1 Úvod

Fermentační zbytek je sekundárním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů. Jeho kvalita a následný způsob využití je ovlivněn několika faktory. Jedná se především o druh a způsob předúpravy vstupních materiálů, procesní podmínky anaerobní fermentace, způsob a doba skladování výstupního materiálů (Marcato et al., 2008). Tekutá anaerobní fermentace produkuje fermentační zbytek, který lze rozdělit různými separačními technologiemi na kapalnou část a tzv. separát. Separát obsahuje většinu pevných látek a má obsah sušiny větší než 13 %, obsah sušiny u tekuté frakce je menší než 3 %.

Fermentační zbytek obsahuje vysoké koncentrace dusíku, fosforu a draslíku. Z tohoto důvodu je v současné době využíván především jako hnojivo (Tambone et al., 2009) za splnění podmínky legislativních požadavků pro aplikaci na zemědělskou půdu. Obsah snadno rozložitelných organických látek ve fermentačním zbytku závisí zejména na době zdržení substrátu v bioplynové stanici. Čím je tato doba zdržení delší, tím fermentační zbytek obsahuje menší množství snadno rozložitelných organických látek (Stinner, Müller, Leithold, 2008). Obsah organické sušiny se snižuje o 45 – 65 %. Poměr C:N se mění z původních asi 18 : 1 až 12 : 1 na 8 : 1. Okolo 90 % $N\text{-}NH_4^+$ přechází do kapalné fáze $NH_3(aq)$. Poměr C : N je zdánlivě mimořádně příznivý. Nelze ale zapomenout, že je běžně stanoven z hodnot C_{tot} a N_{tot}, bez ohledu na rozložitelnost materiálu. A ta se bohužel prudce zhoršuje (Kolář, 2009).

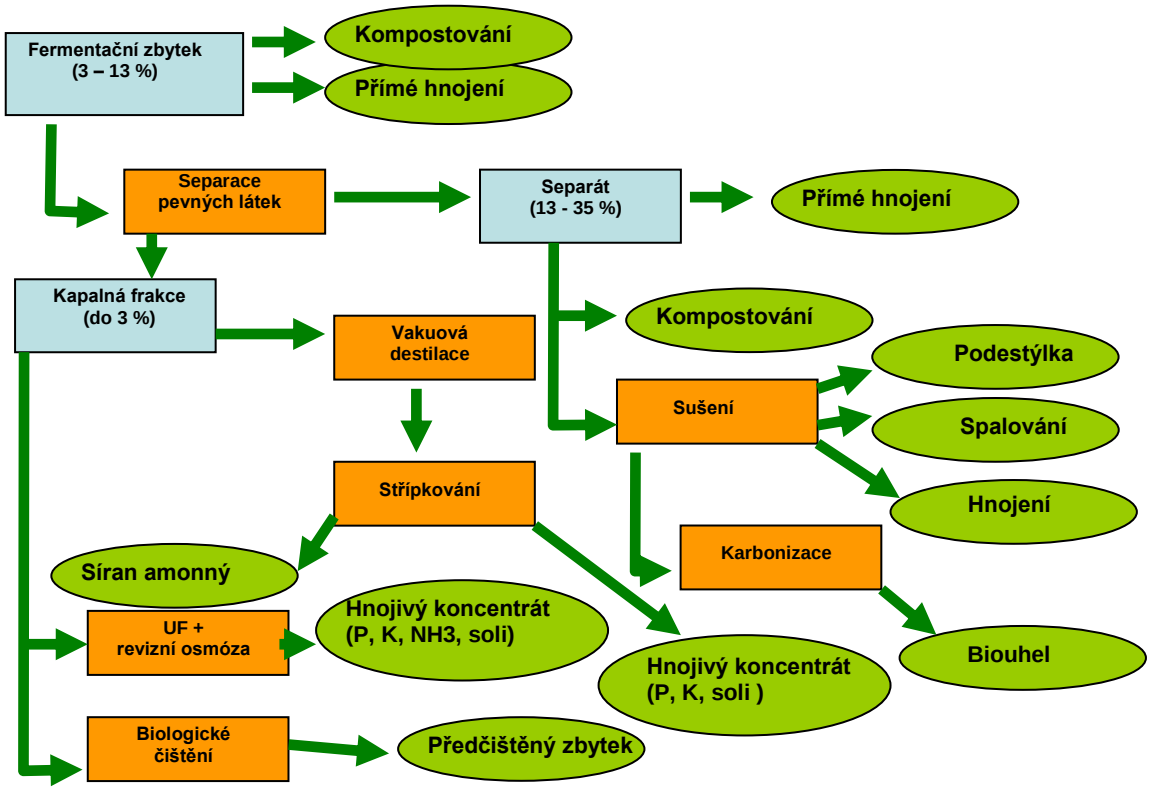
Do procesu anaerobní fermentace se mohou z různých zdrojů dostávat těžké kovy. Jestliže jsou v bioplynové stanici zpracovávány materiály s vysokým obsahem těchto prvků, může být jejich obsah ve fermentačním zbytku vyšší ve srovnání s minerálními hnojivy. Následná aplikace takového fermentačního zbytku na zemědělskou půdu je z pohledu právních předpisů nemožná a je nutné hledat jiný způsob nakládání s tímto materiálem.

Možností, jak využít tento fermentační zbytek, resp. separát, by mohlo být jeho lisování do formy standardizovaného paliva a následné energetické využití ve vhodných provozech (Pfundtner, 2002).

2 Problematika vzniku a využití fermentačních zbytků

2.1 Rozdělení fermentačního zbytku a možnosti využití

Způsob nakládání s fermentačním zbytkem je závislý zejména na výsledné kvalitě vzniklého produktu z anaerobní fermentace. To znamená, že především záleží na vlastnostech materiálů, které vstupují do bioplynových stanic. Provázanost základních produktů technologií zpracování určených k úpravě fermentačního zbytku je zobrazeno ve schématu na obr. č. 1.



Obr. č. 1 Technologie a způsob nakládání s fermentačním zbytkem (Černý, Holba, 2015)

2.1.1 Rozdělení podle vstupních surovin

Bioplynové stanice, v nichž vznikají fermentační zbytky, můžeme rozlišit podle druhu vstupních surovin.

a) Fermentační zbytky z cíleně pěstované biomasy

Tato skupina zahrnuje nejvýznamnější část bioplynových stanic a to jak z hlediska jejich počtu, tak z pohledu instalovaného výkonu. V roce 2014 bylo v České republice v provozu přibližně 500 bioplynových stanic, z toho 330 bylo provozováno na využití zemědělských plodin.

b) Fermentační zbytky z biologicky rozložitelných odpadů (BRO)

Na bioplynové stanice využívající jako vstupní materiál biologicky rozložitelné odpady se vztahuje vyhláška č. 341/2008 sb. v platném znění. Ve vyhlášce je uveden seznam bioodpadů využitelných při výrobě bioplynu. Vyhláška rovněž řeší postupy, při nakládání s fermentačním zbytkem.

c) Fermentační zbytky ze zpracování vedlejších živočišných produktů (VŽP)

V případě, že jsou v bioplynové stanice zpracovány vedlejší živočišné produkty, musí být plněny podmínky Nařízení Rady Evropského parlamentu 1069/2009. V současné době se často hovoří o fermentačních zbytcích ze společného zpracování čistírenských kalů a jatečních nebo kuchyňských odpadů. Výstup z podobných zařízení je možné využívat pouze jako upravený kal podle navazující vyhlášky zákona o odpadech č. 382/ 2001 sb., o podmínkách použití upravených čistírenských kalů na půdě. Zároveň musí být tyto BPS schváleny Krajskou veterinární správou.

2.1.2 Rozdělení podle způsobu následného využití fermentačního zbytku

2.1.2.1 Využití fermentačního zbytku jako hnojiva

Výsledky průzkumu zemědělské půdy v ČR poukazují na zhoršující se stav. Porovnáním výsledků agrochemických zkoušek v rozmezí deseti let (1999 - 2009), bylo zjištěno, že dochází k okyselování půd, snížení obsahu přístupného draslíku, fosforu a vápníku. Za

poklesem makroprvků v půdě může stát nárůst cen minerálních hnojiv a pokles chovu hospodářských zvířat, kterým se snižuje možnost aplikace organických látek na půdu, které jsou obsaženy ve statkových hnojivech (Lošák et al., 2011). Z hlediska množství statkových hnojiv by v ideálním případě měla připadnout 1 dobytčí jednotka na 1 ha zemědělské půdy. Ve skutečnosti však připadá na 1 ha pouze 0,3 dobytčí jednotky a to se projevuje na ztrátě půdní síly (Dostál, Rychter, 2008). Použitím fermentačního zbytku jako hnojiva se se do půdy dostávají potřebné makro i mikroživiny. Problémem může být pokles uhlíkatých látek, jelikož převážná část uhlíku je procesem anaerobní fermentace převedena na žádaný metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2). Tím se podíl C:N snižuje. Obsah uhlíku a hnojivý účinek se zvyšuje přidáním posklizňových zbytků (Kratochvílová et al., 2009).

Fermentační zbytek lze použít jako hnojivo za předpokladu splnění podmínek zákona o hnojivech (156/1998 sb.v pl. znění). Rovněž musí splňovat dané podmínky pro registraci. Výjimku mají pouze fermentační zbytky, které vznikly na zemědělských BPS. Provozovatel je ale povinen tyto zbytky aplikovat na vlastních pozemcích. O registraci hnojiva rozhoduje ÚKZUZ na základě žádosti, který je zároveň příjemcem žádosti. Společně s žádostí žadatel předkládá vzorek fermentačního zbytku, který musí být analyzován. Případně musí umožnit odběr pověřenou osobou.

Podle vyhlášky MŽP č. 474/ 2000 sb. o stanovení požadavků na hnojiva je fermentační zbytek organickým hnojivem typově (18.1 e). Laboratorním rozborem akreditovanou laboratoří se ve vzorku zjišťují následující parametry: Obsah sušiny, spalitelné látky, celkový dusík N, hodnota pH, celkový fosfor ve formě P_2O_5, celkový draslík ve formě K_2O a přítomnost - množství rizikových prvků. (Váňa, 2007). Požadavky na fermentační zbytek a seznam sledovaných rizikových prvků s mezními koncentracemi je uveden ve vyhlášce MŽP 474/ 2000 sb.v platném znění. (tab. č. 1,2).

Tabulka 1 Limitní hodnoty rizikových prvků v org. hnojivech (vyhláška MŽP 474/2000 sb.)

	mg/kg sušiny								
	Kadmium	**Olovo**	**Rtuť**	**Arsen**	**Chrom**	**Měď**	**Molybden**	**Nikl**	**Zinek**
	Cd	**Pb**	**Hg**	**As**	**Cr**	**Cu**	**Mo**	**Ni**	**Zn**
Sušina do 13 %	*2*	*100*	*1*	*20*	*100*	*100*	*5*	*50*	*300*
Sušina nad 13 %	*2*	*100*	*1*	*20*	*100*	*150*	*20*	*50*	*600*

Tabulka 2 Požadavky na fermentační zbytek (příloha č. 3 vyhlášky MŽP 476/ 2000 sb)

Číslo typu	***Označení typu***	***Minimální obsah živin***	***Součásti označující typ formy a rozpustnost živin***	***Hodnocení součástí***	***Složení, způsob výroby***
18.1 e	Organické hnojivo	25 % Spalitelných látek	Spalitelné látky	Spalitelné látky v sušině hodnocené jako ztráta žíháním	Zejména ze statkových hnojiv anaerobní fermentací
		0,6 % N	Celkový dusík	Dusík hodnocený jako celkový dusík v sušině	

Podmínkou vydání registrace je zpracování příbalového letáku. Musí v něm být uveden popis dávkování, způsob zapravování hnojiva a druh plodiny, která bude fermentačním zbytkem hnojena. Rozhodnutí o registraci je platné po dobu 5 let.

Dávka fermentačního zbytku a frekvence hnojení fermentačním zbytkem není v současné době jinak ošetřena (mimo zranitelné oblasti). Množství dávky závisí na obsahu dusíku ve fermentačním zbytku. Přičemž je nutné sledovat, zda jsou % N v absolutní sušině, či v čerstvé hmotě.

Fermentační zbytek, jako organické hnojivo zařazujeme podle zákona č. 254/ 2001 sb., o vodách v platném znění mezi závadné látky. Zákon uvádí, že kdo zachází se závadnými látkami je povinen učinit přiměřená opatření, aby nevnikaly do povrchových a podzemních vod a tím neohrožovaly životní prostředí. To při aplikaci fermentačního zbytku představuje dodržovat podmínky nařízení vlády č. 103/ 2003 sb. o stanovení zranitelných oblastí a o používání a skladování hnojiv a statkových hnojiv, střídání plodin a provádění protierozních opatření v těchto oblastech (Tab. č. 3).

Tabulka 3 Období zákazu používání dusíkatých hnojivých látek (N. V. č. 103/ 2003 Sb.)

Zemědělský pozemek s pěstovanou plodinou		Období zákazu hnojení
Plodina	Klimatický region*	Hnojiva s rychle uvolněným dusíkem
Plodina na orné půdě (mimo travních a jetelovitých porostů), trvalé kultury	0 - 5	15.11. - 31.1.
	6 -9	1.11. - 28.2.
Travní porosty na orné půdě, trvalé kultury	0 -5	15.11. -31.1.
	6 -9	1.11. - 28.2.
* 1- Číslice kódu bonitované půdně ekologické jednotky Používání upravených kalů na orné půdě je zakázáno v období od 1.6. do 31.7.		

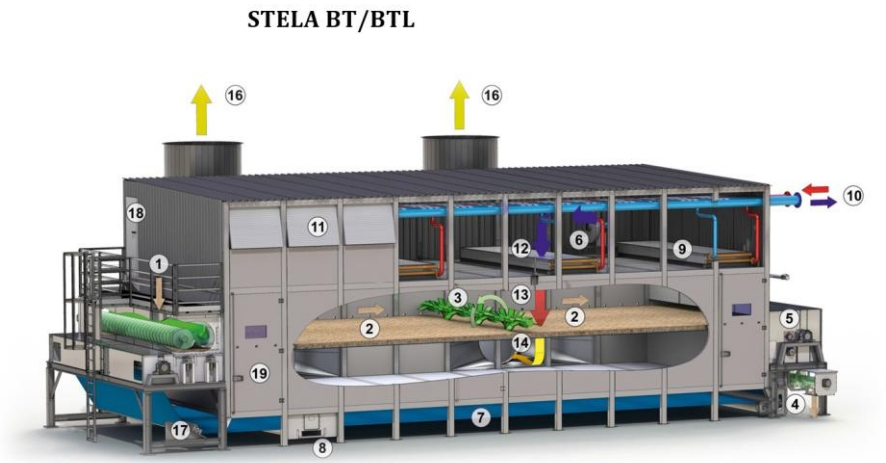
2.1.2.2 Využití fermentačního zbytku jako paliva

Fermentační zbytek po procesu anaerobního stabilizace obsahuje převážně špatně rozložitelnou stabilní organickou hmotu. Míra stability, hloubka degradace organické hmoty a tím i výtěžek bioplynu závisí na teplotě procesu anaerobní fermentace a době zdržení ve fermentoru.

Obecně lze říci, že čím více bioplynu při anaerobní fermentaci vznikne (více uhlíku se uvolní ve formě sloučenin CH_4 a CO_2), tím méně uhlíku zbude na proces hoření (Kužel, 2010).

Voda obsažená ve fermentačním zbytku snižuje jeho výhřevnost. K odstranění vody z fermentačního zbytku se využívá fyzikální metody (odlučování) a tepelné metody (sušení). K primárnímu kroku při zpracování fermentačního zbytku patří odvodnění. Následuje separace fermentačního zbytku na sítových nebo bubnových separátorech. Získaný separát je polotuhý „koláč“, který je jednodušší skladovat. To v kombinaci se sníženým objemem mimo jiné usnadňuje a snižuje náklady na dopravu k dalšímu zpracování (Frischmann, 2012).

Pro následný proces sušení se vyžaduje konečná sušinu separátu v rozmezí 10 – 15 %. Pro sušení jsou využívány pásové sušárny konstruované pro různé výkonové velikosti bioplynových stanic. Pracují s teplotou od 80 do 120 °C. Jako hlavní zdroj tepla se využívá zbytkové teplo z kogenerace a teplo z chladící vody. Na usušení celkového množství separátu není množství odpadního tepla dostatečné. Výrobci pásových sušáren Dorset GM uvádí, že na usušení materiálu na potřebnou sušinu 85 – 88 % je nutné dodat 0,6 – 1,1 kWh/kg. Jiný zdroj uvádí, že v kombinaci s užitím solární energie spotřebujeme 0,52 kWh/ kg (Kottner M., 2007). Schéma kontinuální pásové sušárny je zobrazeno na obr. č. 3.



Obr. č. 2 Schéma pásové sušárny Stella BTL (zdroj www. pawlica.cz)

V případě potřeby se usušený produkt následně granuluje. Granule jsou vyráběny na potlačovaných matricových lisech pod vysokým tlakem. Peletování (granulování) způsobuje vysokou hustotu materiálu důležitou pro minimalizaci objemu paliva na jednotku energetického potenciálu (Frischmann, 2012). Pokud je vlhkost fermentačního zbytku dostatečně nízká a účinnost spalování vysoká, spalování může probíhat bez potřeby vnějšího zdroje tepla nebo přídavného paliva a může dojít k zisku energie (Veolia, 2006).

Spalováním fermentačního zbytku vzniklého zpracováním kalů a VŽP se při teplotě 350 – 700 °C mohou uvolňovat jedovaté a karcinogenní polychlorované dioxiny a dibenzofurany. Při obsahu draslíku, síry nebo sodíku vznikají spalováním silně korozivní spaliny. Teplota tání popela se rapidně snižuje (Brožek, 2011). Koutný R., (2010) uvádí, že fermentační zbytek ze zpracování kalů z ČOV není palivem šetrným k životnímu prostředí. Nedoporučuje ho ani odstraňovat spoluspalováním s biomasou. Poukazuje na to, že zařízení, která spalují tento materiál, musí být vybavena monitoringem vypouštěných emisí. Konečný produkt ze spalování (popel) je buď ukládán na skládky, nebo po vyloučení všech nebezpečných vlastností může být využit jako stavební materiál.

2.2 Metody stabilizace fermentačních zbytků

Stabilizace biologicky rozložitelného materiálu je proces, během kterého se vlastnosti materiálu uvedou do stavu, kdy dále nepodléhají samovolnému, spontánnímu rozkladu. Jedná se především o biochemické procesy vedoucí ke snížení obsahu snadno rozložitelných organických látek. U kalu z čistíren odpadních vod se dříve považoval za stabilizovaný kal s obsahem méně než 50% organického podílu materiálu stanoveného jako ztráta žíháním.

V dnešní době je na základě empirických zkušeností, pro každou používanou metodu, stanovena doba zdržení k dosažení stabilizace.

Jednou z metod stabilizace organického materiálu je aerobní stabilizace. Tato metoda využívá stabilizace v omických podmínkách. Jedná se o technicky jednoduchou metodu, která však vyžaduje provozní náklady na aeraci materiálu v odděleném prostoru. Pro aerobní stabilizaci kalu z čistíren odpadních vod je nutné kal udržovat po dobu 35 dní při koncentraci kyslíku 0,5 – 1,5 $mg \cdot l^{-1}$. U jiných materiálů je nutné uvažovat aktuální stav rozkladu materiálu.

Autotermní aerobní termofilní stabilizace je metoda, při které dochází k žádoucímu zvýšení teploty za přístupu kyslíku. Vlivem přísunu kyslíku či vzduchu ve směsi s kyslíkem nebo pouze vzduchu dochází k exotermním aerobním biologickým procesům. Ty způsobují zvýšení teploty materiálu až na 55 – 60^{0}C. Na této teplotě je proces řízeným způsobem udržován po celou dobu stabilizace. U čistírenského kalu se jedná o stabilizaci, případně i hygienizaci, která je dána dobou zdržení 20 dní při tepotě minimálně 55 ^{0}C.

Další metodou je anaerobní kryofilní stabilizace. Tato metoda využívá prostředí bez přístupu vzduchu. V případě kryofilního prostředí se jedná o stabilizaci za okolní teploty, tedy v rozmezí 6 – 20^{0}C. U této metody je doba zdržení 60 – 90 dní. Jedná se o metodu, která je v případě pouhého uskladnění z legislativního hlediska nepřijatelná. Produkce skleníkového plynu, kterým je metan z anaerobního procesu, do atmosféry je nežádoucí.

Metoda anaerobní mezofilní stabilizace je metodou s největším rozšířením. Jedná se o stejné podmínky, které jsou běžné v reaktorech bioplynových stanic. Je to opět metoda využívající prostředí bez přístupu vzduchu. Teplota se pohybuje v rozmezí od 31^{0}C do 42^{0}C. Při stabilizaci je doba zdržení u kalu z čistírny odpadních vod 20 – 30 dní. Doba zdržení se však odvíjí v tomto případě také od ekonomických hledisek spojených s jímáním vzniklého, spalitelného plynu.

Anaerobní termofilní stabilizace je metoda využívající vyšších teplot. Jedná se o teploty materiálu v rozmezí 45 – 60^{0}C. Vzhledem k anaerobnímu prostředí je to metoda probíhající v prostředí bez přístupu vzduchu. Doba stabilizace se jako u ostatních metod odvíjí od povahy vstupního materiálu. U kalu z čistíren odpadních vod je doba stabilizace touto metodou stanovena na 15 – 18 dní při teplotě 55^{0}C. Při této metodě je odbourání organické hmoty intenzivnější než v metodách předchozích. Proces anaerobní termofilní stabilizace je však více náchylný na provozní podmínky vstupního materiálu, pH a další. Mezi další nevýhody patří vyšší ekonomická náročnost provozních nákladů vzhledem k vyšší teplotě potřebné ke stabilizaci.

2.3 Možnosti využití zbytkové produkce bioplynu

V posledních letech v důsledku vysoké dotační politiky vzrostla výstavba zemědělských bioplynových stanic v celé Evropě (EurObserv'ER, 2010). Průměrný instalovaný výkon u těchto bioplynových stanic činí 0,5 MWh. Přičemž průměrná denní produkce fermentačního zbytku se odhaduje na 100 m^3 za 1MWh vyrobené energie. (DEIAFA, 2012, nepublikované údaje). U procesu anaerobní fermentace je vyžadováno, aby byl fermentační zbytek před samotnou aplikací na zemědělskou půdu uložen v uskladňovacích nádržích. Objem uskladňovacích nádrží musí být navržen pro minimální dobu 120 – 180 dnů, což je doba po kterou je vyloučena aplikace na zemědělskou půdu. Rovněž musí být splněny časové požadavky aplikace na půdu (Regione Piemonte, 2007). Sommer (1997) uvádí, že materiálové ztráty v uskladňovací nádrži jsou očekávány s ohledem na velké množství těkavých látek, dusíku a vysokým koncentracím NH_4 – N.

2.3.1 Zbytkový bioplyn – ovlivnění životního prostředí

Menado et al. (2011) zjistil, že uložený fermentační zbytek obsahuje značný bioplynový potenciál. Gioelli et al.(2011) provedli experimentální měření vznikajících emisí N nad dvěma uskladňovacími nádržemi BPS o instalovaném výkonu 1 MWh. Průměrné emise bioplynu u první uskladňovací jímky fermentačního zbytku činily 468 L_N $m^{-2}\cdot den^{-1}$ u druhé 190 L_N $m^{-2}\cdot den^{-1}$. Kromě toho Gioelli et al. (2009) zjistil, že denní průměrné vyprodukované množství NH_3 z fermentačního zbytku v uskladňovací jímce se pohybuje od 2,06 – 4,44 g NH_3 . m^{-2}. U kapalné frakce hodnota činí 7,89 – 14,6 NH_3. m^{-2} povrchu.

Uvolňováním hlavních složek bioplynu metanu (CH_4) do ovzduší je porušována ozonová vrstva v stratosféře. Amoniak (NH_3) navíc způsobuje erozi a okyselení půd což znamená, že bioplyn a NH_3 uvolněný z uskladňovacích nádrží na fermentační zbytek představují nebezpečí pro životní prostředí (Goebes et al., 2003).

2.3.2 Opatření pro omezení emisí NH_3 a CH_4

Pokud jde o současnou praxi provozovatelů, ukazuje se, že fermentační zbytky jsou obvykle uloženy v odkrytých nádržích (Gioelli et al., 2012). Nejjednodušším způsobem snižování emisí do ovzduší je použití vhodného materiálu na hladinu kapaliny v nádrži. K tomuto účelu je vhodná řada přírodních, ale i syntetických materiálů (sláma, rašelina, geotextílie). Mnohé mají svá omezení, jak uvádí VanderZaag et al., (2008) a Balsari et al., (2006).

Pevné kryty na uskladňovacích jímkách jsou dalším řešením. Hornigem et al. (1999) zdůrazňují, že se jedná o nákladné a nepraktické řešení, jelikož kryty musí být v důsledku míchání a čerpání odkryty. Nafukovací kupole tento problém řeší otevřením otvorů při vyvážení nebo míchání materiálu. (Stenglein et al., 2011).

2.3.3 Využití zbytkového bioplynu z uskladňovacích jímek

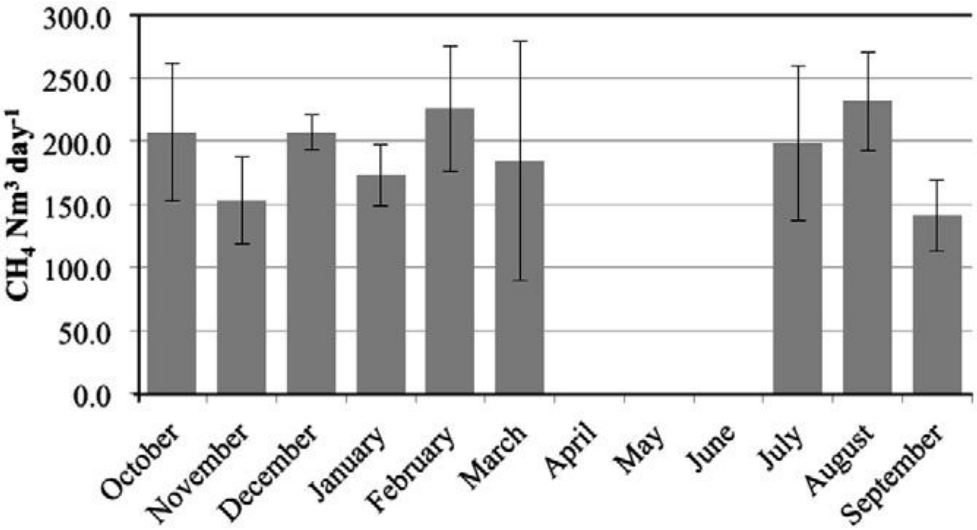
Emisím metanu vypouštěných do ovzduší u bioplynových stanic z uskladňovacích jímek lze zamezit instalací skladovacích vaků na bioplyn. Tento způsob řešení sebou přináší výhodu zvýšení produkce bioplynu při procesu anaerobní fermentace. Nejběžnějším řešením překrytí uskladňovací nádrže je použití dvojité tlakové membrány (Menardo et al., 2011). Nicméně tento způsob nepředstavuje stoprocentní řešení při zabránění uvolňování emisí do ovzduší. Při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu není proces fermentace v uskladňovacích nádržích zcela zastaven. Navíc během opakovaného čerpání fermentačního zbytku z uskladňovací nádrže, musí být skladovací jímka plněna vzduchem. Tím se snižuje i zbytková produkce bioplynu.

Pro řešení těchto nedostatků navrhl Paolo Balsari et al. (2013) plovoucí systém překrytí uskladňovací jímky za účelem využití a emitování zbytkového plynu. Plovoucí systém byl navržen ve spolupráci s DEIAFA. Kryt přes nádrž je navržen tak, že se pohybuje v závislosti na úrovni zaplnění uskladňovací jímky. Navrženým způsobem se produkce bioplynu nesnižuje, jelikož se vzniklý bioplyn neředí v atmosférickém ovzduší. Chceme-li snížit množství pevné krusty na povrchu uskladňovací jímky, je nutné zajistit, aby byl plovoucí kryt

umístěn přímo na povrchu rozložené tekuté frakce. Na obrázku č. 3 je zobrazena instalace plovoucího systému zastřešení.

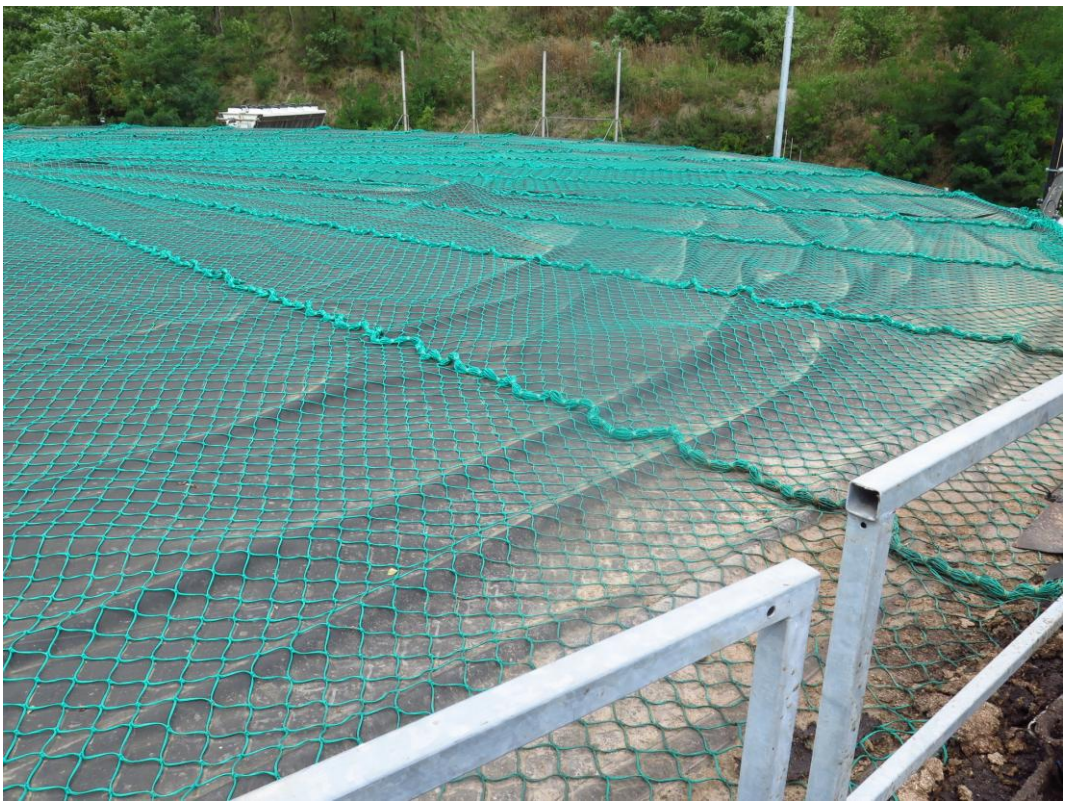
Obr. č. 3 systém překrytí uskladňovací nádrže na fermentační zbytek (Balsari et al., 2013)

Během devítiměsíčního testování použitím plovoucího systému bylo, zjištěno že v uskladňovací nádrži na fermentační zbytek se průměrně za den vyprodukuje 11,726 m^3, který lze využít (Balsari et al., 2013). Průměrný denní výnos metanu z uskladňovací nádrže v jednotlivých měsících pokusu je zaznamenán v obr. č. 4.



Obr. č. 4 Průměrný denní výnos metanu z uskladňovací jímky o objemu 6000 m^3 (podle Balsari et al., 2013)

Popsaný návrh překrytí nabízí kromě ekonomických výhod i environmetální přínosy. Překrytí uskladňovací jímky na tekutou frakci fermentačního zbytku u bioplynové stanice o instalovaném výkonu 1 MWh zabraňuje uvolnění až 160 kg CO_2 na MWh.



Obr. č. 5 Zastřešení koncového skladu digestátu, BPS Bratčice, září 2015 (foto M. Geršl)

3 Testy zbytkové produkce bioplynu

Cílem této práce bylo změřit zbytkovou produkci bioplynu a metanu z fermentačních zbytků. Pro maximální vypovídající hodnotu testů byly vybrány fermentační zbytky pocházející z různých technologií zpracování zemědělských produktů a to zejména s ohledem na různou dobu zdržení. Všechny testované materiály pochází z bioplynových stanic zpracovávajících převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Tento materiál byl zvolen s ohledem na jeho největší zastoupení v současných technologiích produkce bioplynu v České republice. Aby byla zachována anonymita bioplynových stanic, kde byly vzorky odebrány, jsou v práci označeny pod písmeny A1,2 a B1,2,3. Celkem se jednalo o 5 vzorků z různých bioplynových stanic provozovaných na území České republiky.

Tabulka 4 Přehled testovaných materiálů

	Doba zdržení	Obsah sušiny	Obsah spalitelných látek	pH	EH
Označení vzorku	[den]	[%]	[%]	[-]	[-]
A1	51	7,66	75,69		
A2	60	6,69	75,50		
B1	70	5,01	69,69	7,92	-79,8
B2	34	7,86	79,86	7,83	-75,3
B3	50	4,86	77,33	7,81	-72,7

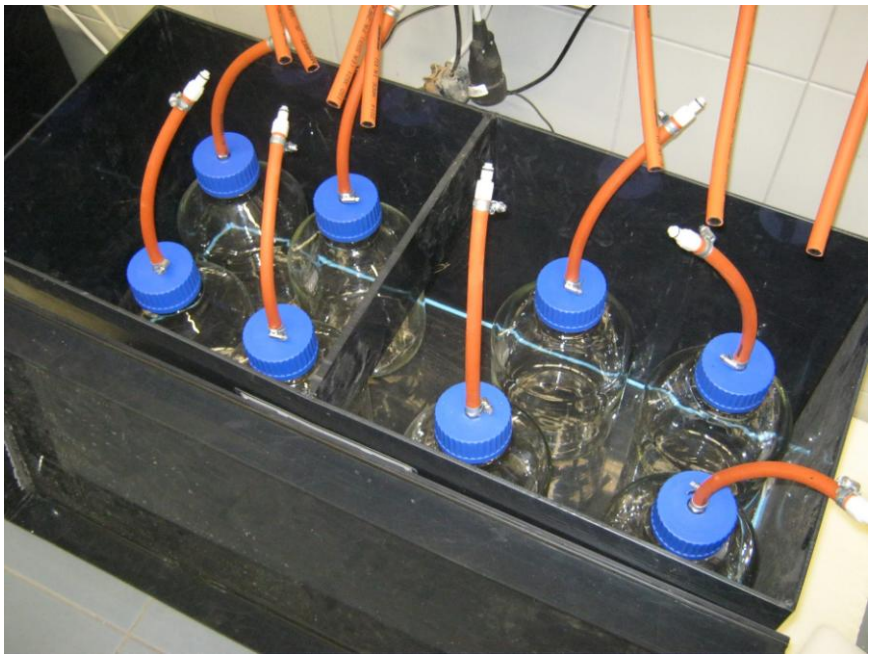
Rychlost a intenzita procesů anaerobního rozkladu je zásadně ovlivněna teplotou, při které probíhají. Z toho důvodu bylo testování provedeno při různých teplotách. První varianta byla zvolena jako běžná provozní teplota bioplynových stanic tak, aby nedošlo k zásadnímu ovlivnění funkce mikrobiálních kultur v materiálu. Tato varianta ovšem vyžaduje stejně intenzivní vyhřívání jako má samotný fermentor na teplotu 41 a 43 °C. Protože skladovací nádrže nebyly primárně určeny k intenzivní produkci bioplynu a zpravidla nejsou vybaveny systémem topení, byla testována také varianta teplot nižších. Byly zvoleny různé teploty testování tak, aby bylo pokryto co nejširší spektrum teplotních intervalů, které mohou v průběhu roku nastat. Jedná se o hodnoty 16, 20 a 25°C. Je třeba si uvědomit, že i v průběhu zimních měsíců bude přes tepelné ztráty teplota v nevyhřívané nádrži udržována každodenním přítokem teplého materiálu z fermentoru.

Tabulka 5 Teploty testování jednotlivých materiálů

	16°C	20°C	25°C	41°C	43°C
A1	•		•	•	
A2	•		•	•	
B1		•			•
B2		•			•
B3		•			•

3.1 Metodika testů

Testy byly provedeny v Republikové laboratoři bioplynových transformací na Mendělově univerzitě v Brně. Pro testy byly použity vsázkové reaktory o pracovím objemu 5 dm^3, které jsou umísteny ve vyhřívané vodní lázni. Pomocí termostatu je teplota regulována na požadovanou přednastavenou teplotu. Na měření množství vzniklého bioplynu jsou použity vodní plynojemy naplněné zásobním roztokem zamezujícím rozpouštění plynů. Složení roztoku vychází z normy VDI 4630. Pro zamezení přístupu světla a zvýšení homogenity teploty kolem fermentorů je vyhřívaná lázen opatřena víkem a tepelnou izolací.



Obr. č. 6 Laboratorní vsázkové fermentory (foto J. Kudělka)

3.1.1 Použité vybavení

Bioreaktor: zabezpeční podmínek pro testování přidaných materiálů

Analyzátor plynů Combimass GA-m : měření kvality bioplynu CH_4, CO_2, H_2S, O_2

Plynoměr BK G4: měření kvantity vznikajícího bioplynu

Elektrická sušárna KBS G 100: stanovení sušiny

Muflová pec LMH 07/12: stanovení organické sušiny

Laboratorní váhy RADWAG AS 220/C/2: vážení vzorku při stanovení sušiny

3.1.2 Analýza vstupních materiálů

Na začátku testu byla provedena analýza testovaných materiálu, jednalo se zejména o obsah sušiny a spalitelných látek v materiálu. Tyto parametry byly stanoveny podle normy ČSN EN 14346.

Rovnice 1 Stanovení sušiny materiálu

$$\omega_{suš} = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde:

$\omega_{suš}$ - obsah sušiny ve vzorku [%]

m_1 - hmotnost vysušeného vzorku [kg]

m_2 - hmotnost vzorku před sušením [kg]

Rovnice 2 Stanovení obsahu spalitelných látek

$$\omega_{org} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 \quad [\%]$$

kde:

$\omega_{suš}$ - obsah organických látek v sušině vzorku [%]

m_1 - hmotnost vysušeného vzorku [kg]

m_2 - hmotnost vzorku po spálení [kg]

3.1.3 Průběh testů

Testy anaerobní fermentace probíhaly po dobu 24 dní při stanovených teplotách. Každý den byla měřena a zaznamenána produkce bioplynu a jeho složení, zejména obsah metanu, oxidu uhličitého a sirovodíku.

Obr. č. 7 Měření složení bioplynu (foto J. Kudělka)

3.1.4 Vyhodnocení testů

Po ukončení testů anaerobní fermentace byly jednotlivé fermentory otevřeny a odebrány vzorky pro analýzy. Aby bylo dosaženo vyššího stupně vypovídací hodnoty testu, byly všechny materiály měřeny ve třech fermentorech. Prezentované výsledky jsou brány jako průměrné hodnoty tří reaktorů. Vzhledem k velkému množství testovaných vzorků bylo nutné provádět testování ve dvou termínech. V první sadě testů byly měřeny vzorky pod označením A1 a A2. Při druhých testech pak vzorky B1, B2 a B3.

Pro prezentaci výsledků je proveden přepočet produkce bioplynu a metanu na fyzikálně normální podmínky.

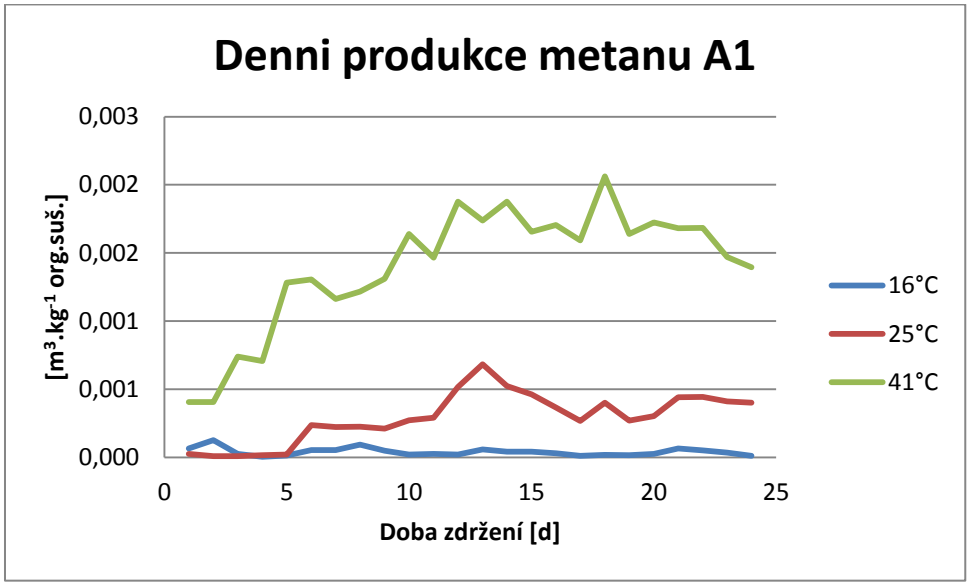
Rovnice 3 přepočet objemu na normální podmínky

$$V_n = \frac{T_0}{T_n} \cdot (k \cdot h_n) \cdot \frac{\left[\left(p_a + (h_k \cdot \rho \cdot g) + \left(\left(\frac{h_n}{100}\right) \cdot \rho \cdot g\right)\right)\right]}{p_a} \cdot 10^{-3}$$

V_n	- objem bioplynu za fyzikálně normálních podmínek	[m^3]
T_0	- fyzikálně normální termodynamická teplota	[K]
T_n	- změřená termodynamická teplota	[K]
k	- kalibrační konstanta měřicího systému	[-]
h_n	- výška odečtené hladiny	[cm]
pa	- atmosférický tlak	[Pa]
h_k	- výšková konstanta měřicí trati	[m]
ρ	- hustota zásobní kapaliny	[$kg.m^{-3}$]
g	- tíhové zrychlení	[$m.s^{-2}$]

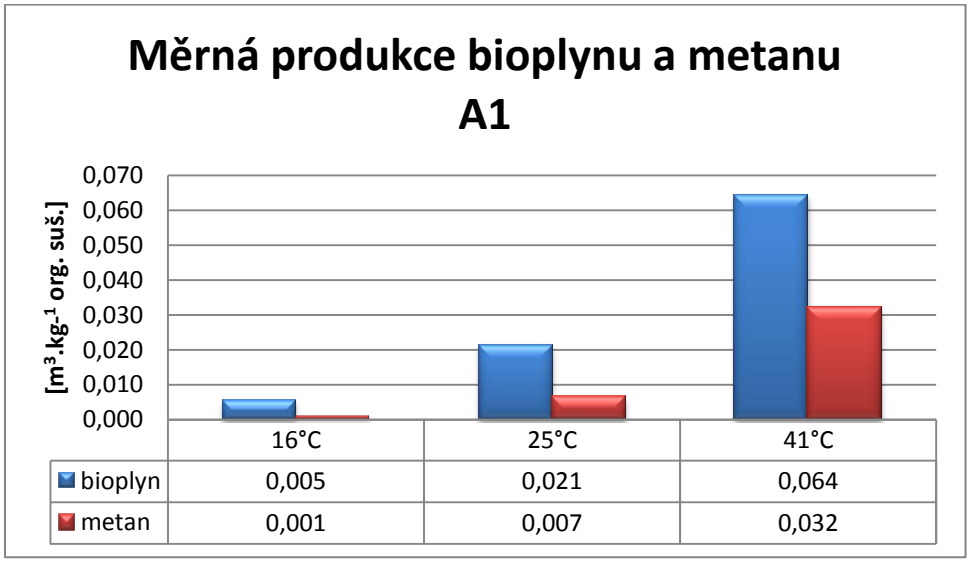
3.1.4.1 Výsledky testu 1

Materiál testovaný pod označením A1 je fermentační zbytek odebraný ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávají převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. V menší míře jsou zde využívány cukrovarské řízky a drůbeží trus. Jedná se o systém dvoustupňové fermentace s dobou zdržení 51 dní.



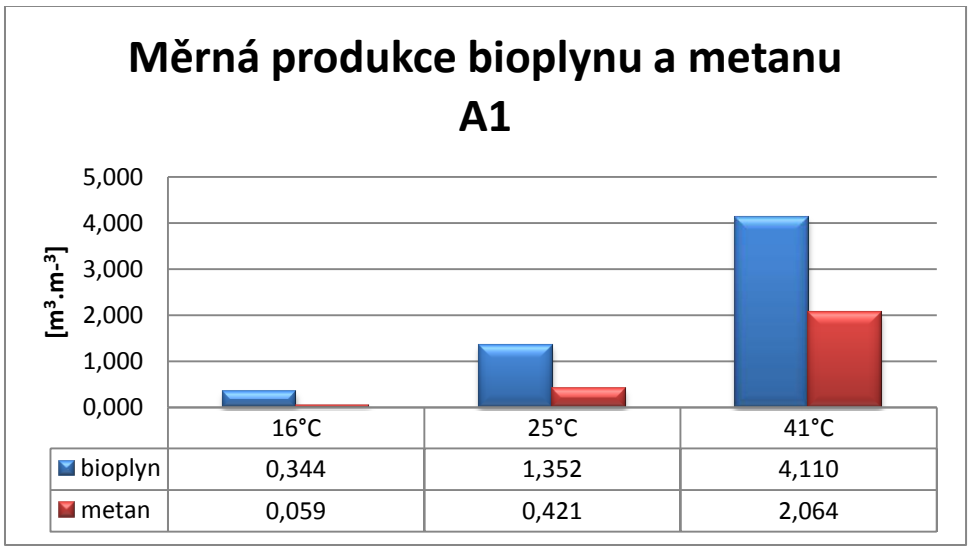
Obr. č. 8 Denní produkce metanu vzorek A1

Denní produkce metanu zobrazuje dynamiku procesu tvorby metanu v průběhu testu. Ta je důležité zejména pro návrh optimální doby zdržení. Z grafu je patrné, že v prvních dnech byla produkce metanu poměrně nízká s narůstající tendencí. U fermentorů s vyšší teplotou byl patrný rychlejší nárůst produkce metanu a to skokově do 5. dne testu. Maximální produkce bylo dosaženo od 10. do 22. dne, poté začala produkce opět klesat.



Obr. č. 9 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A1

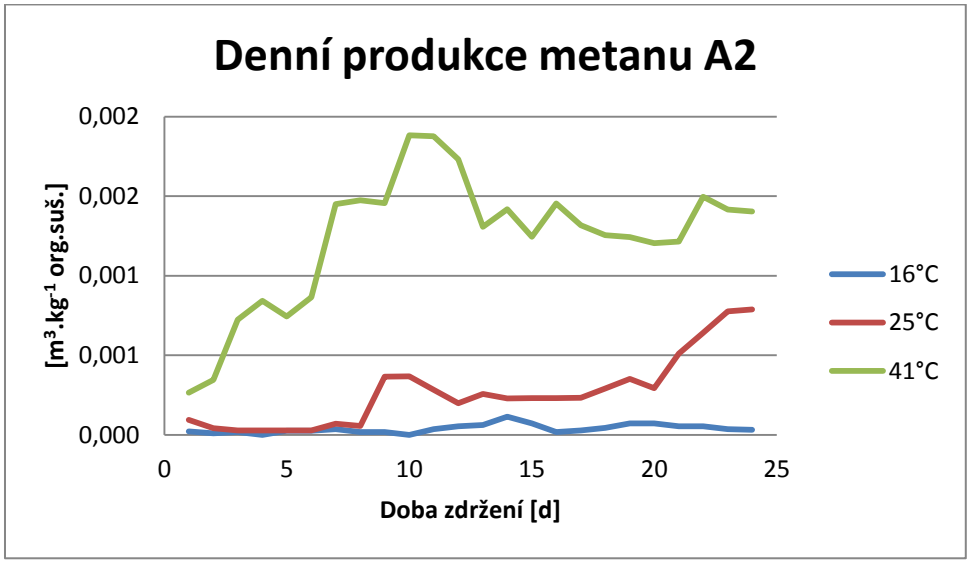
Měrná produkce metanu udává, kolik metrů krychlových metanu je za celkovou dobu testu tedy 24 dní vyprodukováno z jednoho kilogramu organické sušiny fermentačního zbytku. Z grafu je patrné, že byl velmi významný rozdíl mezi fermentory s různou teplotou testování.



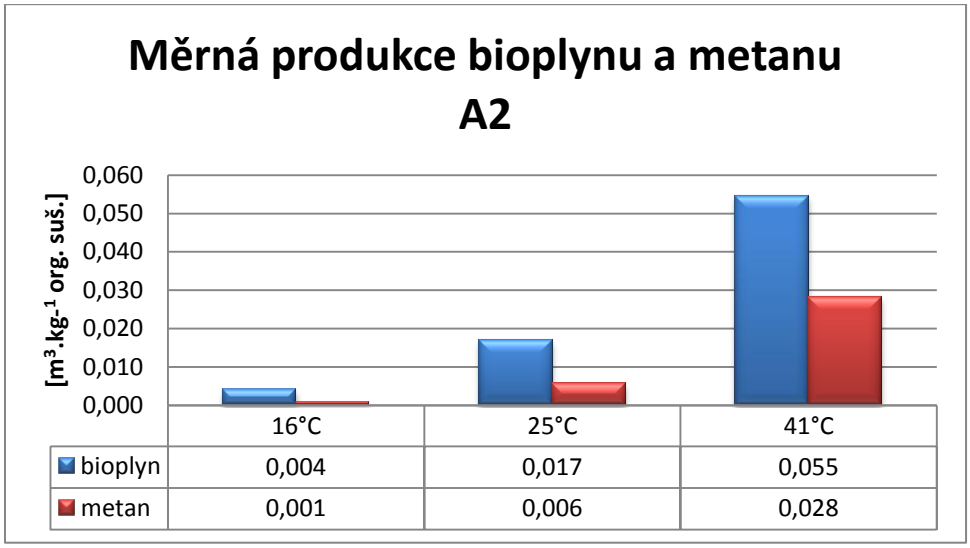
Obr. č. 10 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A1

Protože u všech uskladňovacích nádrží je známým parametrem jejich objem, byl proveden přepočet měrné produkce metanu také na jednotku objemu fermentačního zbytku. Toto měrné vyjádření má sloužit pro snadnější odhad produkce metanu v závislosti na množství denně odváděného fermentačního zbytku v souvislosti s dobou zdržení v uskladňovací jímce.

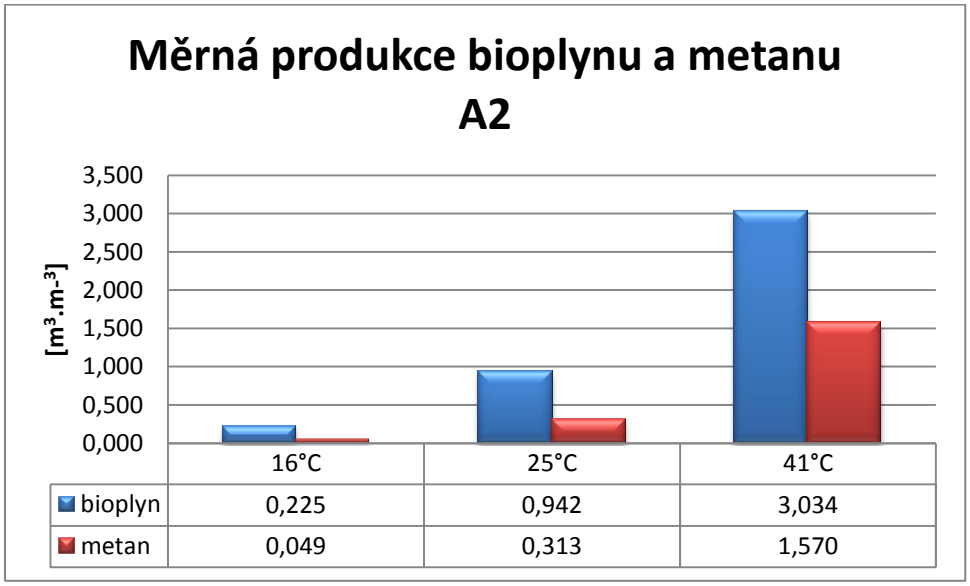
Materiál testovaný pod označením A2 je fermentační zbytek odebraný ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávají převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Jedná se o systém dvoustupňové fermentace s dobou zdržení 60 dní.



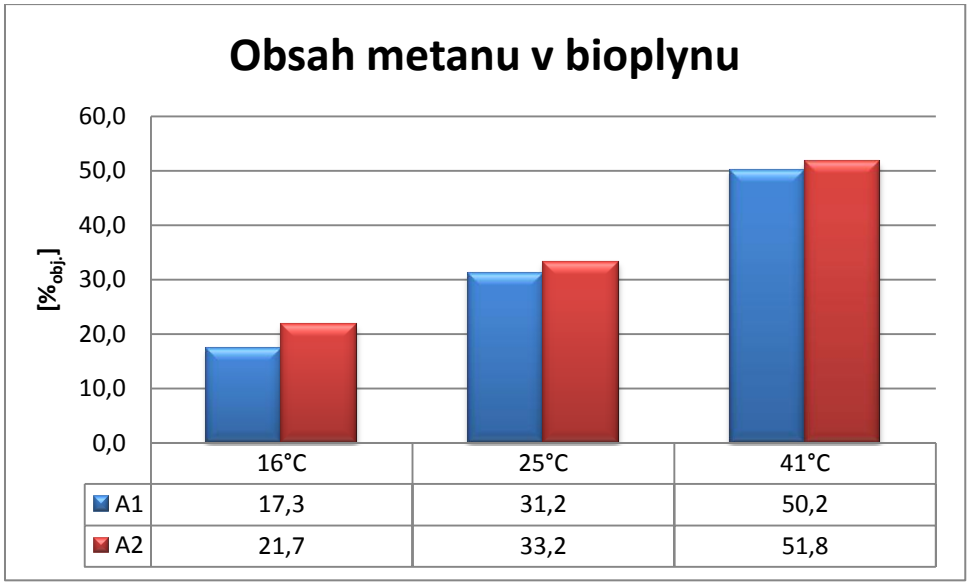
Obr. č. 11 Denní produkce metanu vzorek A2



Obr. č. 12 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A2



Obr. č. 13 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek A2



Obr. č. 14 Obsah metanu v bioplynu vzorek A1 a A2

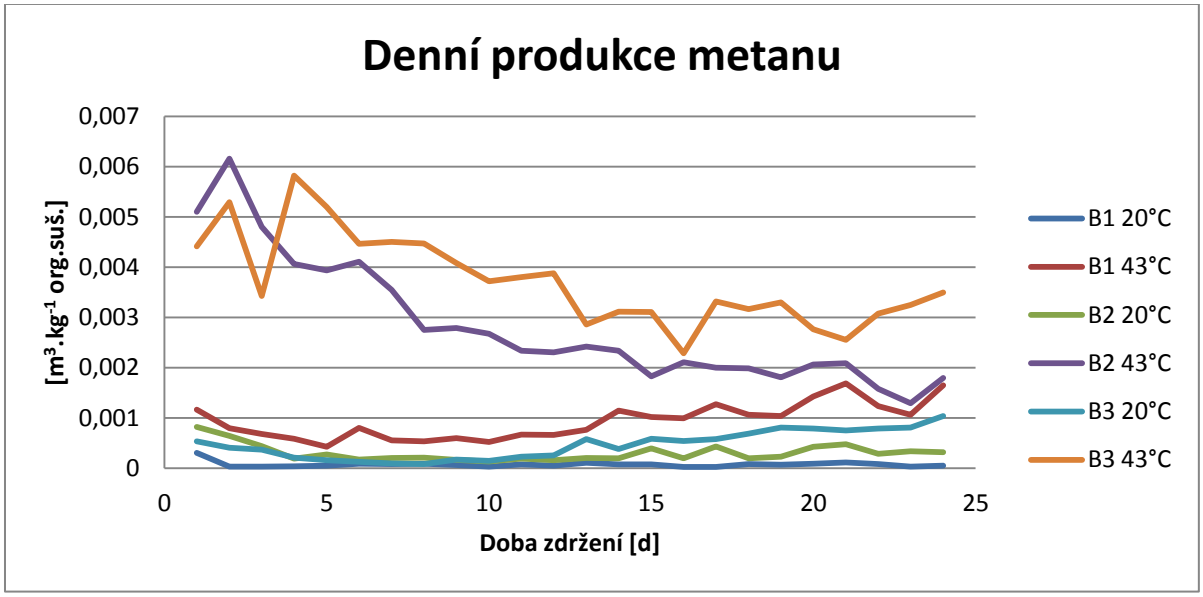
Důležitým ukazatelem kvality bioplynu je množství metanu který obsahuje. Ve většině zařízení je bioplyn spalován v zařízení na kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Aby byl zaručen plynulý chod těchto spalovacích motorů, je nutný obsah metanu vyšší než 45 %. Této hodnoty bylo u obou testovaných materiálů dosaženo pouze při teplotě procesu 41°C. Při nižších teplotách je patrný velmi prudký pokles obsahu metanu až za hodnoty, kdy je samostatně spalitelný. Nicméně i v těchto případech by mohl být spoluspalován ve směsi s kvalitnějším bioplynem vznikajícím ve fermentorech bioplynové stanice.

3.1.4.2 Výsledky testu 2

Materiál testovaný pod označením B1 je fermentační zbytek odebraný ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávající převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. V menší míře jsou zde využívány zemědělské odpady. Jedná se o systém dvoustupňové fermentace s dofermentorem. Celková doba zdržení je na této bioplynové stanici 71 dní.

Materiál testovaný pod označením B2 je fermentační zbytek odebraný ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávající výhradně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Jedná se o systém jednostupňové fermentace s dobou zdržení 34 dní. Siláž je před vstupem do bioplynové stanice upravena na menší velikost částic.

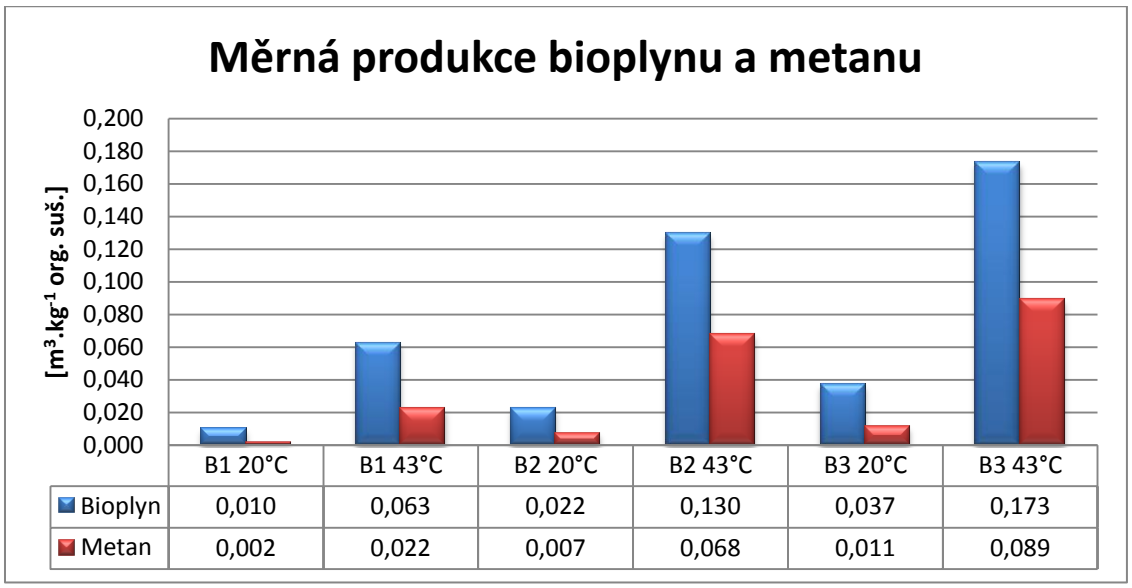
Materiál testovaný pod označením B3 je fermentační zbytek odebraný ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávají převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Významným vstupem je také GPS. Jedná se o systém dvoustupňové fermentace s dobou zdržení 50 dní.



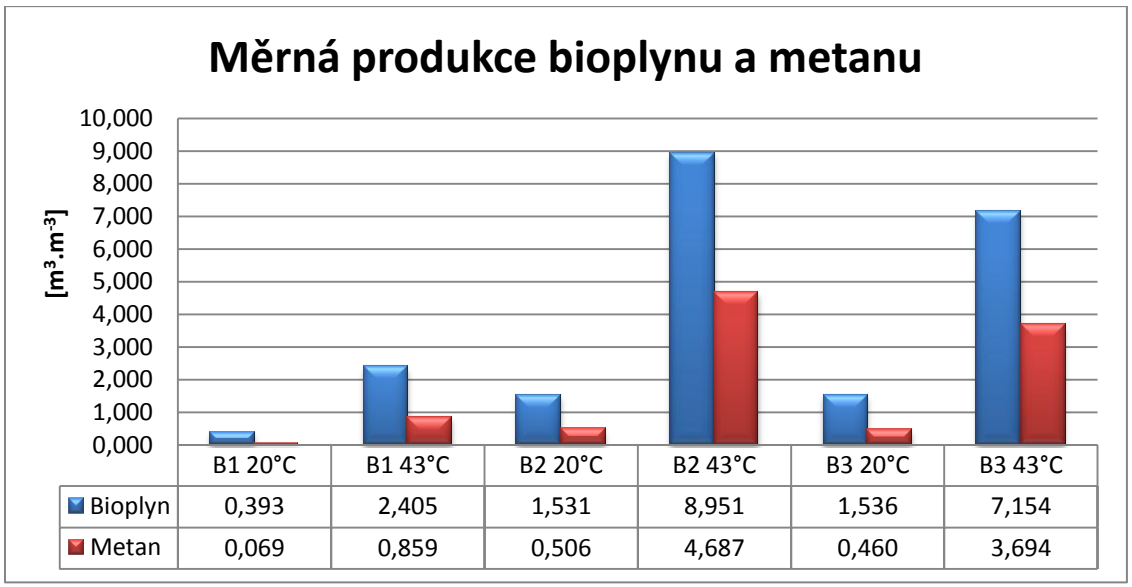
Obr. č. 15 Denní produkce metanu vzorek B1, B2 a B3

Při vyhodnocení tohoto testu je patrná rozdílná dynamika procesu tvorby metanu oproti předchozímu testu. Jedná se o vzorky B2 a B3 testované při teplotě 43°C. U těchto vzorků nedocházelo k postupnému nárůstu produkce metanu, ale naopak největších produkcí bylo dosaženo ihned po zahájení testu. Tento jev odráží skutečnost, že vzorky B2 a B3 obsahovaly

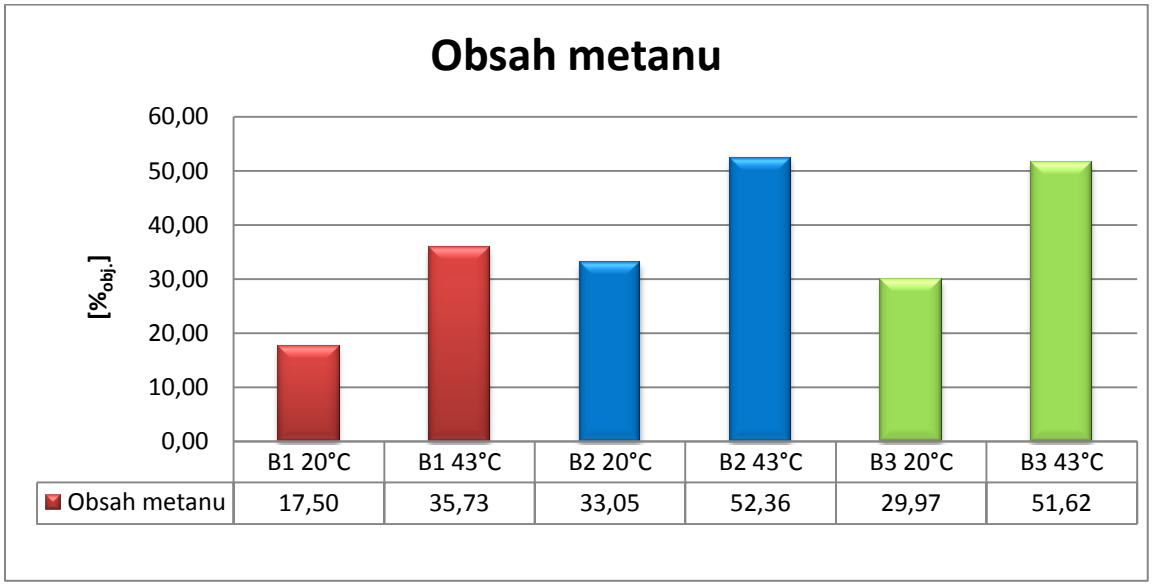
největší množství spalitelných látek a s tím související množství rozložitelné sušiny. Oba vzorky pocházely z bioplynových stanic s kratší dobou zdržení 34 a 50 dní.



Obr. č. 16 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek B1, B2 a B3



Obr. č. 17 Měrná produkce bioplynu a metanu vzorek B1, B2 a B3



Obr. č. 18 Obsah metanu v bioplynu B1, B2 a B3

Z grafu obsahu metanu je patrné, že samostatně spalitelný bioplyn bude pouze u reaktorů se vzorky B2 a B3, které byly provozovány při teplotě 43°C.

4 Závěr

Fermentační zbytek patří společně s bioplynem k hlavním výstupům z bioplynové stanice. V současné době je nejčastěji využíván jako hnojivo. Toto využití má však svá omezení a to zejména s ohledem na agrotechnickou a legislativní možnost aplikace hnojiva na půdu. Z těchto důvodů dochází k jeho dlouhodobému skladování v nádržích.

Při odčerpání materiálu z fermentoru bioplynové stanice do uskladňovací nádrže nedochází k zastavení probíhajících procesů a přes volnou hladinu jsou tak do atmosféry dále uvolňovány emise metanu a amoniaku. Snižování těchto emisí je možné provést zastřešením skladovací jímky. Aby mohlo být toto opatření hodnoceno nejen z hlediska environmentálního přínosu ale taká z pohledu ekonomiky provozu, byly provedeny testy zbytkové produkce bioplynu a metanu.

Testy anaerobní fermentace byly provedeny v Republikové referenční laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně. Testováno bylo pět vzorků fermentačních zbytků odebraných z různých technologií tekuté fermentace zemědělských materiálů. Vzorky byly testovány při různých teplotách, protože teplota má na proces

fermentace významný vliv a uskladňovací nádrže nejsou zpravidla vybaveny systémem pro ohřev materiálu.

Z výsledků provedených testů je patrné, že při teplotách menších než 40°C bylo dosaženo velmi nízkých hodnot produkce bioplynu, který také obsahoval menší podíl metanu. Fermentační zbytek obsahuje mezofilní kultury mikroorganismů, které jsou přizpůsobeny teplotě ve fermentoru. Při snížení teploty je jejich činnost významně snížena. Při teplotách okolo 20°C se podílí na produkci metanu převážně psychrofilní mikroorganismy jejichž metabolismus je výrazně pomalejší.

Z toho důvodu jsou v následující tabulce shrnuty pouze výsledky testů při vyšších teplotách, kde bylo dosaženo vyšší produkce bioplynu a díky vysoké koncentraci metanu také přímo spalitelného.

Tabulka 6 Souhrnné výsledky testování při teplotě 41 a 43°C

	Doba zdržení	Obsah sušiny	Obsah spalitelných látek	Měrná produkce metanu		Obsah zbytkového metanu *
	[d]	[%]	[%]	[$m^3.kg^{-1}$]	[$m^3.m^{-3}$]	[%]
A1	51	7,66	75,69	0,032	2,064	8,2
A2	60	6,69	75,50	0,028	1,570	7,1
B1	70	5,01	69,69	0,022	0,859	5,6
B2	34	7,86	79,86	0,068	4,687	17,4
B3	50	4,86	77,33	0,089	3,694	22,8

* obsah zbytkového metanu je vztažen na měrnou produkci metanu kukuřičné siláže, která byla na základě měření zvolena 0,390 $m^3.kg^{-1}$ organické sušiny

Měrná produkce metanu z fermentačního zbytku je vyjádřením nevyužitého potenciálu vstupních materiálů. Jak je patrné z tabulky 6, v případě vzorku B3 fermentační zbytek ještě obsahoval téměř jednu čtvrtinu využitelné energie. Dále je z této tabulky patrné, že množství zbytkového metanu je nepřímo úměrně závislé na době zdržení. Výjimkou je vzorek z bioplynové stanice označené B3, která kromě kukuřičné siláže zpracovává ve větším množství také GPS, kde je nutná delší doba zdržení.

Literární zdroje

Balsari, P., Dinuccio, E., Gioelli, F., 2006. *A low cost solution for ammonia emission abatement from slurry storage*. In: Soliva, C.R. et al. (Eds.), Greenhouse Gases and Animal Agriculture. Elsevier Science B.V, Amsterdam, pp. 323–326.

Brožek, J., 2011: *Využití reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy pro výrobu metanu ze substrátu pro BPS Chotýčany, zpracovaném technologií IFBB (Integrated Generation of Solid Fuel and Biogas from Biomass).* Diplomová práce, JČU, České Budějovice, 57 s.

Černý, M. Holba, M., Došek, M.: *Technologie vs. fermentační zbytek*. In *TVI* . Hustpoeče: CEMC, 2015, ISBN 978-80-85990-26-3.

Dostál, J., Richter, R. 2008: *Porovnání kvality kejdy s digestátem z bioplynových stanic a jejich využití ke hnojení zemědělských plodin*. In: Kukuřice v praxi. MENDELU v Brně. ISBN 978-80-7375-135-7.

Frischmann P., 2012, *Enhancement and treatment of digestates from anaerobic digestion*, Desk top study on digestate enhancement and treatment.

Gioelli, F., Dinuccio, E., Balsari, P., 2011. *Residual biogas potential from the storage tanks of non-separated digestate and digested liquid fraction*. Bioresour. Technol. 102, 10248–10251.

Gioelli, F., Dinuccio, E., Balsari, P., 2009. *Ammonia emissions from the storage of anaerobic digested slurry*. In: Grignani, C. et al. (Eds.), Proceeding of the 16th Nitrogen Workshop: Connecting Different Scales of Nitrogen in Agriculture, Turin, Italy, June 28–July 1, 2009, pp. 159–160.

Goebes, M.D., Strader, R., Davidson, C., 2003. *An ammonia emission inventory for fertilizer application in the United States*. Atmos. Environ. 37, 2539– 2550.

Kolář L., Kužel V.: *Využití odpadů z bioplynových stanic*. Racionální použití hnojiv - sborník z konference, ISBN 978-80-213-2006-2, 2009

Kottner M., *Treatment of Digestate, Biogas Regions*: Train the Trainers Seminar, Wolpertshausen, Germany, 28-29 November 2007. EurObserv'ER, 2010. The State of Renewable Energies in Europe. 10th EurObserv'ER Report. Available online at <http://www.eurobserv-er.org/pdf/barobilan10. pdf>.

Koutný, R., 2010: *Termické využití separátu po anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných odpadů*. Biom.cz. Databáze online [cit. 2015-11-01]. Dostupné na: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/termicke-vyuziti-separatu-po-anaerobni-fermentaci-biologicky-rozlozitelnych-odpadu

Kužel, S., 2010: *Jak efektivně využít digestát?*. Energie 21., Databáze online [cit. 2015-11-07]. Dostupné z: http://www.energie21.cz/archiv-novinek/Jak-efektivne-vyuzit-digestat__s303x46878.html

Lošák , T., Hlušek, J., 2011: *Jak přistupovat k výživě a hnojení kukuřice při snižujících se zásobách živin v půdě?* In: Kukuřice v praxi 2011.MENDELU, Brno. ISBN 978-80-7375-477-8.

Marcato C. E., Pinelli E., Pouech P., Winterton P., Guiresse M., 2008, *Perticle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry*., Bioresource Technology

Pfundtner E., 2002, *Limits and merit sof sludge utilisation – Land application. Conference Proceedings of Impacts of Waste Management*, Legislation on Biogas Technology.

Regione Piemonte, 2007. Regolamento 10/R *Disciplina generale dell'utilizzazioneagronomica degli effluenti zootecnici e delle acque reflue e programma di azione per le zone vulnerabili da nitrati di origine agricola* (Legge regionale 61/ 00).

Menardo, S., Gioelli, F., Balsari, P., 2011. *The methane yield of digestate: effect of organic loading rate, hydraulic retention time, and plant feeding*. Bioresour. Technol. 102, 2348–2351.

Sevar, 2012, The SEVAR Belt Dryer.

Siemens, 2011, Convective Thermal Dryer Sub-Systems

Stinner W., Müller K., Leithold G., 2008, *Effect of biogas digestion of Dover/grass-leys, cover crops and crop residues on nitrogen cycle and crop yield in organic stockless fading system*, European Journal of Agronomy, ISSN 1161-0301.

Tambone F., Genevini P., D'Imporzano G., Adani F., 2009, *Assenssing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree ofbiological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW*, Bioresource Technology, ISSN 0045-6535

VanderZaag, A.C., Gordon, R.J., Glass, V.M., Jamieson, R.C., 2008. *Floating covers to reduce gas emissions from liquid manure storages: a review*. Appl. Eng. Agric. 24, 657–671.

Váňa, J., 2007: *Využití digestátu jako organického hnojiva*. Databáze online [cit. 2015-11-07]. Dostupné na: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-organickeho-hnojiva>. ISSN: 1801-2655