

**Mendelova univerzita v Brně**  
**Agromická fakulta**  
**Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky**

---



**Testování zbytkové produkce bioplynu z fermentačních zbytků**  
Diplomová práce

*Vedoucí práce:*  
Ing. Tomáš Koutný

*Vypracoval:*  
Bc. Kamil Havelka

---

Brno 2016

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Testování zbytkové produkce bioplynu z fermentačních zbytků vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:.....

.....

podpis

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Zpracovatel : **Bc. Kamil Havelka**  
Studijní program: Technologie odpadů  
Obor: Technologie a management odpadů  
Konzultant: Ing. Martin Šotnar  
Název tématu: **Testování zbytkové produkce bioplynu z fermentačních zbytků**  
Rozsah práce: 60 – 80 stran

### Zásady pro vypracování:

1. V rešeršní části diplomové práce vypracujte stručný přehled o současném stavu problematiky výroby bioplynu se zaměřením na různé technologie.
2. Proveďte analýzu složení fermentačních zbytků pocházejících z různých bioplynových stanic.
3. Vytvořte metodiku pro testování zbytkové produkce bioplynu, zejména s ohledem na zjištění vlivu teploty na proces.
4. Proveďte testy anaerobní fermentace a z naměřených hodnot vyhodnoťte množství produkovaného bioplynu v závislosti na skladbě fermentačního zbytku a procesní teplotě.
5. Z provedeného šetření vyvoďte závěry týkající se možnosti aplikace výsledků v praxi.

Seznam odborné literatury:

1. STEINHAUSER, A. – DEUBLEIN, D. *Biogas from waste and renewable resources*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 443 s. ISBN 978-3-527-31841-4.
2. ZÁBRANSKÁ, J. – DOHÁNYOS, M. *Anaerobní technologie v ochraně životního prostředí*. Praha: PHARE, 1996. 172 s. ISBN 80-85368-90-0.
3. KOUŘA, J. a kol. *Bioplynové stanice s mokrým procesem*. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2008. 119 s. ISBN 978-80-87093-33-7.
4. STRAKA, F. – DOHÁNYOS, M. *Bioplyn : [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]*. Praha: GAS, 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
5. SCHULZ, H. – EDER, B. *Bioplyn v praxi*. Ostrava: Ostrava: BEN, 2004. ISBN 80-86167-21-6.
6. MURTINGER, K. – BERANOVSKÝ, J. *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2011. 106 s. ISBN 978-80-251-2916-6.

Datum zadání diplomové práce: říjen 2014  
Termín odevzdání diplomové práce: duben 2016

L. S.

  
**Bc. Kamil Havelka**  
Autor práce

  
**prof. Ing. Jan Mareček, DrSc., dr. h. c.**  
Vedoucí ústavu



  
**Ing. Tomáš Koutný**  
Vedoucí práce

  
**doc. Ing. Pavel Ryant, Ph.D.**  
Děkan AF MENDELU

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji Ing. Tomáši Koutnému a Ing. Martinu Šotnarovi za cenné rady a připomínky, které mi při zpracování mé diplomové práce poskytli.

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá testováním zbytkové produkce bioplynu z fermentačních zbytků. Práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a praktickou. Teoretická část práce se sestává z několika kapitol, zabývajících se problematikou tvorby bioplynu, rozdělením fermentačního zbytku podle výstupu z bioplynové stanice, nakládáním s fermentačním zbytkem aj. Praktická část vychází z části teoretické. Sestává se z laboratorního měření produkce bioplynu a interpretace výsledků.

Klíčová slova: bioplyn, metan, fermentační zbytek, anaerobní fermentace, fermentor

This diploma thesis is focused on testing residual biogas production from fermentation residues. This thesis is divided into two parts – theoretical and practical. Theoretical part is divided into few chapters. At first I will explain basic concepts such as principle of the generation of biogas, the formation of biogas fermentation residue by dividing the output of biogas plants, waste fermentation residue etc. The practical part is based on theoretical knowledge. Practical part contains actual testing of residual biogas production from fermentation residues and results of this testing.

Keywords: biogas, methane fermentation residue anaerobic fermentation, fermentor

# **OBSAH**

<b>ABSTRAKT</b> .....	6
<b>OBSAH</b> .....	7
<b>1 ÚVOD</b> .....	9
<b>2 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ</b> .....	11
<b>2.1 Bioplyn</b> .....	11
2.1.1 Chemické složení bioplynu .....	11
2.1.2 Produkce bioplynu .....	12
2.1.3 Nakládání s bioplynem a jeho využití .....	13
<b>2.2 Princip tvorby bioplynu</b> .....	15
<b>2.3 Problematika výroby bioplynu</b> .....	17
2.3.1 Prvky ovlivňující stabilitu procesu anaerobní fermentace .....	17
2.3.2 Vliv technologického zařízení na výrobu bioplynu .....	24
<b>2.4 TECHNOLOGIE VÝROBY BIOPLYNU</b> .....	27
2.4.1 Rozdělení bioplynových stanic .....	27
<b>2.5 FERMENTAČNÍ ZBYTEK</b> .....	28
2.5.1 Složení fermentačního zbytku .....	28
2.5.2 Rozdělení fermentačních zbytků.....	29
2.5.3 Možnosti nakládání s fermentačním zbytkem.....	34
<b>3 CÍL PRÁCE</b> .....	42
<b>4 METODIKA</b> .....	43
<b>4.1 Popis reaktorů pro testování produkce bioplynu z fermentačních zbytků</b> .....	43
<b>4.2 Použité technické vybavení</b> .....	44
<b>4.3 Analýza fermentačních zbytků</b> .....	45
4.3.1 Stanovení sušiny.....	45
4.3.2 Obsah spalitelných látek .....	46
4.3.3 Stanovení celkového organického uhlíku .....	47
4.3.4 Kalorimetrie .....	47
<b>4.4 Metodika testů</b> .....	48
<b>4.5 Přesnost měření</b> .....	49

<b>5 VÝSLEDKY A DISKUZE</b> .....	51
<b>5.1 Výsledky vzorku č. 1</b> .....	51
<b>5.2 Výsledky vzorku č. 2</b> .....	55
<b>5.3 Výsledky vzorku č. 3</b> .....	58
<b>5.4 Souhrnné porovnání</b> .....	61
<b>6 ZÁVĚR</b> .....	65
<b>LITERATURA</b> .....	67
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	71
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	72



## 1 ÚVOD

Počet bioplynových stanic v České republice, tak i v zahraničí v minulých letech výrazně vzrostl. Evropská bioplynová asociace odhaduje, že růst počtu bioplynových stanic bude pokračovat, protože je potřeba v dnešní době šetřit zdroje (suroviny, energii) a omezovat znečištění. Technologie bioplynových stanic přináší ekologické zpracování zbytkové produkce biomasy bez snížené hnojivé hodnoty zbytku. Celý proces je soubor na sebe navazujících procesů, které rozkládají organickou hmotu pomocí mikroorganismů za nepřítomnosti kyslíku.

Bioplynové stanice nabízejí možnost vytvářet alternativní palivo z obnovitelných zdrojů, tak i odpadů. Kvalita produkce bioplynu závisí na mnoha faktorech, především na vstupním materiálu a procesu fermentace v bioplynové stanici. Bioplyn se nejčastěji využívá k výrobě tepla spalováním v kotlích nebo spalováním v kogeneračních jednotkách za účelem zisku tepla a elektrické energie.

Ovšem myslet si, že když zvolíme velmi vhodné vstupní materiály, tak budeme pouze produkovat velké množství využitelného bioplynu, je mylné. Již při návrhu bioplynové stanice by měl být vypracován plán pro využití fermentačního zbytku, který nám rovněž vzniká v bioplynové stanici. Měly by se brát v úvahu i situace, kdy fermentační zbytek musí být i nějakou dobu skladován, než dojde k jeho využití.

Složení fermentačního zbytku rovněž závisí na mnoha faktorech. Fermentační zbytek může obsahovat velké množství nežádoucích látek, které nám legislativní rámec nepovolí aplikovat na zemědělskou půdu. Fermentační zbytek musí splňovat hygienické podmínky dané zákonem. Provozovatel by měl mít pro tyto neočekávané situace náhradní plán, jak bude zacházet s tímto fermentačním zbytkem. Provozovatel nesmí opomenout, že během skladování stále probíhá mikrobiální aktivita a spolu s dalšími vnějšími vlivy dochází k určité další změně tohoto zbytku.

Z ekonomického hlediska je výroba bioplynu závislá na vysokých bioplynových výnosech. Energetické plodiny pro bioplynové stanice by měly být pěstovány z udržitelného střídání plodin pro udržení úrodnosti půd. Mezi nejčastěji používané suroviny patří prasečí kejda a kukuřičná siláž.

V současnosti se fermentační zbytek nejvíce využívá jako hnojivo na zemědělskou půdu. Při vzrůstu počtu bioplynových stanic však nelze veškerý fermentační zbytek využít a vztahuje se na něj legislativní omezení, které umožňuje jeho využití jako hnojivo, aplikovatelné na půdu. Proto je tu otázka, jak se s tímto problémem vypořádat, aby celý systém byl stále obstojný z ekonomického hlediska.

## **2 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ**

### **2.1 Bioplyn**

Bioplyn je kvalitní obnovitelný zdroj energie, který má velký rozsah využití. Vzniká z biologicky rozložitelných materiálů. Bioplyn je rovněž považován za vhodnou alternativu k fosilním palivům. Bioplyn je bezbarvý, hořlavý plyn. (Vítěz et al., 2013)

Pojem bioplyn lze užít pro všechny plynné směsi vznikající činností mikroorganismů. Všechny typy plynů pocházející z anaerobních procesů vznikají stejně. V technické praxi je používán pojem bioplyn pro plynné směsi vzniklé anaerobní fermentací organických látek v umělých technických zařízeních. (Kára et al., 2007)

Primárním výstupem bioplynových stanic je bioplyn, za sekundární výstup je považován fermentační zbytek. Bioplyn můžeme definovat jako plyn, který vzniká v anaerobním prostředí rozkladem organických látek (živočišného, rostlinného nebo průmyslového původu) mikroorganismy. Je nutné odlišovat obdobné plyny, které jsou svých chemickým složením velmi podobné a vznikají rovněž v anaerobních procesech, např. skládkový plyn, který může obsahovat široké spektrum škodlivých a jedovatých plynů. „Ideální“ bioplyn je plynná směs metanu a oxidu uhličitého s převahou metanu. (Straka et al., 2008)

#### **2.1.1 Chemické složení bioplynu**

Bioplyn se skládá z více plynů. Rozlišujeme majoritní a minoritní složky bioplynu. K majoritním složkám patří metan a oxid uhličitý. Minoritní složky v bioplynu závisí na druhu zpracovávané suroviny. Obsah minoritních složek je o více jak jeden řád nižší. Minoritní složky v bioplynu jsou zastoupeny v úrovni desetin procenta. Ve výjimečných situacích se může minoritní složka v bioplynu stát majoritní např. síra v podobě sirovodíku. Chemické složení minoritních složek v bioplynu je velmi pestré. (Straka et al., 2010)

Vstupní suroviny pro bioplynovou stanici pocházející z odpadů z domácnosti a průmyslu a můžou obsahovat látky, které negativně ovlivňují koncentraci směsí plynů v bioplynu a tím i obsah metanu. Jedná se např. o antibiotika, dezinfekční prostředky, pesticidy, nátěrové hmoty a jiné. (Reinhart, 1993)

Hlavními složkami bioplynu jsou metan a oxid uhličitý. Bioplyn může obsahovat v závislosti na vstupní surovině stopy, nebo významné množství nežádoucích znečišťujících látek, jakými jsou např. sirovodík, amoniak a siloxany, jejichž přítomnost může způsobit korozi, erozi a zanášení tepelného nebo termo katalytického zařízení a může vytvářet nebezpečné emise. Proto je kvalita bioplynu (čistota a složení) velmi důležitá. Čištění bioplynu představuje u některého zařízení konečný krok z celkového výrobního procesu z hlediska jeho konečného použití. Při čištění bioplynu jsou prováděny procesy fyzikálně-chemické (tj. chemické absorpce ve vodných roztocích a adsorpce na pevných adsorbentech, katalytická oxidace na aktivních karbonech a čištění pomocí rozpouštědel nebo jinými kapalnými fázemi) nebo biologické. Biologické procesy čištění bioplynu jsou široce používány pro odstraňování sirovodíku ( $H_2S$ ) z bioplynu a jsou považovány za ekonomické a ekologické. (Conerti et al., 2009)

*Tabulka 1 - Složení plynů (Rainhart, 1994)*

Sloučenina	Chemický vzorec	Koncentrace
Metan	$CH_4$	50 – 70 [%obj.]
Oxid uhličitý	$CO_2$	30 – 45 [%obj.]
Dusík	$N_2$	0 -5 [%obj.]
Kyslík	$O_2$	< 1 [%obj.]
Uhlovodíky	$C_nH_{2n+2}$	< 1 [%obj.]
Sirovodík	$H_2S$	0 – 0,5 [%obj.]
Amoniak	$NH_3$	0 – 0,05 [%obj.]
Vodní pára	$H_2O$	1 – 5 [%obj.]
Siloxany	$C_nH_{2n+1}SiO$	0 – 50 [ $mg \cdot m^{-3}$ ]

### 2.1.2 Produkce bioplynu

Množství a kvalita bioplynu závisí na složení vstupního materiálu a jeho následné biologické přeměně pomocí technologie bioplynové stanice. U vstupního materiálu záleží na obsahu proteinů, tuků, polysacharidů, monosacharidů a na poměru jednotlivých komponentů. U vstupních materiálů je tento obsah různorodý a obsahuje různé poměry těchto látek, což způsobuje odlišnou rozložitelnost a produkci bioplynu.

Kvalitu bioplynu určuje poměr metanu k oxidu uhličitému. Oxid uhličitý ředí bioplyn a je žádoucí získávat nejvyšší obsah metanu a co nejnižší obsah oxidu uhličitého. Proto je vhodné uvádět u výtěžku bioplynu obsah metanu. (Schulz et al., 2004)

Tabulka 2 - Výnos bioplynu a obsahu metanu (Schulz et al., 2004)

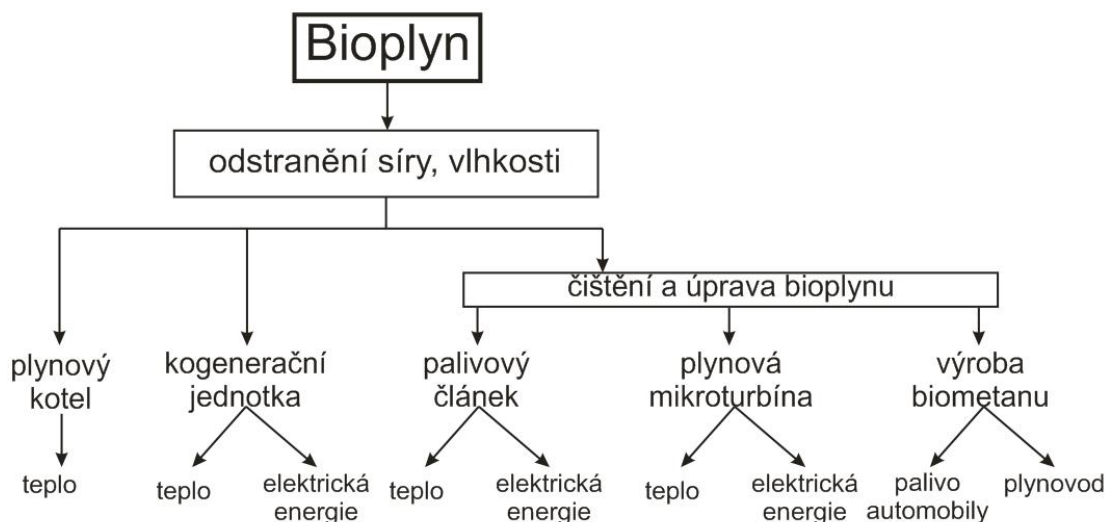
Látka	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ] Vztažená na kg organické sušiny	Složení metanu [%obj.]
Proteiny	0,700	71
Tuky	1,250	68
Uhlovodíky	0,790	50

Výtěžek prakticky dosažitelného metanu závisí na mnoha faktorech, jako je složení vstupní suroviny, její velikost, mikrobiální rozložitelnost, obsah sušiny a organické sušiny. Rovněž jsou důležité parametry technologie fermentace. Určitý vliv má počet reaktorů, teplota procesu, doba zdržení vstupního materiálu v reaktoru, míchání reaktoru, množství a frekvence přidávání materiálu. (Deublein et al., 2008)

### 2.1.3 Nakládání s bioplynem a jeho využití

Kvalita bioplynu je odvozena od energetického obsahu (výhřevnosti). Energetický obsah udává množství metanu a vodíku (spalitelných plynů). Bioplyn obsahuje další částice, jak bylo uvedeno v tabulce 1. Bioplyn lze čistit od nežádoucích příměsí, nejčastěji se provádí odsíření bioplynu a zbavení vlhkosti. (Murtinger et al., 2011)

Bioplyn mohou využít technologická zařízení, která využívají i jiná paliva, ale za předpokladu, že tato zařízení budou přizpůsobena k využití bioplynu, nebo bioplyn bude upraven a čištěn. Energeticky lze využít bioplyn přímým spalováním, kogenerací (výroba elektrické energie a ohřev teplotnosného média), trigenerací (výroba elektrické energie, ohřev teplotnosného média, absorpční chlazení), v palivových člancích, či využitím pro pohon spalovacích motorů nebo turbín. V České republice se nejčastěji setkáváme s využitím v kogeneračních jednotkách a spalování v kotlích. (Kára et al., 2007)



Obrázek 1 - Grafické znázornění množství využití bioplynu (Trávníček et al., 2015)

Spalování bioplynu v kotlích patří mezi nejjednodušší způsoby využití bioplynu. Spalování bioplynu může probíhat v místě vzniku bioplynu, nebo může být transportován pomocí potrubí ke koncovým spotřebitelům. (Trávníček et al., 2015)

Efektivní způsob využití bioplynu je využití k pohonu kogenerační jednotky se ziskem elektrické energie a tepla. (Kára et al., 2007)

Při využívání bioplynu v technologických zařízeních je důležité odstranit vodní páru, halogenové uhlovodíky a sirovodík. Nebezpečné jsou fluorované a chlorované uhlovodíky, protože mohou vznikat nedokonalým spalováním dioxiny a dibenzofurany. Sirovodík zapříčiňuje nebezpečí koroze materiálů následkem tvorby kyseliny sírové, která může kondenzovat ve spalovacích zařízeních. Proto je vhodné odstraňovat z bioplynu uvedené příměsi. Míra čištění bioplynu závisí na způsobu využívání. (Dohányos, 1998)

## 2.2 Princip tvorby bioplynu

Bioplyn vzniká při anaerobním rozkladu organické hmoty. Jedná se o čtyři na sebe navazující fáze přeměny organického materiálu, kde metan vzniká převážně v poslední fázi. Je to soubor mikrobiálních procesů, biologická sukcese, kdy skupina mikroorganismů využívá ve svém metabolismu produktů činnosti mikroorganismů předešlé fáze. (Tesařová et al., 2010) Jednotlivé fáze jsou prováděny různými skupinami mikroorganismů. (Deublein et al., 2008)

První fáze bývá označována jako hydrolýza, kde dochází k hydrolytickému štěpení vysokomolekulárních látek fakultativně anaerobními bakteriemi. Vysokomolekulární látky jsou polysacharidy, proteiny, tuky. Výsledkem štěpení jsou nízkomolekulární látky, jako jsou cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny apod.

Druhá fáze navazuje na produkty z první fáze a acidogenní bakterie využívají pro svůj vnitrobuněčný metabolismus nízkomolekulární látky a přeměňují je za anaerobních podmínek na nižší mastné kyseliny (např. kyselina octová, propionová, máselná, mléčná a jiné.), etanol, oxid uhličitý a vodík. Tato fáze je označována jako acidogeneze. (Tesařová et al., 2010)

V první a druhé fázi provádí přeměnu početné kultury čeledi *Streptococcaceae* a *Enterobacteriaceae* a rody *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium* a dalších. Jsou to převážně bakterie v produkční termofilní mezi a fakultativně anaerobní. (Straka et al., 2010)

Třetí fáze je označována jako acetogeneze. V této fázi anaerobní bakterie využívají produkty acidogeneze a přeměňují je na kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý.

Poslední fáze anaerobního rozkladu organické hmoty je metanogeneze. Striktně anaerobní metanogenní mikroorganismy mění kyselinu octovou na metan, oxid uhličitý a další plyny (např. dusík, vodík, sirovodík a jiné). (Tesařová et al., 2010) Přibližně 70 % vytvořeného metanu pochází z kyseliny octové, zbytek pochází z přeměny vodíku a oxidu uhličitého. Metanogeneze je nejkritičtější krokem v celém procesu anaerobní fermentace, protože má oproti předchozím částem nejpomalejší biochemickou reakci procesu. (Al Seadi et al., 2008)

Fáze anaerobního rozkladu probíhají různou kinetickou rychlostí. Poslední fáze metanogenní probíhá nejpomaleji, zhruba 5krát pomaleji než předchozí fáze, proto je důležitá optimální rovnováha. Z tohoto hlediska je nutné přizpůsobit konstrukci bioplynových technologických systémů a dávkování organické hmoty. (Kára et al., 2007) Mezi další prvky ovlivňující metanogenní proces patří složení vstupní suroviny, vstupní látkové zatížení, teplota, pH. Organické přetížení, teplotní změny nebo velké množství vstupujícího kyslíku může vést k ukončení produkce metanu. (Al Seadi et al., 2008)



## **2.3 Problematika výroby bioplynu**

Účinnost anaerobního rozkladu je ovlivněna některými kritickými parametry. Velmi důležité je, aby byly k dispozici vhodné podmínky pro anaerobní mikroorganismy. Růst a aktivita mikroorganismů je výrazně ovlivněna podmínkami, jakými jsou konstantní teplota, vyloučení kyslíku, hodnota pH, zásoby živin, míchání a stejně jako množství inhibitorů a dalších. (Al Seadi et al., 2008)

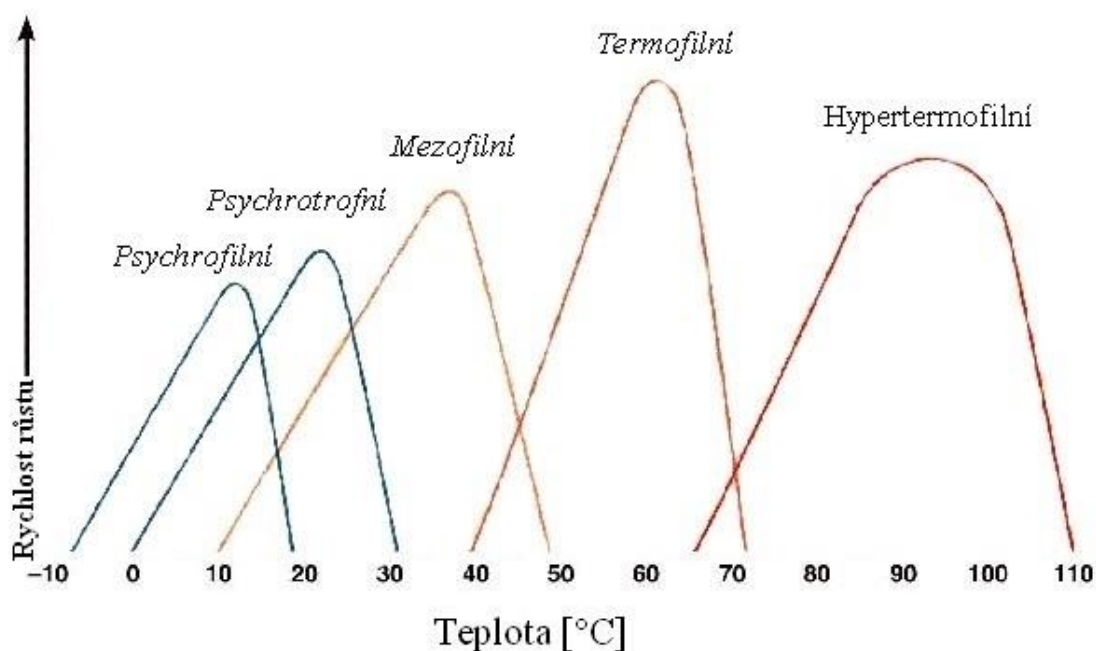
### **2.3.1 Prvky ovlivňující stabilitu procesu anaerobní fermentace**

Celkový výkon anaerobní fermentace závisí na více parametrech. Není to jenom složení vstupní suroviny, ale také provozní parametry např. teplota systému bioplynové stanice. (Chen et al., 2015)

#### ***2.3.1.1 Vliv teploty na tvorbu bioplynu***

Konvenční provozní teploty se pohybují od mezofilního až do termofilního prostředí. Bylo prokázáno, že teplota je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňující mikrobiální složení při anaerobní fermentaci. Za jistých podmínek jsou v určité míře zastoupeny druhy mikroorganismů o dané produkci bioplynu. Jestliže zvýšíme teplotu, tak se např. obsah jednoho druhu mikroorganismu může snížit, jiný druh se může zase více rozšířit, záleží na optimální teplotě prostředí pro daný druh mikroorganismu. (Chen et al, 2015)

Vzájemné působení mezi druhy mikroorganismů ovlivňuje teplota. Rychlost probíhajících mikrobiálních pochodů je závislá na teplotě. Změnou teploty dojde k narušení dynamické rovnováhy procesu a to může způsobit kolaps procesu ve fermentoru. Na obrázku č. 2 je znázorněna rychlost růstu mikroorganismů v závislosti na teplotě. (Dohányos, 2008)



Obrázek 2 - Vliv teploty na růst mikroorganismů

(Zdroj: <https://www.emlab.com/s/sampling/env-report-08-2007.html>)

Zařazení mikroorganismů do teplotních skupin není úplně přesné. Různí autoři používají odlišné rozpětí teplot pro dané teplotní skupiny, případně používají meziskupiny. (Mužik et al., 2009)

Produkce metanu probíhá od 5 °C až do 95 °C. Pro produkci metanu se používají anaerobní fermentory, ve kterých probíhá organický rozklad v mezofilním teplotním režimu (20 – 45 °C), nebo pak fermentory, kde probíhá organický rozklad v termofilním režimu (45 – 60 °C). Podmínkou stability procesu ve fermentoru je dosaženo zajištěním konstantní teploty. Na změnu teploty jsou náchylnější zatíženější procesy (např. kratší doba zdržení, menší koncentrace biomasy ve fermentoru). (Dohányos, 2008)

Vysoké účinky rozkladu zpracovaného substrátu a větší produkce bioplynu jsou dosaženy v termofilním režimu. Rovněž v termofilním režimu probíhá destrukce patogenů a je tedy dosaženo vysokého stupně hygienizace u zpracovaného substrátu i u fermentačního zbytku. Fermentory provozované v termofilním režimu mají vyšší nároky na ohřev a jejich tepelnou izolaci než reaktory provozované v mezofilním režimu. V termofilním reaktoru vzniká vyšší koncentrace těkavých alifatických karbonových

kyselin ve fermentačním zbytku, je zde i vyšší přenos volného amoniaku a sirovodíku do fermentačního zbytku. (Straka et al., 2010)

Termofilní meze poskytují mnoho výhod:

- Účinné zničení patogenů
- Vyšší růstová rychlost metanogenních bakterií při vyšších teplotách
- Snižují retenční čas, aby byl proces rychlejší a efektivnější
- Lepší stravitelnost a dostupnost pro mikroorganismy
- Lepší degradace pevných substrátů a jejich lepší využití

Ovšem proces v termofilním režimu má i negativa, která spočívají ve vyšších rizicích inhibice procesu amoniakem, větší míry nerovnováhy a vyšší nároky na energie. (Al Seadi et al., 2008)

### **2.3.1.2 Vliv pH**

Hodnota pH je míra zásaditosti/kyselosti směsi materiálu. Hodnota pH uvnitř reaktoru ovlivňuje disociaci některých látek důležitých pro proces anaerobní fermentace (amoniaku, sirovodíku, organických kyselin). Tvorba metanu probíhá v rozmezí pH o 5,5 do 8,5 s optimálním intervalem mezi 7,0 - 8,0 většiny metanogenních mikroorganismů. Acidogenní mikroorganismy mají obvykle nižší optimální hodnotu pH. Optimální interval pro mikroorganismy mezofilní meze se pohybuje mezi 6,5 až 8,0 a tento proces je značně potlačen v případě, že hodnota pH klesne pod 6,0 nebo stoupne nad 8,3. (Al Seadi et al., 2008)

Jestliže hodnota pH poklesne pod 6, tak působí prostředí inhibičně díky vyššímu obsahu neionizovaných mastných kyselin. Proces je rovněž inhibován díky vyšší koncentraci neionizovaného  $\text{NH}_3$  při hodnotách pH nad 8,3. (Dohányos et al., 1996)

Rozpustnost oxidu uhličitého ve vodě se snižuje při zvýšení teploty. Hodnota pH v termofilních fermentorech je proto vyšší než v mezofilních. Hodnota pH může být zvýšena amoniakem vznikajícím při degradaci bílkovin, nebo přítomností amoniaku ve vstupní surovině. Hromadění těkavých mastných kyselin snižuje hodnotu pH.

Hodnota pH v anaerobních reaktorech je řízena především hydrogenuhličitanovou vyrovnávací pamětí systému, proto hodnota pH uvnitř fermentorů závisí na parciálním tlaku oxidu uhličitého a na koncentraci alkalických a kyselých složek v kapalně fázi. Dojde-li k nahromadění bází nebo kyselin, tak vyrovnávací kapacita působí proti těmto změnám pH až do určité úrovně. Je-li překročena vyrovnávací kapacita systému, tak dochází k drastickým změnám v hodnotách pH, které zcela inhibují proces anaerobní fermentace. Z tohoto důvodu se nedoporučuje monitorovat pouze parametr pH.

Vyrovňovací kapacita anaerobní fermentace se může lišit. V Dánsku bylo prokázáno, že vyrovnávací kapacita statkových hnojiv se mění v závislosti na ročním období, což může být ovlivněno složením krmiva. Hodnota pH zvířecích zbytků je tedy proměnná a je obtížné hodnotu pH používat pro identifikaci procesní nerovnováhy, kde jsou malé změny hodnot. Hodnota pH může být rychlá, spolehlivá a relativně levná cesta k zjištění odchylky v slabě pufrovaných systémech jako je anaerobní fermentace odpadních vod. (Al Seadi et al., 2008)

### ***2.3.1.3 Vliv nutrietů***

Zpracování vstupního substrátu nejvíce závisí na obsahu uhlíku, dusíku a fosforu. Jejich optimální poměr by měl být 100:5:1 až 150:5:1. Jestliže v procesu nastanou menší poměry C:N, tak to zapříčiní zvýšenou produkci amoniaku, který může brzdit anaerobní proces. Větší poměr C:N podporuje imobilizaci dusíku a to zpomaluje v produktivitě metanogenní organismy. (Tesařová et al., 2010)

Uhlík, dusík a fosfor nejsou látky, na kterých jenom závisí rozklad substrátu. Dalšími důležitými látkami jsou mikronutrienty jako např.: sodík, draslík, kalcium, železo, síra, mangan a jiné, které ovlivňují proces rozkladu organické hmoty a tím i vznik bioplynu. (Dohányos, 2009)

### ***2.3.1.4 Vliv substrátových skupin na tvorbu bioplynu***

Rostlinná biomasa obsahuje jak biologicky rozložitelné sacharidy a polysacharidy, tak i látky, které mají nízkou až nulovou biologickou rozložitelnost. Mezi tyto látky patří ligniny, lignany a terpeny.

Lignin patří mezi aromatické prostorové heteropolymery fenolického typu. Jeho odolnost vůči biologickému rozkladu je způsobena fenolickou polymerní strukturou. Ligniny jsou považovány za prekurzory tvorby ligninu a spolu s terpeny se řadí mezi biologické látky, které jsou obtížně rozložitelné.

Lignin je obsažen v organické části každé rostlinné biomasy a materiálů pocházejících z rostlinné biomasy jako jsou různé druhy kejdy nebo hnoje a je rovněž obsažen v nerozložitelné frakci fermentačního zbytku po anaerobní fermentaci.

Mezi další látky, které ovlivňují proces tvorby bioplynu, patří celulóza, která je polymerem glukózy a je v biotechnologickém procesu málo rozložitelná. Pro její rozložitelnost je zapotřebí celulótických enzymů, které se vyskytují v zažívacím traktu přežvýkavců.

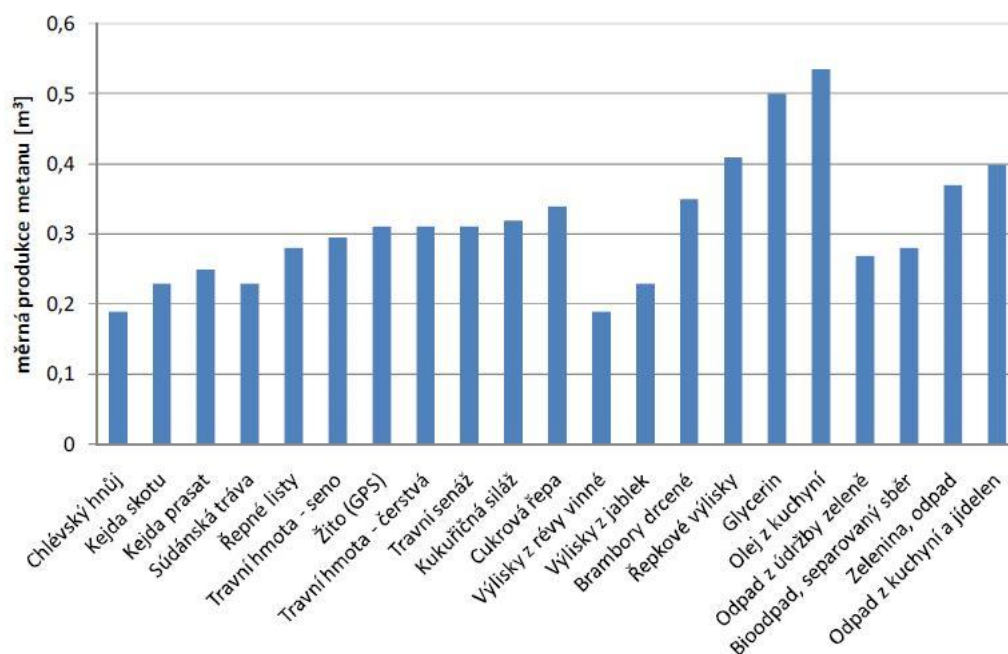
Na tvorbu bioplynu má vliv i obsah proteinu. Proteiny obsahují ve svých molekulách heteroatomy a mimo uhlík, kyslík a vodík obsahují síru a dusík. Dusík při anaerobní fermentaci přechází v amoniak, který může způsobovat inhibici tvorby metanu při vyšších koncentracích. (Dohányos, 2008)

#### ***2.3.1.5 Vliv biologické rozložitelnosti***

Reálná výtěžnost metanu je poměrně nižší než vypočtena teoretická výtěžnost metanu, protože část vstupní suroviny je za daných podmínek biologicky nerozložitelná. Skutečná výtěžnost metanu je dána druhem vstupní suroviny (chemické a fyzikální struktury), její biologickou rozložitelností a technologických podmínkách procesu. Výtěžnost nelze spočítat, musí se stanovit experimentálně.

Doba, za kterou bude rozložena surovina a míra biologického rozkladu, závisí také na přítomnosti vhodných druhů mikrobiálních společenstev a enzymových systémů.

Biologická rozložitelnost je dána chemickým složením suroviny, uhlohydrátů, lipidů, proteinů, obsahu celulózy, ligninu a poměru jednotlivých komponent. Různé druhy surovin mají různé chemické složení a tím je i rozdílná rozložitelnost a výtěžek bioplynu. (Dohányos, 2009)



Obrázek 3 - Výtěžky bioplynu z 1 kg různých materiálů (Preissler et al., 2008)

### 2.3.1.6 Vliv velikosti částic substrátu

Velikost částic substrátu je důležitá pro styk mikroorganismů se substrátem a jeho další zpracovatelností. Větší částice mají menší povrchovou plochu kontaktu s mikroorganismy v porovnání s jejich objemem než menší částice, které mohou být vystaveny výraznějšímu působení mikroorganismů. Menší částice vlivem výraznějšímu působení mikroorganismů urychlují celý proces organického rozkladu. Z tohoto je patrné, že úprava vstupní velikosti částic substrátu ovlivňuje produkci bioplynu, resp. metanu. (Vítěz et al., 2013)

### 2.3.1.7 Vliv inhibitorů

Některé látky mohou proces anaerobní fermentace zpomalit, nebo zastavit, obzvláště ve vyšších koncentracích. Mezi tyto látky patří např. organické kyseliny, antibiotika, chemoterapeutika, desinfekční prostředky. K inhibici substrátu ve fermentoru může dojít dávkováním exkrementů od zvířat, která byla ošetřována léčivem, nebo při desinfekci stáje.

Vliv léčení jednotlivých kusů zvířat nemá významný vliv na substrát ve fermentoru. (Schulz et al., 2004)

#### **2.3.1.8 Vliv mikroorganismů**

Mikroorganismy v anaerobním prostředí mají různě dlouhou generační dobu a jejich biomasa narůstá pomalu. Rychlost rozkladu substrátu je závislá na kvalitě aktivní kultury mikroorganismů a množství. Ke zvýšení produkce biomasy mikroorganismů může dojít výběrem lépe rozložitelnějšího substrátu (Dohányos, 2009)

#### **2.3.1.9 Vliv těžkých kovů**

Těžké kovy v nízké koncentraci jsou důležité jako stopové prvky v substrátu, avšak v nadlimitních mezích působí inhibičně až toxicky. Mezi kovy, které nejčastěji ovlivňují anaerobní proces a jsou nejvíce zastoupeny, patří měď a zinek. Tyto kovy se do substrátu dostávají ve zvířecích exkrementech. Zvířata kovy do sebe dostávají v různých krmivářských doplncích. Těžké kovy za určitých podmínek značně snižují tvorbu metanu. (Straka et al., 2010)

#### **2.3.1.10 Ostatní vlivy**

Metanogenní mikroorganismy pro svoji činnost vyžadují vlhké prostředí. Metanogenní bakterie nemohou žít v pevném substrátu. Jsou striktně anaerobní, což znamená, že žijí v prostředí, kde se nevyskytuje kyslík. Kyslík ze substrátu musí být spotřebován jinými mikroorganismy v hydrolytické fázi, pro umožnění činnosti metanogenních mikroorganismů.

Světlo v reaktoru anaerobní proces mikroorganismů zpomaluje. Dále při nedostatečném odplynění a neodvádění plynu z fermentoru může dojít k velkému vzestupu tlaku plynu, tím i k případným škodám. (Schulz et al., 2004)

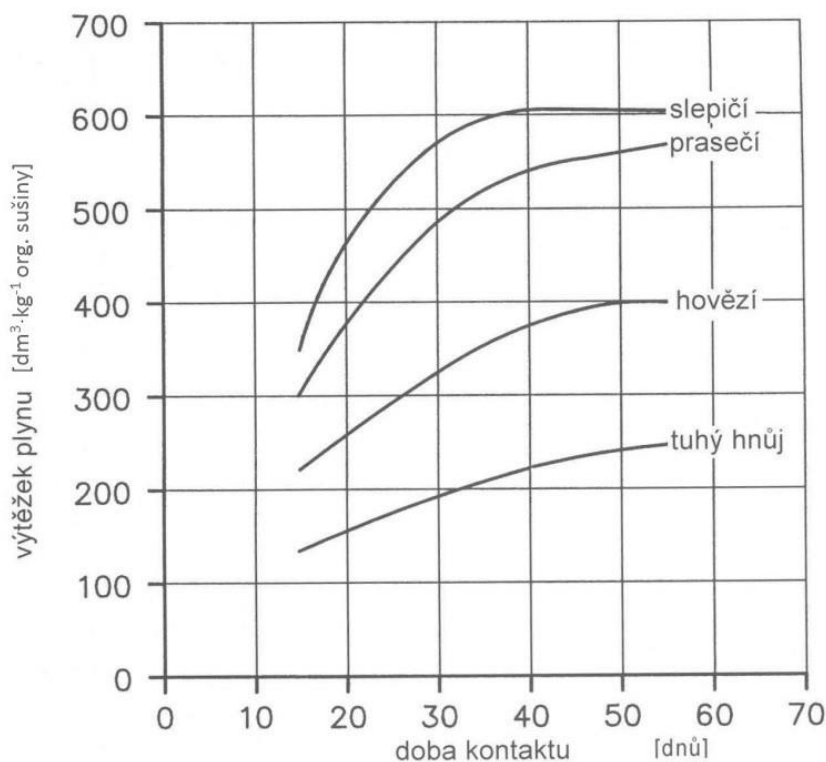
Skladování materiálu pro vstup do bioplynové stanice má rovněž vliv na tvorbu metanu. Při skladování jsou rovněž aktivní určité druhy mikroorganismů a tím mohou probíhat samovolné biologické procesy rozkladu. Může docházet k poklesu hodnot

chemické spotřeby kyslíku, organických látek a tím pádem i produkce metanu. (Dohányos, 2009)

## 2.3.2 Vliv technologického zařízení na výrobu bioplynu

### 2.3.2.1 Vliv doby zdržení

Doba zdržení materiálu ve fermentoru má velký vliv na organický rozklad a tvorbu bioplynu. V krátkých dobách zdržení dochází k vzniku velkého množství bioplynu v bioplynové stanici vlivem rozkladu snadno rozložitelných živin z materiálu. V krátkých dobách zdržení vzniká menší celkové množství bioplynu získaného z celkového materiálu a rovněž dochází k nízkému stupni rozkladu. Delší dobou zdržení materiálu za celý proces vznikne větší celkové množství bioplynu. (Schulz et al., 2004)



Obrázek 4 - Znárodnění výtěžku bioplynu v termofilním režimu v závislosti na vstupním materiálu (Schulz, et al., 2004)



Surovina v mezofilním teplotním režimu má delší dobu zdržení ve fermentoru než v termofilním teplotním režimu. Ke zkrácení doby zdržení ve fermentoru dochází za určitých podmínek pomocí míchání zpracovávané suroviny, zvýšením teploty procesu, snížením obsahu sušiny substrátu. (Vítěz et al., 2013)

Dobu zdržení je možno spočítat podle rovnice:

$$\tau = \frac{V}{Q} [s]$$

kde:

$\tau$  ... doba zdržení [s]

$V$  ... objem reaktoru [ $m^3$ ]

$Q$  ... průtok fermentorem [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ]

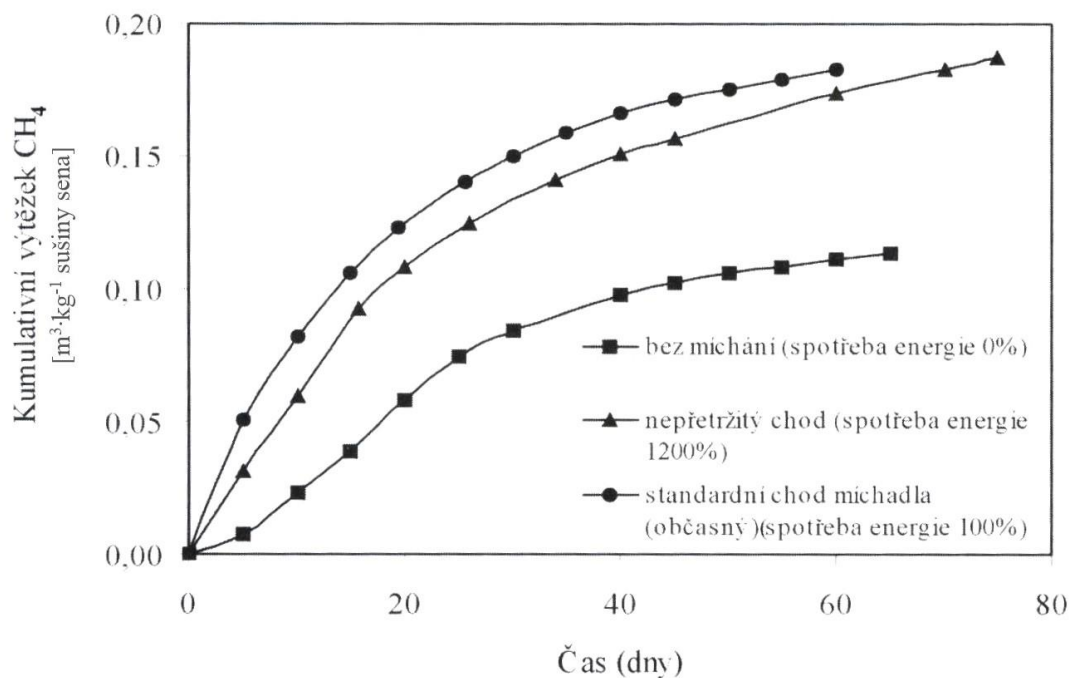
Doba zdržení ve fermentorech je snižována z ekonomických důvodů. Delší doby zdržení zneškodňují nositele zápachu. Doba zdržení závisí na teplotním režimu procesu (mezofilní, termofilní), druhu vstupních surovin, použité technologii a na dalším nakládání s fermentačním zbytkem. U rizikových substrátů by měla být vždy delší doba zdržení než u statkových hnojiv a pěstované biomasy. Doba zdržení musí zajistit dostatečné rozložení organické hmoty vstupních surovin, tak aby ve fermentačním zbytku byl minimalizován obsah biologicky rozložitelných látek. Tak bude fermentační zbytek stabilizován a i eliminováno riziko zápachu. (Metodický pokyn MŽP, 2014)

### **2.3.2.2 Vliv míchání**

Míchání substrátu ve fermentoru je nutné pro zdárný proces anaerobní fermentace. Mícháním substrátu se zabraňuje usazování hutných a neodtažitelných sedimentů na dně nádrže a omezuje se vzplývání lehkých částic a tvorbě plovoucího nebo pěnového koláče, což znesnadňuje odvod plynu z reaktorového prostoru. Rovněž se mícháním homogenně rozdělí teplota uvnitř reaktoru a hlavně homogenizací se podporuje výměnný transport hmot v buněčném komplexu mikroorganismů. (Straka et al., 2010)

Metanogenní mikroorganismy rostou v symbióze s acetogenními a hydrogenními mikroorganismy, které vyžadují kontakt mezi těmito druhy. Tento přímý kontakt

zabezpečuje míchání, které rovněž vytváří větší povrch pro efektivní rozklad organického materiálu pomocí hydrolytických a acidogenních mikroorganismů. (Trávníček et al., 2015)



Obrázek 5 - Porovnání výtěžku bioplynu při různém míchání (Straka et al., 2010)

## **2.4 TECHNOLOGIE VÝROBY BIOPLYNU**

Technologie bioplynových stanic se skládá z několika na sebe navazujících technologických částí, které tvoří celek. Výroba bioplynu je dána obecnými parametry, kterými jsou hmotnost vsázky, doba zdržení materiálu v reaktoru, vhodná teplota, hodnota pH a sušina směsi. (Koudřa, 2008)

### **2.4.1 Rozdělení bioplynových stanic**

Bioplyn může být tvořen v různých variantách anaerobní fermentace. Podle toho můžeme rozdělovat výrobu dle různých kritérií. Bioplynové stanice můžeme rozlišovat podle obsahu sušiny vstupujícího substrátu na bioplynové stanice tzv. tuhé s obsahem sušiny vyšším jak 13 % a na bioplynové stanice tzv. kapalné s obsahem sušiny do 13 %. Dále se bioplynové stanice rozdělují podle pracovního režimu teploty systému na mezofilní teplotní režim, které pracují v rozmezí teplot 25 – 45 °C, nebo termofilní teplotní režim, kde teploty se pohybují nad 45 °C. Možné je i rozdělení bioplynových stanic podle počtu fermentorů. Celý proces může být jednostupňový, proces vzniku bioplynu probíhá v jednom reaktoru, nebo tento proces může být vícestupňový, tedy vznik bioplynu je ve více jak v jednom reaktoru. (Metodický pokyn MŽP, 2014, Vítěz et al., 2013)

Rozdělení bioplynových stanic podle vstupujících surovin:

- Čistírenské bioplynové stanice
- Zemědělské bioplynové stanice
- Bioplynové stanice zpracovávající vedlejší živočišné produkty
- Ostatní bioplynové stanice

## **2.5 FERMENTAČNÍ ZBYTEK**

Anaerobní fermentace produkuje vedle bioplynu i fermentační zbytek. Fermentační zbytek pocházející ze zemědělských bioplynových stanic, pokud splňuje podmínky, je biologicky stabilní s vysokou hnojivou účinností. Zbytek může být použit jako alternativum k minerálním hnojivům. Při nesprávném technologickém postupu nebo použití nevhodného substrátu může dojít k nežádoucím vlastnostem fermentačního zbytku. Mezi tyto negativní vlastnosti patří např. zápach, ekologické následky při použití na zemědělské půdě nevhodně upraveného zbytku, kde dochází k vyplavování dusičnanů a úniku emisí amoniaku do ovzduší. (Riva et al., 2015)

Fermentační zbytek se může stát i odpadem podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů, jestliže nesplňuje požadované kvalitativní znaky, jakými jsou obsah rizikových látek ve fermentačním zbytku. Podle tohoto zákona se zbytek dále může stát odpadem, jestliže jeho původní účel zanikl. Jestliže se fermentační zbytek stane odpadem, tak původce odpadu, tedy konkrétně producent fermentačního zbytku, je povinen zacházet s tímto zbytkem jako s odpadem a může tento odpad předat jen oprávněné osobě podle zákona o odpadech. (Zákon č. 185/2001 Sb.)

Při skladování neodvodněného fermentačního zbytku ve skladovacích nádržích je nutné použít míchadla, aby se na hladině skladujícího fermentačního zbytku nevytvořila obtížně odstranitelná krusta (Dvořáček, 2008). U nezemědělských typů bioplynových stanic musí být zakrytí skladovacích nádrží. Je nutné, aby kapacita skladovacích nádrží byla nejméně na čtyřměsíční produkci fermentačního zbytku. Fermentační zbytek může mít různý charakter podle vstupujících surovin a zpracování a podle toho by mělo být s fermentačním zbytkem nakládáno a měly by být eliminovány případné emise pachových látek. (Metodický pokyn MŽP, 2014)

### **2.5.1 Složení fermentačního zbytku**

Fermentační zbytek se skládá ze směsi mikrobiální biomasy (vytvořené procesem rozkladu) a nerozloženého materiálu. Množství fermentačního zbytku je přibližně stejné jako množství výchozího materiálu, i když se hmota obvykle sníží o 15 %. Fermentační zbytek obsahuje dusík, fosfor, draslík zaznamenaný v původním vstupním materiálu

a další prvky. Skutečný obsah živin a jiných prvků do značné míry závisí na typu vstupní suroviny a jejím zpracování. (Chambers, 2012)

Je zapotřebí brát v potaz vztah mezi kvalitou vstupní suroviny a kvalitou fermentačního zbytku. Fermentační zbytek bude obsahovat veškerý materiál, který není degradován, a proto veškeré nečistoty ve vstupní surovině zůstanou ve fermentačním zbytku. Kvalitní, dobře připravená vstupní surovina bude produkovat kvalitní fermentační zbytek. (Lewens, 2011)

Složení fermentačních zbytků je závislé na konfiguraci reaktoru, jestli se jedná o jednostupňový či vícestupňový systém. Další jevy, které mají vliv na fermentační zbytek, jsou dány především procesními parametry bioplynové stanice. Mezi tyto parametry patří především látkové zatížení vstupním materiálem, doba zdržení a teplota procesu. Fermentační zbytek se dále liší podle obsahu sušiny, spalitelných látek. (Straka et al., 2010, Al Seadi et al., 2008)

Provozovateli jsou často sledovány další parametry, jako jsou acido detergentní vláknina (ADF) a neutrálně detergentní vláknina (NDF). Acido detergentní vláknina charakterizuje obsah celulózy a ligninu v buněčné stěně, kdežto neutrálně detergentní vláknina zahrnuje všechny složky. Funkce neutrálně detergentní vlákniny je poskytování energie pro mikrobiální syntézu. (Koukolová et al., 2010)

### **2.5.2 Rozdělení fermentačních zbytků**

V bioplynových stanicích může být použita velká řada různých materiálů jako vstupní substrát např. hnůj, kejda, biomasa rostlinné suroviny, biologicky rozložitelný odpad a vedlejší živočišné produkty. Je nezbytné bioplynové stanice a fermentační zbytky rozlišovat podle vstupních substrátů. (Vítěz et al., 2013)

Ministerstvo zemědělství klade specifické nároky na zpracování fermentačních zbytků a rozděluje fermentační zbytky do čtyř kategorií, a to na fermentační zbytky z čistíren odpadních vod, zbytky ze zemědělských bioplynových stanic, zbytky pocházejících z ostatních bioplynových stanic zpracovávající odpady mimo vedlejší živočišné produkty a fermentační zbytky pocházející z vedlejších živočišných produktů. (Metodický pokyn MŽP, 2014)

### 2.5.2.1 Fermentační zbytky pocházející ze zemědělských bioplynových stanic

Vstupní surovinou jsou statková hnojiva a materiály rostlinného původu (např. sláma, bramborová nat', travní biomasa, kukuřičná siláž). Do této kategorie zařazené bioplynové stanice nesmí zpracovávat jako vstupní surovinu odpady podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů a ani vedlejší živočišné produkty, které jsou zařazené v Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu, které nejsou určeny pro lidskou spotřebu ve znění pozdějších předpisů. (Krčálová et al., 2008)

Tabulka 3 - Možné hlavní suroviny pro zpracování v zemědělských bioplynových stanicích (Metodický pokyn MŽP, 2014)

<b>Živočišné suroviny</b>	<b>Rostlinné suroviny</b>	<b>Pěstovaná biomasa</b>
Kejda prasat	Sláma všech typů obilovin i olejnin	Obiloviny v mléčné zralosti (celé rostliny) čerstvé i silážované
Hnůj prasat se stelivem	Plevy a odpad z čištění obilovin	Kukuřice ve voskové zralosti (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
Kejda skotu	Bramborová nat' i slupky z brambor	Kukuřice vyzrálá (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
Hnůj skotu se stelivem	Řepná nat' z krmné i cukrové řepy	Štěpky anebo řezanka z listnatých dřevin a rychloobrátkových kultur anebo z průklestů
Hnůj a stelivo z chovu koní, koz, králíků	Kukuřičná sláma i jádro kukuřice	A jiné typy
Drůbeží exkrementy, vč. Steliva	Travní biomasa nebo seno (senáže)	
Hnůj a stelivo z chovu ovcí	Nezkrmitelné rostlinné materiály (siláže, obiloviny, kukuřice)	
Další živočišné suroviny	Další rostlinné suroviny	

Fermentační zbytek ze substrátu rostlinného původu musí splňovat kritéria jako je minimální obsah celkového dusíku 0,6 %. Fermentační zbytek splňující tyto podmínky je považován za typové organické hnojivo ze statkových hnojiv a rostlinných tkání (číslo typu 18. 1. e podle přílohy č. 3 vyhlášky č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na

hnojiva podle znění pozdějších předpisů). Ostatní fermentační zbytky jsou považovány za netypové organické hnojivo. Jestliže se používá jako vstupní surovina hnůj, kejda nebo drůbeží trus, tak platí obdobné legislativní požadavky jako u substrátu z rostlinného původu a navíc musí splňovat hygienické požadavky pro vedlejší živočišné produkty 2. kategorie podle Evropské legislativy. Podle Nařízení komise č. 208/2006 Sb. ve znění pozdějších předpisů je požadováno, aby reprezentativní vzorky odebrané z fermentačního zbytku v průběhu nebo ihned po zpracování v zařízení na výrobu bioplynu za účelem sledování zpracování, splňovaly parametry uvedené v tabulce č. 4. (Váňa, 2007)

*Tabulka 4 - Hygienizační podmínky (Váňa, 2007)*

<b>Organismus</b>	<b>Počet vzorků, které musí být testovány</b>	<b>Prahová hodnota počtu bakterií (KTJ v 1 g), označováno jako m</b>	<b>Maximální počet bakterií (KTJ v 1 g), označováno jako M</b>	<b>Počet vzorků, kde je povolena hodnota mezi m a M</b>
<i>Escherichia coli</i> v 1g	5	0	1000	5
<i>Enterococaceae</i> v 1 g	5	0	1000	5
<i>Salmonella</i> nepřítomnost v 25 g	5	0	0	0

#### **2.5.2.2 Fermentační zbytky pocházející z čistírenských bioplynových stanic**

Čistírenské bioplynové stanice zpracovávají pouze kaly z čistíren odpadních vod, septiků, žump a odpadní vodu. Tyto bioplynové stanice jsou součástí čistíren odpadních vod. Výstupem z čistírenské bioplynové stanice je upravený kal. Pro tyto bioplynové stanice není požadováno zásobních nádrží na vyhnílý kal. (Metodický pokyn MŽP, 2014, Vítěz et al., 2013).

#### **2.5.2.3 Fermentační zbytky bioplynových stanic pocházejí z odpadů**

Do této kategorie se řadí fermentační zbytek, kde vstupní surovina byla složená obdobně jako u fermentačních zbytků ze zemědělských bioplynových stanic a navíc z biologicky

rozložitelných odpadů mimo vedlejší živočišné produkty. Seznam odpadů využitelných jako vstupní surovina pro tyto bioplynové stanice upravuje příloha č. 1 vyhlášky č. 341/2008 Sb., ve znění pozdějších předpisů.

K dosažení hygienizace výstupního materiálu je nutné splňovat kritérium, kterým je udržování minimální teploty 55 °C po dobu 24 hodin bez přerušení. Celková doba zdržení ve fermentoru je více jak 30 dnů. Doba zdržení může být nižší, nejméně 20 dnů, pokud provozovatel zajistí, že produkovaný fermentační zbytek trvale splňuje hodnoty stability dle normy ISO 11734. Provozní teplota může být nižší jak 55 °C a může být i kratší doba expozice, jestliže biologicky rozložitelný odpad byl předupraven při teplotě 70 °C po dobu 1 hodiny, nebo následně upraven po dobu 1 hodny při teplotě 70 °C, nebo následně fermentační zbytek kompostovat. (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

Při zpracování bioodpadů v bioplynové stanici je nutné sledovat účinnost hygienizace. Účinnost hygienizace se posuzuje na základě sledování indikátorových mikroorganismů (*Salmonella spp.*, termotolerantní koliformní bakterie, enterokoky), jak je znázorněno v tabulce č. 5. (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

Tabulka 5 - Hygienizační podmínky pro fermentační zbytky pocházející z odpadů (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

Indikátorový mikroorganismus	Výstup	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu		Limit (nález/KTJ)
<i>Salmonella spp.</i>	Rekultivační fermentační zbytek	Nález v 50 g	5		Negativní
Termotolerantní koliformní bakterie	Rekultivační fermentační zbytek	KTJ v 1 g	5	2	< 10 <sup>3</sup>
				3	< 50
Enterokoky	Rekultivační fermentační zbytek	KTJ v 1 g	5	2	< 10 <sup>3</sup>
				3	< 50



#### ***2.5.2.4 Fermentační zbytky, kde jednou složkou ze vstupních surovin jsou vedlejší živočišné produkty***

Do této skupiny se řadí fermentační zbytky, které mají jednu ze surovin vedlejší živočišné produkty 3. kategorie, nebo materiály 2. kategorie, které jsou zpracovány zpracovatelskou metodou 1. Kritéria na suroviny a jejich hygienizaci stanovuje Nařízení Komise (EU) č. 142/2011. Bioplynová stanice pro zpracování vedlejších živočišných produktů musí být vybavena pasterizačně-hygienickou jednotkou, která zajistí hygienizaci. Tato jednotka nemusí být v celém procesu, jestliže vstupy do bioplynové stanice budou zpracovány zpracovatelskou metodou 1 podle Nařízení Komise (EU) č. 142/2011. Tato metoda spočívá v tepelném zpracování při teplotě 133 °C po dobu nejméně 20 minut bez přerušování a při tlaku (absolutním) minimálně 3 bary. Velikost částic nesmí přesahovat 50 mm. Provozovatel bioplynové stanice využívající jako jednu ze surovin vedlejší živočišné produkty, je povinen provádět a zachovávat stálý písemný postup nebo postupy založené na zásadách analýzy rizik a kritických kontrolních bodů (HACCP). Pro kritické kontrolní body musí být stanoveny minimální hodnoty technologických norem. Tato bioplynová stanice musí být dále vybavena systémem pro sledování teploty v reálném čase a záznamovým zařízením ke stálému zaznamenávání výsledků těchto měření a proces musí mít bezpečnostní systém proti nedostatečnému ohřevu. (Krčálová et al., 2008, Nařízení Komise (EU) č. 142/2011)

Každá bioplynová stanice zpracovávající vedlejší živočišné produkty musí mít vlastní laboratoř, nebo využívat externí laboratoř pro provádění nezbytných analýz. Laboratoř musí být akreditována podle mezinárodně uznávaných norem nebo musí být příslušným orgánem pravidelně kontrolována. (Metodický pokyn MŽP, 2014)

Stanovení hygienizace fermentačního zbytku podle Nařízení Komise (EU) č. 142/2011 je uvedeno v tabulce č. 6.

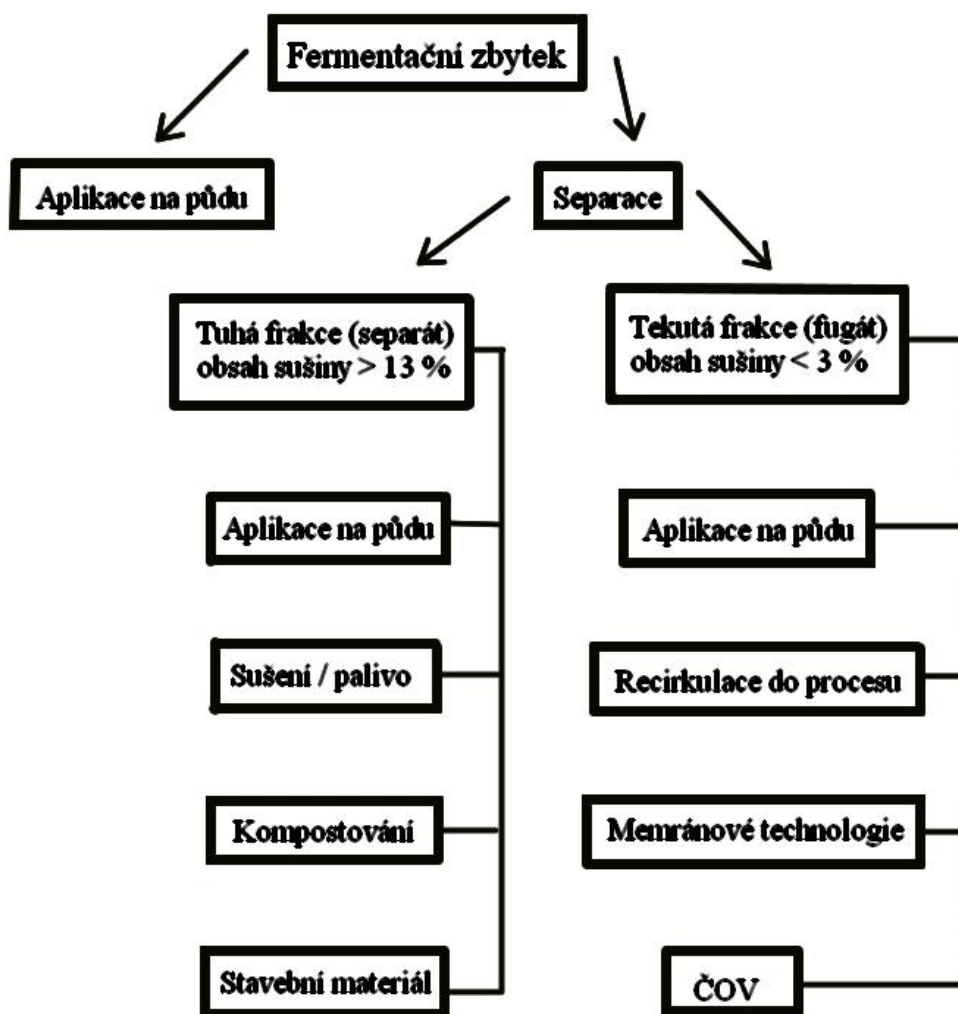
Tabulka 6 - Hygienizační podmínky pro fermentační zbytky pocházející z VŽP (Nařízení Komise (EU) č. 142/2011)

<b>Organismus</b>	<b>Počet vzorků, které musí být testovány</b>	<b>Prahová hodnota počtu bakterií (KTJ v 1 g), označováno jako m</b>	<b>Maximální počet bakterií (KTJ v 1 g), označováno jako M</b>	<b>Počet vzorků, kde je povolena hodnota mezi m a M</b>
<i>Escherichia coli</i> v 1g	5	1000	5000	1
<i>Enterococaceae</i> v 1 g	5	1000	5000	1
<i>Salmonella</i> nepřítomnost v 25 g	5	0	0	0

### 2.5.3 Možnosti nakládání s fermentačním zbytkem

Již před zprovozněním bioplynové stanice musí mít provozovatel plán, jak bude s fermentačním zbytkem nakládat. Fermentační zbytek není hlavním cílem výroby v bioplynové stanici. Tento zbytek nelze chápat podle zákona č. 185/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů jako odpad, jestliže bude dále využit (např. hnojivo, palivo, stelivo). (Zákon č. 185/2001 Sb.)

V největším měřítku se fermentační zbytek používá jako hnojivo na zemědělské půdě, ovšem obsah těžkých kovů a stopových prvků může znemožnit využití tohoto zbytku na zemědělské půdě. Existují tedy i další způsoby využití fermentačního zbytku a je jen zapotřebí vhodně stanovit odbyt tohoto zbytku k využití s platným právním rámcem. (Váňa, 2007)



Obrázek 6 - Možnosti nakládání s fermentačním zbytkem (Trávníček et al., 2015)

### 2.5.3.1 Využití fermentačního zbytku jako hnojiva

Fermentační zbytek, který splňuje parametry v tabulce č. 7, je označován jako typové organické hnojivo. Zbytky, které nesplňují kritéria, jsou označovány jako netypová hnojiva. Při uvádění hnojiv do oběhu stačí u typových hnojiv ohlášení a u netypových hnojiv musí být registrace u ústředního kontrolního a zkušebního zemědělského ústavu. Při používání hnojiv na zemědělské půdě a lesních pozemcích musí být hnojivo rovněž registrováno, to neplatí, jestliže hnojiva jsou vyráběna výhradně ze statkových hnojiv nebo krmiv. (Zákon č. 156/1998 Sb.)

Tabulka 7 - Parametry typových hnojiv z anaerobní fermentace (Vyhláška č. 131/2014 Sb.)

Číslo typu	Označení typu	Minimální obsah živin	Součásti určující typ, formy a rozpustnost živin	Hodnocené součásti a další požadavky	Zvláštní ustanovení	
18.1	e) Organické hnojivo z fermentačního zbytku	3 – 13 %	Sušina		Hnojivo vzniklé anaerobní fermentací	
		0,3 % N	Celkový dusík	Dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku		
	Organické hnojivo z fermentačního zbytku - fugátu	< 3 %	Sušina		Dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku	Hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, tekutý podíl po separaci, svým charakterem může vykazovat působení minerálního hnojiva
		0,1 % N	Celkový dusík			
	Organické hnojivo z fermentačního zbytku - separovaný	> 13 %	Sušina		Dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku	Hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, tuhý podíl po separaci
		0,5 % N	Celkový dusík			

Zemědělští podnikatelé jsou povinni používat hnojiva způsobem stanoveným zákonem č. 156/1998, ve znění pozdějších předpisů. Podle tohoto zákona nesmí být vnášeny do půdy rizikové prvky nebo rizikové látky v množství, které pro hnojiva a pomocné látky jsou uvedeny ve vyhlášce č. 131/2014 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Tabulka č. 8 znázorňuje hodnoty rizikových prvků z fermentačních zbytků použitých jako hnojiva. Fermentační zbytky s obsahem sušiny do 13 % mohou být aplikovány na půdu maximálně 10 Mg sušiny na 1 ha za 3 roky. Maximální aplikační dávka fermentačních zbytků, které mají obsah sušiny větší jak 13 % je 20 Mg na 1 ha za 3 roky. (Vyhláška č. 131/2014 Sb.)

Tabulka 8 - Limitní hodnoty rizikových prvků ve fermentačním zbytku, použitého jako hnojivo (Vyhláška č. 131/2014 Sb.)

Fermentační zbytek	Sledovaný ukazatel [mg·kg <sup>-1</sup> sušiny]								
	Cd	Pb	Hg	As	Cr	Cu	Mo	Zn	Ni
Obsah sušiny > 13 %	2	100	1,0	20	100	150	20	600	50
Obsah sušiny < 13 %	2	100	1,0	20	100	250	20	1200	50

Fermentační zbytky jako hnojiva na zemědělské půdy a lesní pozemky nemůžeme aplikovat, jestliže není zajištěno rovnoměrné pokrytí pozemku. Jestliže fermentační zbytek nebude splňovat limity rizikových prvků, může hnojení vést k poškození fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností půd nebo sousedních pozemků. Dále nesmějí být použita hnojiva na půdy, které jsou zaplavené, přesycené vodou, pokryté vrstvou sněhu vyšší než 5 cm nebo promrzlé, kdy vrchní část půdy nerozmrzá do 5 cm hloubky přes den.

Zemědělství podnikatelé hospodařící na zemědělské půdě ve zranitelných oblastech jsou povinni používat hnojiva a pomocné látky v souladu se zvláštním právním předpisem č. 262/2012 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Dále zemědělství podnikatelé jsou povinni vést evidenci o množství, druhu a době použití hnojiv a tuto evidenci evidovat nejméně 7 let. (Zákon č. 156/1998 Sb.)

Podle zákona č. 254/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů je fermentační zbytek jako hnojivo zařazen do tzv. závadných látek a kdo zachází se závadnými látkami, je povinen učinit taková opatření, aby tyto látky neohrožovaly životní prostředí a nevnikaly do vod povrchových a podzemních. (Zákon č. 254/2001 Sb.)

Po aplikaci hnojiv s obsahem sušiny nižším jak 13 % na orné půdy se hnojiva zapracovávají do půdy nejpozději do 24 h. Zapracování hnojiv s obsahem sušiny vyšším jak 13 % se provede nejpozději 48 h po aplikaci. (Vyhláška č. 377/2013 Sb.)

Skladování zbytku jako hnojiva musí být v souladu s vyhláškou č. 337/2014 Sb., ve znění pozdějších předpisů, kde tekuté hnojiva se skladují v nepropustných nadzemních, případně částečně zapuštěných nádrží či zemních jímkách. Pro tyto skladovací objekty musí být zamezen přítok povrchových a srážkových vod, pokud v kolaudačním rozhodnutí nebo souhlasu není uvedeno jinak. Tuhá hnojiva se skladují

v objektech, které jsou zabezpečeny totožně jako objekty pro skladování tuhých statkových hnojiv se zamezením přítoku povrchových a srážkových vod. Součástí těchto objektů je sběrná jímka tekutého podílu. (Vyhláška č. 377/2013 Sb.)

Při skladování hnojiv ve zranitelných oblastech jsou provozovatelé povinni dodržovat ustanovení vyhlášky č. 262/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů. Při skladování nesmí dojít ke znečištění vod, do hnojiv nesmí být vnášeny rizikové látky, nebo rizikové prvky, které by mohly negativně ovlivnit vývoj kulturních rostlin nebo ohrozit potravní řetězec. (Zákon č. 156/1998 Sb.)

*Tabulka 9 - Průměrných přívodů živin z fermentačních zbytků. (Vyhláška č. 377/2013 Sb.)*

Hnojivo	Průměrný obsah sušiny [%]	Průměrný přívod živin		
		N [kg·Mg <sup>-1</sup> ]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [kg·Mg <sup>-1</sup> ]	K <sub>2</sub> O [kg·Mg <sup>-1</sup> ]
Fermentační zbytek ze zemědělských BPS	5,8	5,3	1,6	3,5
Tekutá část po separaci f. zbytku (fugát)	3,9	5,1	1,4	3,4
Tuhá část po separaci f. zbytku (separát)	23	6,8	3,0	4,5

### **2.5.3.2. Rekultivační fermentační zbytek**

Z anaerobního zpracování bioodpadu je fermentační zbytek označován jako rekultivační fermentační zbytek. Tento zbytek je stabilizovaný, použitelný mimo zemědělskou a lesní půdu a nesmí vykazovat pachy, které znázorňují nedostatečnou stabilitu, nebo přítomnost nežádoucích látek podle zákona č. 201/2012 Sb., ve znění pozdějších předpisů. (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

Nároky na limitní koncentrace rizikových látek a prvků v rekultivačním fermentačním zbytku jsou uvedeny v tabulce č. 10. Nároky jsou rozděleny do tří tříd. Podle třídy, do které fermentační fermentační zbytek zapadá, je následně využíván. Fermentační zbytek první třídy se používá na ploše určené pro zeleň u sportovních a rekreačních zařízení, s výjimkou venkovních hracích ploch. Fermentační zbytek spadající do druhé kategorie je použit na plochy určené pro městskou zeleň, zeleň parků

a lesoparků, pro vytváření rekultivačních vrstev. Tam, kde lze použít rekultivační fermentační zbytek druhé třídy, lze použít i zbytek první třídy. Rekultivační fermentační zbytek třetí třídy je určen pro využití na povrchu terénu vytvářeného rekultivačními vrstvami zabezpečených skládek odpadu podle normy ČSN 858035. Rekultivační fermentační zbytky první a druhé třídy lze rovněž použít pro tuto třídu. (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

*Tabulka 10 - Limitní koncentrace vybraných rizikových látek (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)*

Fermentační zbytek	Sledovaný ukazatel [mg·kg <sup>-1</sup> sušiny]									
	As	Cd	Cr <sub>celkový</sub>	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	PCB	PAU
Třída I	10	2	100	170	1	65	200	500	0,02	3
Třída II	20	3	250	400	1,5	100	300	1200	0,2	6
Třída III	30	4	300	500	2	120	400	1500	-	-

Na rekultivační fermentační zbytek jsou kladeny požadavky na jakost. Vlhkost se musí být maximálně 98 %<sub>hm.</sub>, celkový dusík přepočtený v sušině musí být minimálně 0,3 %<sub>hm.</sub> a pH se musí pohybovat v rozmezí 6,5 – 9. (Vyhláška č. 341/2008 Sb.)

### **2.5.3.3 Aplikace stabilizovaného kalu na zemědělskou půdu**

Aplikace stabilizovaných kalů na půdu je možná, jestliže upravené kaly nepřekročí mezní hodnoty koncentrace vybraných rizikových látek pro použití na půdě. Mezní koncentrace vybraných rizikových látek jsou uvedeny v tabulce č. 11. Při použití stabilizovaných kalů na zemědělské půdě je nutné, aby tyto kaly byly zapraveny do půdy do 48 h od aplikace na půdu. Stabilizované kaly rovněž nesmí překročit limit 5 Mg sušiny kalů na 1 ha v průběhu tří po sobě následujících let. Limit může být navýšen na 10 Mg sušiny kalů v průběhu deseti let po sobě jdoucích, pokud upravené kaly obsahují méně než polovinu limitního množství každé ze sledovaných rizikových látek a prvků (uvedené v tabulce č. 11). Stabilizované kaly nesmí obsahovat více jak 70 % celkového potřebného množství dusíku pro hnojiva plodin. Stanovení dodání živin pomocí stabilizovaných kalů je doloženo výsledky rozborů agrochemických vlastností půd uvedeným v evidenčním listu.

Tabulka 11 - Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 382/2001 Sb.)

	Sledovaný ukazatel [mg·kg <sup>-1</sup> sušiny]								
	Cd	Pb	Hg	As	Cr	Cu	Ni	Zn	AOX
Stabilizovaný kal	5	200	4,0	30	200	500	200	2500	500

Podle mikrobiologických kritérií se rozlišují dvě kategorie kalů pro použití na zemědělských půdách. Rozdělení kalů podle mikrobiologických kritérií je uvedeno v tabulce č. 12. Kaly kategorie I je možno podle vyhlášky 382/2001 Sb., ve znění pozdějších předpisů aplikovat na půdy využívané v zemědělství při dodržení určitých opatření. Kaly kategorie II je možno používat na půdy určené k pěstování technických plodin a na půdy, na kterých nebude pěstování polní zeleniny, intenzivně plodící ovocná výsadba po dobu nejméně tří let za určitého dodržování zásad ochrany zdraví při práci. (Vyhláška č. 382/2001 Sb.)

Tabulka 12 - Mikrobiologická kritéria kalů pro použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 382/2001 Sb.)

Kategorie kalů	Přípustné množství mikroorganismů ( KTJ v 1 g sušiny) aplikovaných kalů		
	Termotolerantní koliformní bakterie	enterokoky	<i>Salmonella Sp.</i>
Kaly I. kategorie	3	3	Negativní nález
Kaly I. kategorie	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> – 10 <sup>6</sup>	Nestanovuje se

#### 2.5.3.4. Ostatní možné využití fermentačního zbytku

S narůstajícím počtem bioplynových stanic roste množství fermentačního zbytku i následné požadavky na využití. Fermentační zbytek, který nesplňuje kritéria pro použití jako hnojiva tím, že obsahuje nebezpečné látky, může být zpracován pro energetické využití ve vhodných provozech. (Koutný, 2010)

Na výrobu tuhých alternativních paliv je možné využít separovaný fermentační zbytek s jeho následným upravením (usušením). Pro výrobu tuhých paliv a následné zlepšení energetických vlastností lze separovaný fermentační zbytek kombinovat



s dalšími druhy biomasy. Mezi vhodné materiály patří zejména dřevní odpad z lesní těžby, dřevní hmota z plantáží rychle rostoucích dřevin.

Tuhá paliva, jako jsou pelety nebo brikety z fermentačních zbytků nesplňující hodnoty mechanické, energetické a emisní, lze používat pouze do vsázky velkokapacitního spalovacího zařízení s čištěním spalin. (Kára et al., 2009)

### **3 CÍL PRÁCE**

Cílem práce je zhodnocení produkce bioplynu z fermentačních zbytků. Aby bylo tohoto cíle dosaženo, bylo nejprve nutné se seznámit s danou problematikou – tedy nastudovat literaturu pojednávající o výrobě bioplynu, o vlastnostech fermentačních zbytků apod. V dalším kormu je nutné provést analýzu fermentačních zbytků pocházejících ze tří bioplynových stanic při dvou různých teplotních režimech pro zajištění vlivu teploty na proces. Testy budou sloužit jako podklad pro vyhodnocení množství produkovaného bioplynu a metanu v závislosti na druhu fermentačního zbytku a procesní teplotě. Bude také vytvořena metodika pro testování zbytkové produkce bioplynu.

## 4 METODIKA

Testování fermentačních zbytků probíhalo v Republikové referenční laboratoři bioplynových transformací v suterénu budovy Q na Mendelově univerzitě v Brně.

### 4.1 Popis reaktorů pro testování produkce bioplynu z fermentačních zbytků

Testovací zařízení funguje na bázi vsázkových reaktorů. Celé zařízení musí být plynotěsné, aby neunikal bioplyn a ani nevnikal do procesu kyslík. Reaktory jsou umístěné ve vodní lázni, kde je udržována požadovaná teplota pro testovací materiál. Reaktory ve vodní lázni jsou na obrázku č. 7.



*Obrázek 7 - Vsázkové reaktory s testovacím materiálem*

Bioplyn z reaktorů je jímán do normalizovaného odměrného válce opatřeného stupnicí. V odměrném válci je nasycený roztok destilované vody s chloridem sodným a přísadkou kyseliny sírové pro zajištění nereaktivitu s bioplymem. Obrázek č. 8

znázorňuje objemné válce pro jímání bioplynu. Pro snadnější odečet produkce bioplynu z odměrného válce je nasycený roztok destilované vody s chloridem sodným s přidavkem kyseliny sírové zbarven methyl oranží. Tento roztok v celém procesu nereaguje, pouze se pohybuje mezi odměrným válcem a zásobníkem pro roztok v závislosti na produkci bioplynu.



*Obrázek 8 - Odměrné válce pro jímání bioplynu*

## 4.2 Použité technické vybavení

Seznam použitého technického vybavení laboratoře:

- Reaktory o objemu 0,005 m<sup>3</sup>
- Elektrická sušárna KBS G 100
- Laboratorní váhy Pioneer OHAUS model PA214CM (s přesností 1·10<sup>-7</sup> kg)
- Kalorimetr Parr 6400

- Analyzátor TOC multi N/C 2100
- Muflová pec LMH 07/12
- Analyzátor plynů Dräger X-am 7000

### **4.3 Analýza fermentačních zbytků**

Fermentační zbytky pocházely z různých technologií zpracovávající zemědělské produkty s ohledem na různou dobu zdržení. Fermentační zbytky, které byly odebrány, pocházely z bioplynových stanic, které převážně zpracovávaly kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Kukuřičná siláž a prasečí kejda mají největší zastoupení při zpracování v bioplynové stanici v České republice.

Vzorky fermentačních zbytků se odebíraly v bioplynových stanicích z potrubí, které vede z fermentoru fermentační zbytek do uskladňovací nádrže. Při převozu vzorků z bioplynových stanic byl kladen důraz na to, aby byla zachována stejná teplota jako je na výstupu z fermentoru a zamezil se přístup kyslíku, aby nedošlo k inhibici vzorků. V laboratoři byly vzorky fermentačních zbytků důkladně zamíchány, pro zajištění dobré homogenity vzorků. Poté se provedlo stanovení sušiny a stanovení obsahu spalitelných látek. Toto stanovení se provedlo ve dvou opakováních a výsledky byly následně zprůměrnovány pro zlepšení statistické průkaznosti. Odebraný fermentační zbytek se následně nadávkoval v laboratoři do vsázkových reaktorů o objemu 0,005 m<sup>3</sup>. Hmotnost vzorků činila 3,3 kg.

#### **4.3.1 Stanovení sušiny**

Stanovení sušiny vychází z české technické normy ČSN EN 15934. Stanovení sušiny probíhá pomocí působení tepla, kdy se odstraní voda obsažená v materiálu, ale nedochází ke změně chemického složení.

Při stanovování sušiny používáme vyžíhané laboratorní keramické vaničky a analytické váhy. Čisté vyžíhané laboratorní keramické vaničky byly nejdříve zváženy na analytických vahách a poté se na ně aplikoval materiál. Následně se vaničky znovu zvážily na analytických vahách pro určení hmotnosti materiálu. Po tomto kroku se

vaničky umístily do laboratorní pece, kde probíhalo sušení při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin. Po skončení procesu sušení se provedlo další vážení na analytických vahách, kde materiál již byl zbaven vody a mohlo být provedeno zjištění sušiny materiálu. Každá vanička má své specifické číslo a do laboratorního deníku zaznamenáváme veškeré naměřené údaje.

Stanovení sušiny podle vzorce:

$$\text{Sušina} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

$m_1$  ... hmotnost prázdné vyžíhané vaničky [kg]

$m_2$  ... hmotnost vaničky s materiálem [kg]

$m_3$  ... hmotnost vaničky po procesu sušení s materiálem [kg]

#### 4.3.2 Obsah spalitelných látek

Po procesu sušení byly vaničky se vzorkem umístěny do žíhací pece, ve které byly vzorky žíhány při teplotě 550 °C do ustálené hodnoty. Po procesu žíhání se vzorky znovu zvažily pro určení minerální popeloviny a údaje se znovu zaznamenaly.

Stanovení obsahu spalitelných látek ze vzorce:

$$\text{Spalitelné látky} = \frac{(m_3 - m_1) - (m_4 - m_1)}{m_3 - m_1} \cdot 100 [\%]$$

Kde:

$m_1$  ... hmotnost prázdné vyžíhané vaničky [kg]

$m_2$  ... hmotnost vaničky s materiálem [kg]

$m_3$  ... hmotnost vaničky po procesu sušení s materiálem [kg]

$m_4$  ... hmotnost vaničky s vyžíhaným materiálem [kg]

### **4.3.3 Stanovení celkového organického uhlíku**

Stanovení organického uhlíku udává množství uhlíku, který je při spalování přeměněn na oxid uhličitý a není uvolňován jako oxid uhličitý v kyselém prostředí. Stanovení celkového organického uhlíku upravuje česká technická norma ČSN EN 13137.

Vzorek na keramické vaničce o přibližné hmotnosti 0,6 g se vloží do pece TOC analyzátoru multi N/C 2100 S na vyznačenou rysku. Přístroj vyhodnotí spálením celkový organický uhlík. Je důležité dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci s keramickými vaničkami, protože keramické vaničky po vytažení z pece mají vysokou teplotu a může dojít k popálení.

Pro získání reálných hodnot vzorků je před měřením a po měření provedena kalibrace analyzátoru. Kalibrace probíhá v analyzátoru spálením uhličitanu vápenatého, který má stejnou hodnotu celkového organického uhlíku. Pro udržení uhličitanu vápenatého v suchém stavu je použit exsikátor.

### **4.4.4 Kalorimetrie**

Kalorimetrie je metoda pro stanovení spalného tepla při konstantním objemu a referenční hodnotě 25 °C v kalorimetru s tlakovou nádobou. Kalibrace se provádí spálením certifikované kyseliny benzoové. Metody pro stanovení spalného tepla se řídí českou technickou normou ČSN ISO 1928. (Česká technická norma ČSN ISO 1928)

Stanovení spalného tepla probíhalo isoperibolickým kalorimetrem (isotermický typ kalorimetru). Při stanovování spalného tepla musí být vzorek upraven. Úprava vzorku spočívá v dokonalém vysušení vzorku v laboratorní peci. Poté se vysušený vzorek namele pomocí elektrického nožového mlýna na jemný prášek, který je lisován na tabletu. Před analyzováním vzorku v kalorimetru se provede zvážení pro přepočítání spalného tepla na kilogram sušiny vzorku. Vzorek upravený do tablety se následně vloží do připraveného isoperibolického kalorimetru Parr 6400, který zanalyzuje spalné teplo vzorku, které se uvolnilo spálením vzorku. Hodnota spalného tepla se zobrazí na displeji v jednotkách megajouly na kilogram suchého vzorku. Stanovení spalného tepla se provedlo u každého vzorku 3krát pro zlepšení statistické průkaznosti.

#### 4.4 Metodika testů

Vzorky ze tří bioplynových stanic byly testovány v Republikové laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně při dvou teplotních režimech, kdy část vzorků byla udržována při teplotě 20 °C a část při 43 °C, protože rychlost procesu a intenzita anaerobního rozkladu je ovlivněna teplotou procesu. Každý vzorek o hmotnosti 3,3 kg byl pro daný teplotní režim dávkován do tří testovacích fermentorů o objemu 0,005 m<sup>3</sup> pro zlepšení statistické průkaznosti. Test produkce bioplynu z testovacích fermentorů probíhal po dobu 24 dnů a produkce bioplynu se zaznamenávala po 24 hodinách. Produkovaný bioplyn byl skladován v plynojemu s vodním uzávěrem. Během testů byla prováděna analýza složení bioplynu pomocí analyzátoru plynů Dräger X-am 7000 na obsah metanu, oxidu uhličitého a síry.



*Obrázek 9 - Analýza složení bioplynu*



Změřené množství produkovaného bioplynu je nutné převést na tzv. normální metry krychlové. Normální metr krychlový je specifikován jako objem jednoho metru krychlového plynu při normálních podmínkách, to znamená při teplotě 0 °C a tlaku 101 325 Pa.

Přepočet objemu plynu na normální podmínky ze vzorce:

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

$V_n$  ... objem bioplynu za fyzikálně normálních podmínek [m<sup>3</sup>]

$T_0$  ... fyzikálně normální termodynamická teplota [K]

$T_n$  ... změřená termodynamická teplota [K]

$k$  ... kalibrační konstanta měřicího systému [-]

$h_n$  ... výška odečtené hladiny [cm]

$p_a$  ... atmosférický tlak [Pa]

$h_k$  ... výšková konstanta měřicí trati [m]

$\rho$  ... hustota zásobní kapaliny [kg·m<sup>-3</sup>]

$g$  ... tíhové zrychlení [m·s<sup>-2</sup>]

#### 4.5 Přesnost měření

Pro zamezení nepřesnosti bylo provedeno testování vždy ve dvou opakování a z výsledků se vypočítala relativní odchylka. Relativní odchylka se počítala z absolutní produkce bioplynu na konci procesu fermentace. Produkce bioplynu se zaznamenávala denně. V první části je nutné stanovení aritmetického průměru.

Stanovení aritmetického průměru podle vzorce:

$$\bar{x} = \left( \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \right)$$

kde:

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr naměřených hodnot

x ... naměřené hodnoty

n ... počet naměřených hodnot

Následně se odchylka vypočte odečtením naměřené hodnoty od aritmetického průměru. Poté se opět provede aritmetický průměr absolutních hodnot odchylek. (Bednařík et al., 2000)

Vzorec pro výpočet relativní odchylky:

$$\partial x = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100$$

Kde:

$\Delta x$  ... aritmetický průměr odchylek

$\bar{x}$  ... aritmetický průměr naměřených hodnot

$\partial x$  ... relativní odchylka [%]

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 5.1 Výsledky vzorku č. 1

Vzorek č. 1 byl odebraný fermentační zbytek ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávající převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. V malém množství jsou zde využívány zemědělské odpady. Proces výroby bioplynu je dvoustupňový s dofermentorem. Doba zdržení suroviny v bioplynové stanici je 71 dní.

Testovanému vzorku byla stanovena průměrná sušina 5,01 %. V průměru vzorek obsahoval 69,9 % spalitelných látek.

V tabulce č.13 je podrobně zobrazena denní produkce bioplynu a měrná produkce metanu vzorku č. 1 z jednotlivých fermentorů při 20 °C teplotním režimu.

Tabulka 13 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 1

Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]			Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]		
	Fermentor 1	Fermentor 2	Fermentor 3	Fermentor 1	Fermentor 2	Fermentor 3
1. den	0,000202	0,000202	0,000202	0,000306	0,000307	0,000309
2. den	0,000020	0,000020	0,000020	0,000031	0,000031	0,000031
3. den	0,000020	0,000020	0,000020	0,000031	0,000031	0,000031
4. den	0,000027	0,000027	0,000027	0,000041	0,000041	0,000041
5. den	0,000034	0,000034	0,000034	0,000051	0,000052	0,000052
6. den	0,000054	0,000054	0,000068	0,000082	0,000083	0,000104
7. den	0,000054	0,000054	0,000054	0,000082	0,000083	0,000083
8. den	0,000055	0,000061	0,000061	0,000082	0,000093	0,000094
9. den	0,000041	0,000041	0,000041	0,000062	0,000062	0,000063
10. den	0,000027	0,000021	0,000021	0,000041	0,000031	0,000031
11. den	0,000048	0,000048	0,000055	0,000072	0,000073	0,000084
12. den	0,000027	0,000034	0,000034	0,000041	0,000052	0,000052
13. den	0,000075	0,000069	0,000069	0,000114	0,000104	0,000105
14. den	0,000048	0,000048	0,000055	0,000073	0,000073	0,000084
15. den	0,000055	0,000048	0,000048	0,000083	0,000073	0,000074
16. den	0,000014	0,000021	0,000021	0,000021	0,000031	0,000032
17. den	0,000014	0,000014	0,000021	0,000021	0,000021	0,000032
18. den	0,000055	0,000055	0,000048	0,000083	0,000084	0,000074
19. den	0,000041	0,000048	0,000055	0,000063	0,000074	0,000085
20. den	0,000062	0,000055	0,000062	0,000094	0,000084	0,000095
21. den	0,000076	0,000076	0,000076	0,000115	0,000116	0,000117
22. den	0,000056	0,000056	0,000056	0,000084	0,000085	0,000085
23. den	0,000021	0,000021	0,000028	0,000032	0,000032	0,000043
24. den	0,000035	0,000035	0,000028	0,000053	0,000053	0,000043
Celkem	0,001164	0,001164	0,001206	0,001758	0,001768	0,001842

Fermentační zbytek vzorku č. 1 při teplotě 20 °C vyprodukoval denně v průměru 0,000049 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,000075 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.

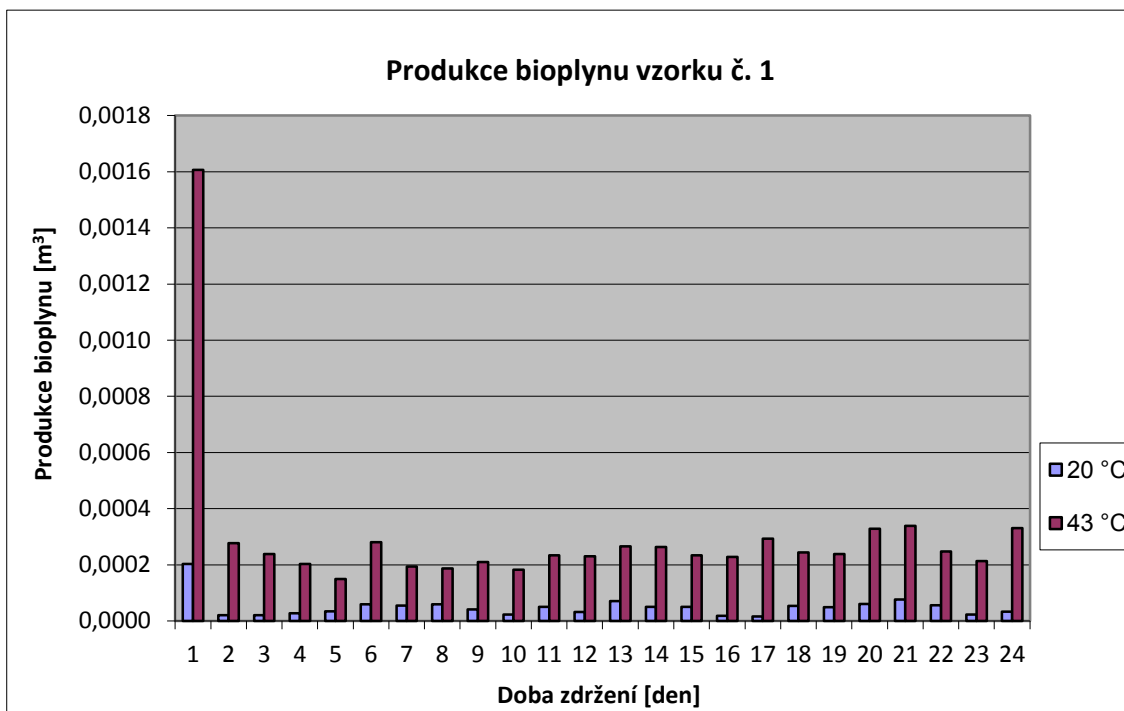
Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,001178 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,001790 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.

Tabulka č. 14 znázorňuje denní produkci bioplynu a měrnou produkci metanu vzorku č. 1 při 43 °C teplotním režimu.

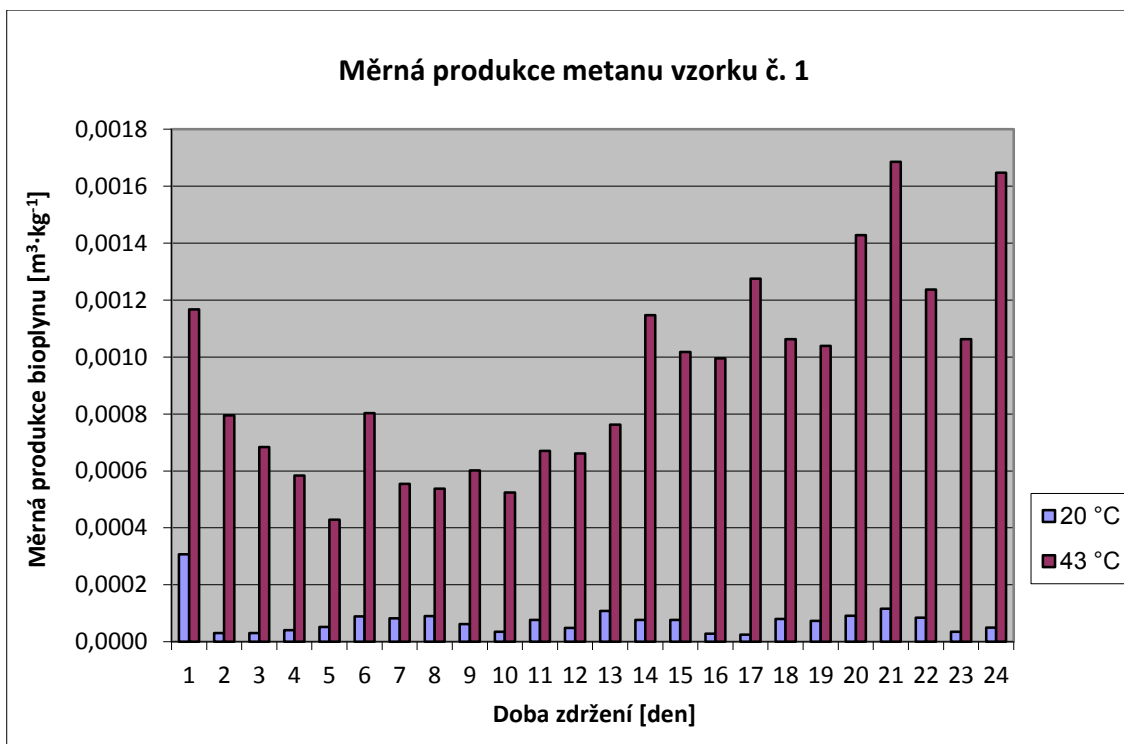
*Tabulka 14 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 1*

Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]			Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]		
	Fermentor 9	Fermentor 10	Fermentor 11	Fermentor 9	Fermentor 10	Fermentor 11
1. den	0,001628	0,001592	0,001599	0,001384	0,001216	0,000902
2. den	0,000284	0,000284	0,000263	0,000818	0,000810	0,000757
3. den	0,000245	0,000245	0,000225	0,000707	0,000700	0,000646
4. den	0,000206	0,000192	0,000212	0,000593	0,000548	0,000610
5. den	0,000152	0,000152	0,000145	0,000437	0,000433	0,000416
6. den	0,000278	0,000292	0,000270	0,000800	0,000832	0,000777
7. den	0,000196	0,000196	0,000189	0,000564	0,000559	0,000542
8. den	0,000197	0,000183	0,000183	0,000567	0,000522	0,000524
9. den	0,000205	0,000212	0,000212	0,000591	0,000606	0,000609
10. den	0,000185	0,000185	0,000178	0,000533	0,000528	0,000510
11. den	0,000236	0,000229	0,000236	0,000681	0,000654	0,000677
12. den	0,000231	0,000238	0,000223	0,000664	0,000679	0,000640
13. den	0,000268	0,000268	0,000261	0,000774	0,000767	0,000749
14. den	0,000263	0,000270	0,000257	0,001163	0,001175	0,001105
15. den	0,000231	0,000231	0,000238	0,001022	0,001006	0,001025
16. den	0,000226	0,000233	0,000226	0,000999	0,001014	0,000974
17. den	0,000297	0,000290	0,000290	0,001313	0,001262	0,001249
18. den	0,000244	0,000244	0,000244	0,001077	0,001061	0,001050
19. den	0,000239	0,000239	0,000239	0,001054	0,001038	0,001027
20. den	0,000333	0,000326	0,000325	0,001469	0,001416	0,001401
21. den	0,000331	0,000339	0,000345	0,001659	0,001681	0,001718
22. den	0,000266	0,000239	0,000239	0,001333	0,001188	0,001190
23. den	0,000199	0,000206	0,000234	0,000998	0,001025	0,001164
24. den	0,000333	0,000332	0,000326	0,001666	0,001654	0,001623
Celkem	0,007272	0,007216	0,007157	0,022867	0,022373	0,021883

Fermentační zbytek vzorku č. 1 při teplotě 43 °C vyprodukoval denně v průměru 0,00301 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,000932 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>. Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,007215 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,02237 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.



Obrázek 10 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 1



Obrázek 11 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 1

Nízký proces tvorby bioplynu z fermentačního zbytku je způsoben delší dobou zdržení vstupní suroviny ve fermentoru. Z tohoto hlediska lze usuzovat, že mikroorganismům chybí dostatek potřebných živin.

## 5.2 Výsledky vzorku č. 2

Vzorek č. 2 byl odebraný fermentační zbytek ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávající převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Celý proces vzniku bioplynu je jednostupňový s dobou zdržení 34 dní. Velikost částí siláže je před vstupem do bioplynové stanice upravena na menší velikosti.

Testovanému vzorku byla stanovena průměrná sušina 7,86 %. V průměru vzorek obsahoval 79,86 % spalitelných látek.

V tabulce č. 15 je podrobně zobrazena denní produkce bioplynu a měrná produkce metanu vzorku č. 2 z jednotlivých fermentorů při 20 °C teplotním režimu.

Tabulka 15 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 2

Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]			Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]		
	Fermentor 4	Fermentor 5	Fermentor 6	Fermentor 4	Fermentor 5	Fermentor 6
1. den	0,000666	0,000666	0,000639	0,000858	0,000810	0,000795
2. den	0,000526	0,000498	0,000526	0,000678	0,000606	0,000655
3. den	0,000344	0,000336	0,000372	0,000443	0,000409	0,000463
4. den	0,000141	0,000169	0,000155	0,000182	0,000206	0,000194
5. den	0,000220	0,000234	0,000206	0,000284	0,000285	0,000257
6. den	0,000157	0,000086	0,000164	0,000202	0,000104	0,000205
7. den	0,000165	0,000157	0,000165	0,000213	0,000192	0,000206
8. den	0,000166	0,000165	0,000180	0,000214	0,000201	0,000224
9. den	0,000137	0,000130	0,000138	0,000177	0,000158	0,000171
10. den	0,000109	0,000101	0,000116	0,000140	0,000123	0,000145
11. den	0,000153	0,000145	0,000160	0,000197	0,000177	0,000200
12. den	0,000132	0,000124	0,000124	0,000170	0,000151	0,000155
13. den	0,000154	0,000161	0,000169	0,000199	0,000196	0,000211
14. den	0,000170	0,000147	0,000162	0,000219	0,000179	0,000202
15. den	0,000169	0,000162	0,000162	0,000409	0,000381	0,000391
16. den	0,000088	0,000074	0,000088	0,000214	0,000175	0,000212
17. den	0,000184	0,000170	0,000190	0,000446	0,000400	0,000460
18. den	0,000096	0,000082	0,000068	0,000232	0,000193	0,000165
19. den	0,000110	0,000109	0,000068	0,000266	0,000258	0,000165
20. den	0,000158	0,000158	0,000220	0,000384	0,000372	0,000531
21. den	0,000180	0,000242	0,000180	0,000437	0,000570	0,000434
22. den	0,000146	0,000062	0,000153	0,000354	0,000147	0,000369
23. den	0,000140	0,000146	0,000140	0,000339	0,000345	0,000337
24. den	0,000140	0,000126	0,000133	0,000340	0,000297	0,000321
Celkem	0,004649	0,004454	0,004679	0,007598	0,006936	0,007466

Fermentační zbytek vzorku č. 2 při teplotě 20 °C vyprodukoval denně v průměru 0,000191 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,000306 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.

Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,004594 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,007333 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.

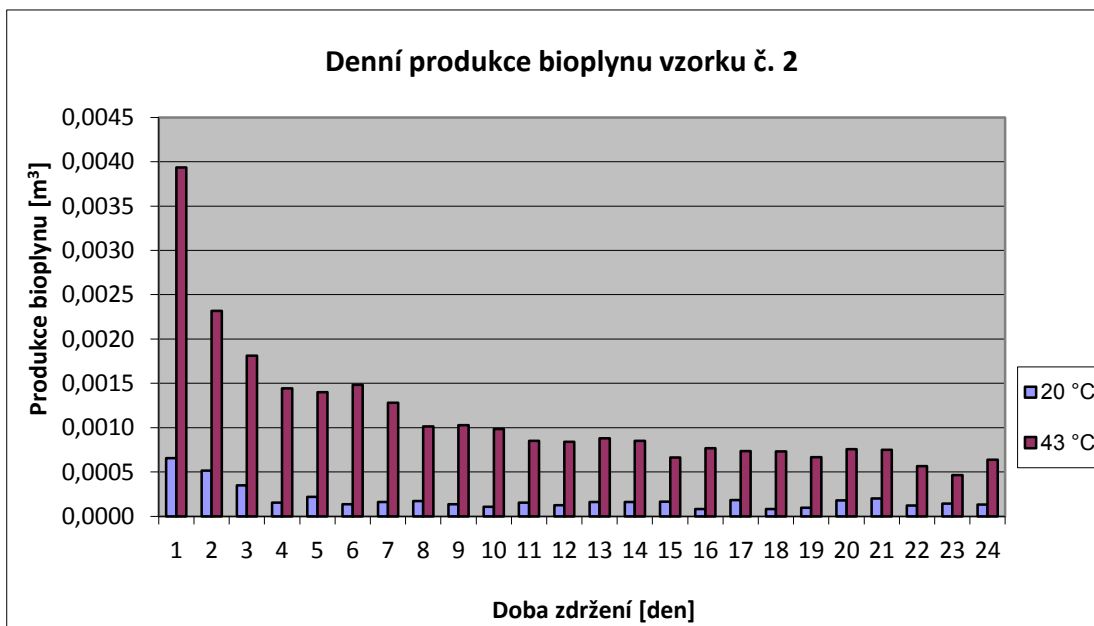
Tabulka č. 16 znázorňuje denní produkci bioplynu a měrnou produkci metanu vzorku č. 2 při 43 °C teplotním režimu.

Tabulka 16 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 2

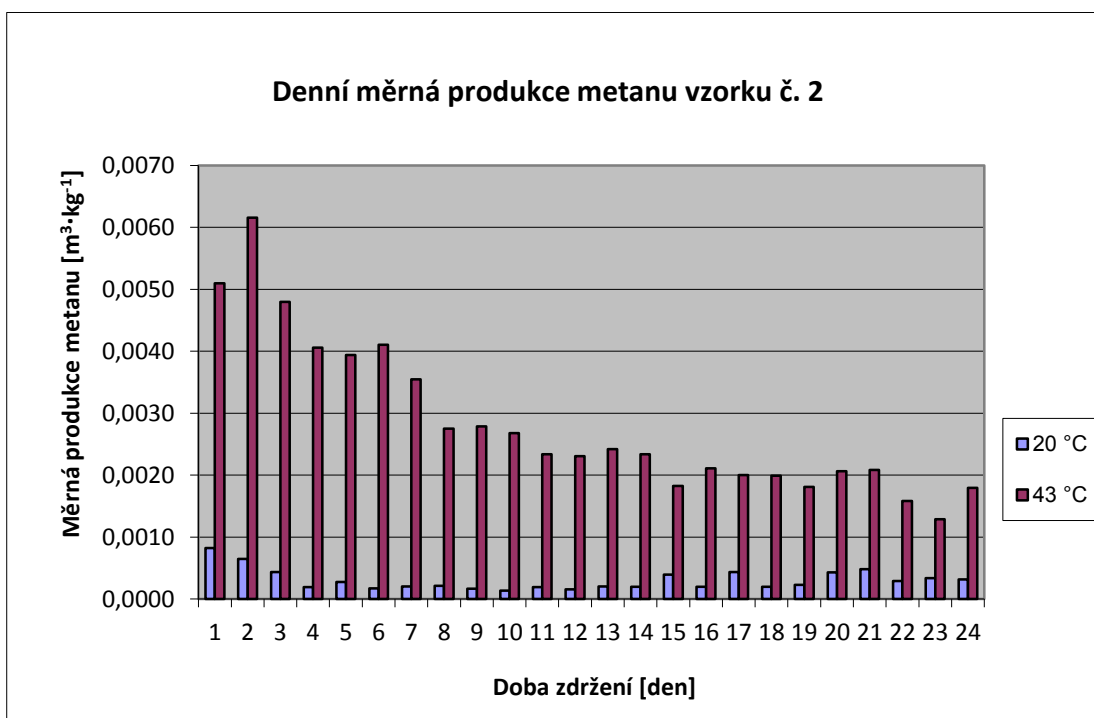
Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]			Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]		
	Fermentor 12	Fermentor 13	Fermentor 14	Fermentor 12	Fermentor 13	Fermentor 14
1. den	0,003874	0,003941	0,003994	0,004956	0,005137	0,005206
2. den	0,002262	0,002298	0,002392	0,005898	0,006103	0,006467
3. den	0,001959	0,001999	0,001474	0,005106	0,005307	0,003985
4. den	0,001381	0,001465	0,001479	0,003867	0,004174	0,004142
5. den	0,001367	0,001370	0,001459	0,003827	0,003903	0,004084
6. den	0,001451	0,001501	0,001501	0,003994	0,004129	0,004202
7. den	0,001253	0,001291	0,001298	0,003448	0,003553	0,003636
8. den	0,000997	0,001004	0,001039	0,002648	0,002759	0,002849
9. den	0,001014	0,001014	0,001051	0,002693	0,002786	0,002882
10. den	0,000978	0,000971	0,001010	0,002597	0,002667	0,002769
11. den	0,000824	0,000838	0,000886	0,002268	0,002302	0,002439
12. den	0,000810	0,000846	0,000861	0,002230	0,002324	0,002370
13. den	0,000866	0,000867	0,000905	0,002383	0,002383	0,002491
14. den	0,000804	0,000831	0,000914	0,002219	0,002271	0,002520
15. den	0,000662	0,000698	0,000636	0,001827	0,001906	0,001752
16. den	0,000754	0,000770	0,000777	0,002082	0,002103	0,002143
17. den	0,000735	0,000735	0,000735	0,002001	0,002001	0,002001
18. den	0,000724	0,000738	0,000731	0,001970	0,002008	0,001989
19. den	0,000668	0,000682	0,000646	0,001818	0,001857	0,001759
20. den	0,000754	0,000769	0,000753	0,002052	0,002093	0,002051
21. den	0,000728	0,000776	0,000742	0,002063	0,002128	0,002069
22. den	0,000548	0,000577	0,000576	0,001553	0,001582	0,001608
23. den	0,000437	0,000473	0,000480	0,001237	0,001297	0,001338
24. den	0,000604	0,000659	0,000652	0,001712	0,001839	0,001833
Celkem	0,026452	0,027114	0,026992	0,066448	0,068612	0,068588

Fermentační zbytek vzorku č. 2 při teplotě 43 °C vyprodukoval denně v průměru 0,001119 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,002828 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>. Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,026853 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,067883 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.





Obrázek 12 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 2



Obrázek 13 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 2

### 5.3 Výsledky vzorku č. 3

Vzorek č. 3 byl odebraný fermentační zbytek ze zemědělské bioplynové stanice zpracovávající převážně kukuřičnou siláž a prasečí kejdu. Významnou surovinou, která vstupuje do procesu, je obilí sklizené v mléčné zralosti (GPS). Celý proces tvorby bioplynu je prováděn dvoustupňovým systémem fermentace a doba zdržení je 50 dní.

Testovanému vzorku byla stanovena průměrná sušina 4,86 %. V průměru vzorek obsahoval 77,33 % spalitelných látek.

V tabulce č. 17 je podrobně zobrazena denní produkce bioplynu a měrná produkce metanu vzorku č. 3 z jednotlivých fermentorů při 20 °C teplotním režimu.

Tabulka 17 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 3

Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]		Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	
	Fermentor 7	Fermentor 8	Fermentor 7	Fermentor 8
1. den	0,000392	0,000406	0,000519	0,000547
2. den	0,000308	0,000301	0,000407	0,000405
3. den	0,000269	0,000283	0,000356	0,000381
4. den	0,000146	0,000167	0,000193	0,000225
5. den	0,000119	0,000119	0,000157	0,000160
6. den	0,000091	0,000105	0,000120	0,000142
7. den	0,000070	0,000070	0,000093	0,000095
8. den	0,000063	0,000063	0,000084	0,000085
9. den	0,000127	0,000134	0,000168	0,000181
10. den	0,000106	0,000113	0,000140	0,000153
11. den	0,000170	0,000171	0,000225	0,000230
12. den	0,000221	0,000164	0,000293	0,000221
13. den	0,000175	0,000175	0,000581	0,000581
14. den	0,000108	0,000122	0,000359	0,000404
15. den	0,000143	0,000211	0,000473	0,000700
16. den	0,000219	0,000110	0,000725	0,000363
17. den	0,000151	0,000199	0,000502	0,000661
18. den	0,000201	0,000215	0,000665	0,000711
19. den	0,000244	0,000244	0,000808	0,000808
20. den	0,000238	0,000239	0,000790	0,000791
21. den	0,000226	0,000226	0,000749	0,000750
22. den	0,000242	0,000235	0,000801	0,000778
23. den	0,000236	0,000251	0,000783	0,000831
24. den	0,000317	0,000311	0,001052	0,001029
Celkem	0,004584	0,004634	0,011041	0,011231

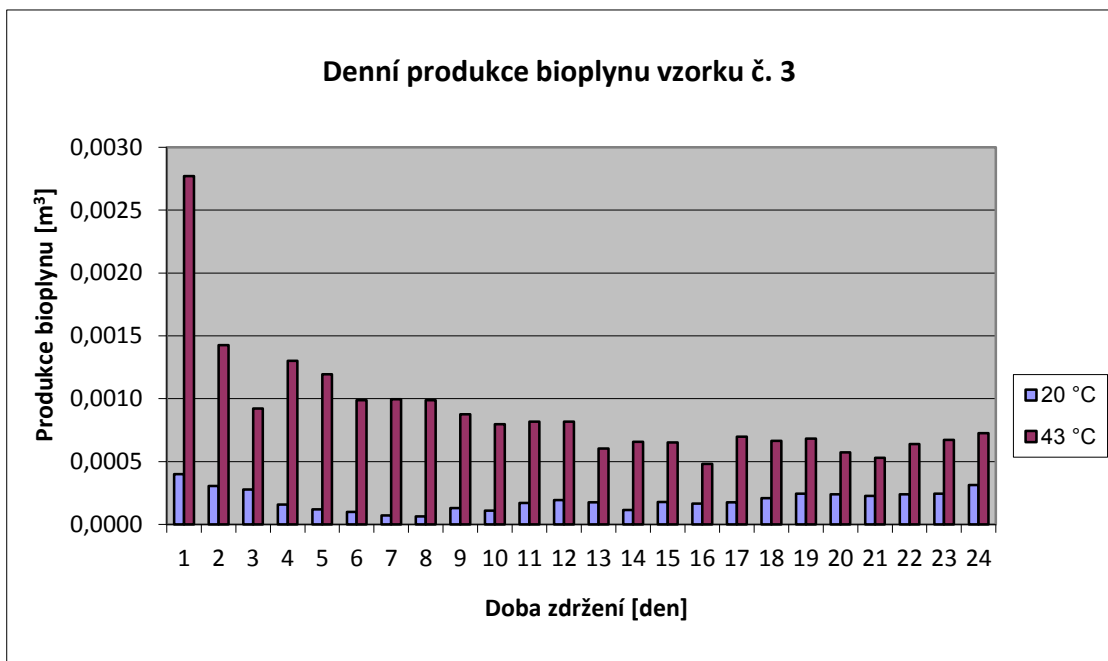
Fermentační zbytek vzorku č. 3 při teplotě 20 °C vyprodukoval denně v průměru 0,0001920 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,000464 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>. Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,004609 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,01114 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.

Tabulka č. 18 znázorňuje denní produkci bioplynu a měrnou produkci metanu vzorku č. 3 při 43 °C teplotním režimu.

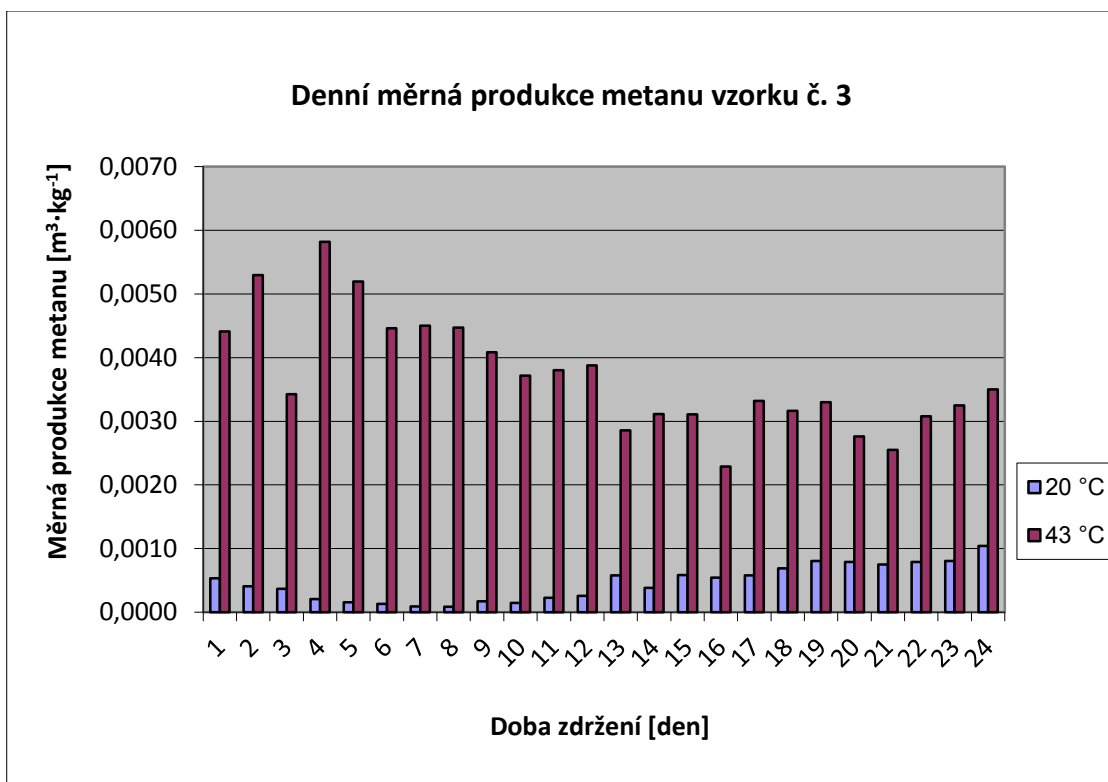
*Tabulka 18 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 3*

Den	Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]		Měrná produkce metanu [m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup> ]	
	Fermentor 15	Fermentor 16	Fermentor 15	Fermentor 16
1. den	0,002843	0,002697	0,004584	0,004240
2. den	0,001444	0,001409	0,005473	0,005113
3. den	0,000984	0,000860	0,003729	0,003122
4. den	0,001332	0,001269	0,005907	0,005730
5. den	0,001220	0,001167	0,005408	0,004985
6. den	0,001018	0,000956	0,004671	0,004254
7. den	0,001015	0,000977	0,004655	0,004349
8. den	0,001030	0,000947	0,004726	0,004213
9. den	0,000886	0,000866	0,004224	0,003944
10. den	0,000798	0,000797	0,003801	0,003632
11. den	0,000817	0,000816	0,003891	0,003718
12. den	0,000817	0,000817	0,003974	0,003783
13. den	0,000613	0,000592	0,002979	0,002739
14. den	0,000653	0,000659	0,003173	0,003052
15. den	0,000659	0,000645	0,003183	0,003029
16. den	0,000463	0,000498	0,002238	0,002337
17. den	0,000718	0,000676	0,003467	0,003170
18. den	0,000675	0,000653	0,003260	0,003064
19. den	0,000687	0,000680	0,003338	0,003261
20. den	0,000589	0,000554	0,002865	0,002659
21. den	0,000536	0,000521	0,002605	0,002500
22. den	0,000639	0,000639	0,003105	0,003053
23. den	0,000679	0,000665	0,003320	0,003182
24. den	0,000743	0,000707	0,003615	0,003382
Celkem	0,021858	0,021067	0,092194	0,086510

Fermentační zbytek vzorku č. 3 při teplotě 43 °C vyprodukoval denně v průměru 0,000894 m<sup>3</sup> bioplynu. Denní měrná produkce metanu byla v průměru 0,003723 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>. Celková průměrná produkce bioplynu za 24 dnů byla 0,02146 m<sup>3</sup>. Celková průměrná měrná produkce metanu byla 0,08935 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>.



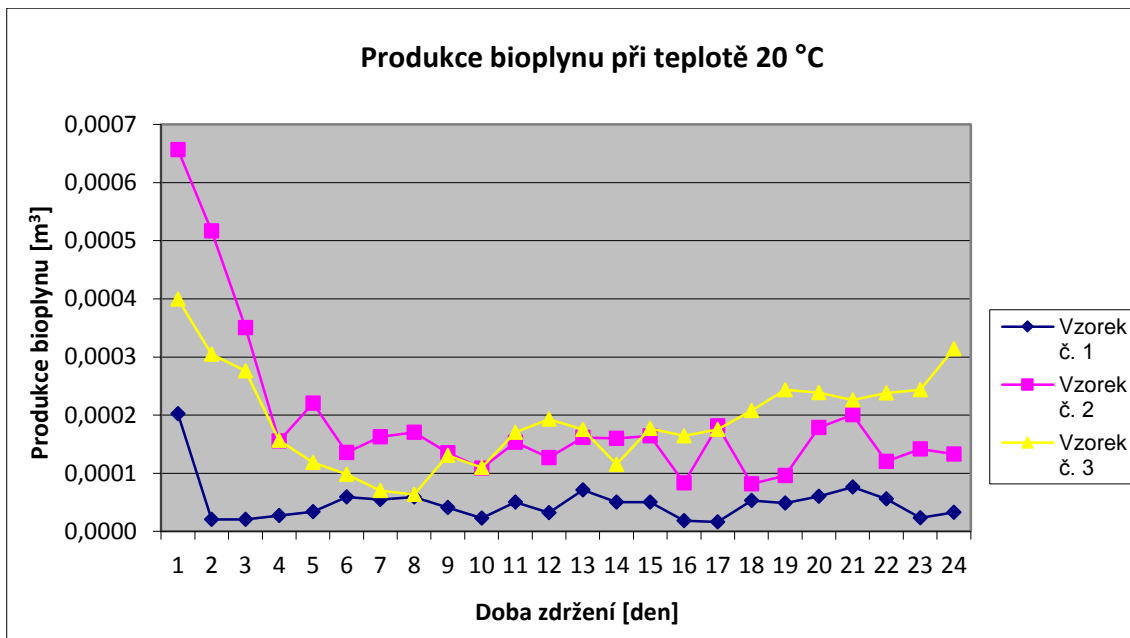
Obrázek 14 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 3



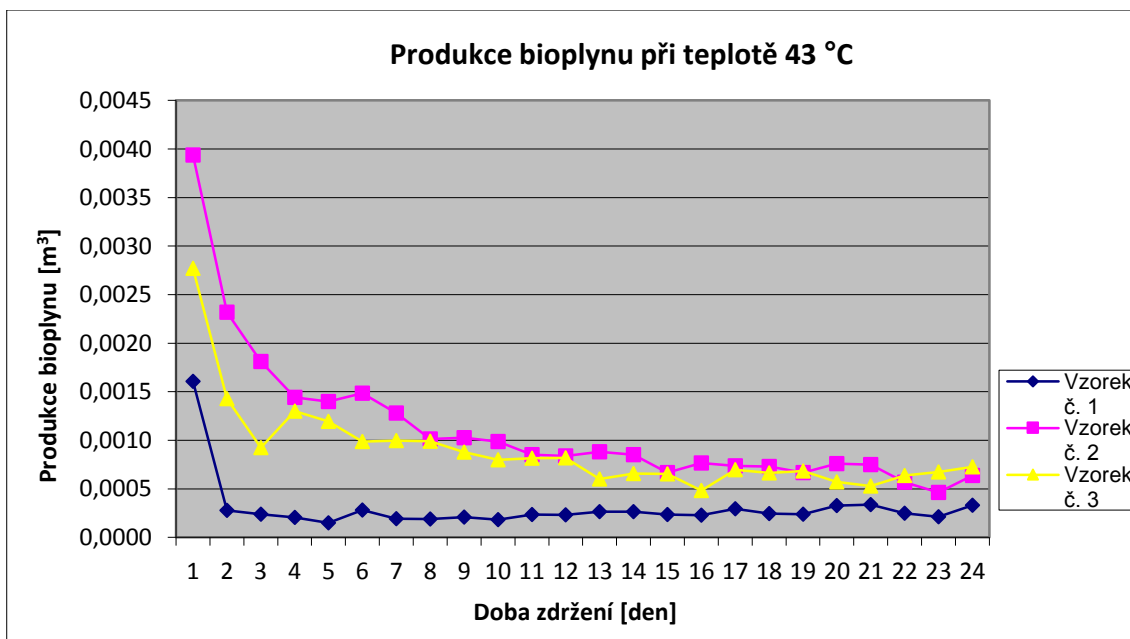
Obrázek 15 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 3

## 5.4 Souhrnné porovnání

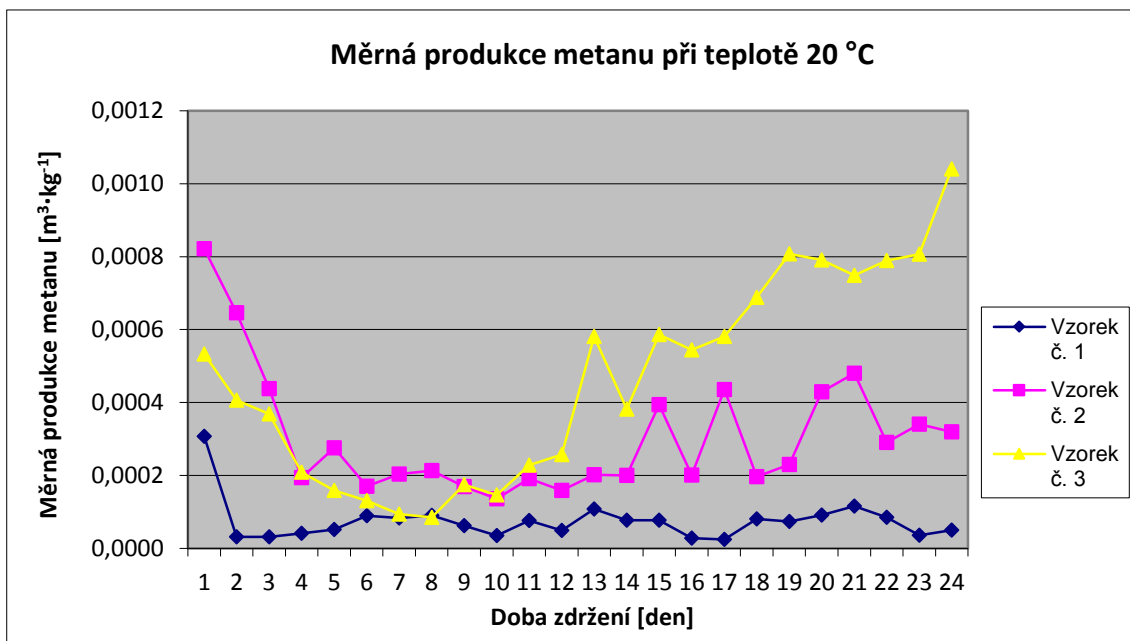
V následujících grafech je souhrnné porovnání vzorků produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotách 20 a 43 °C.



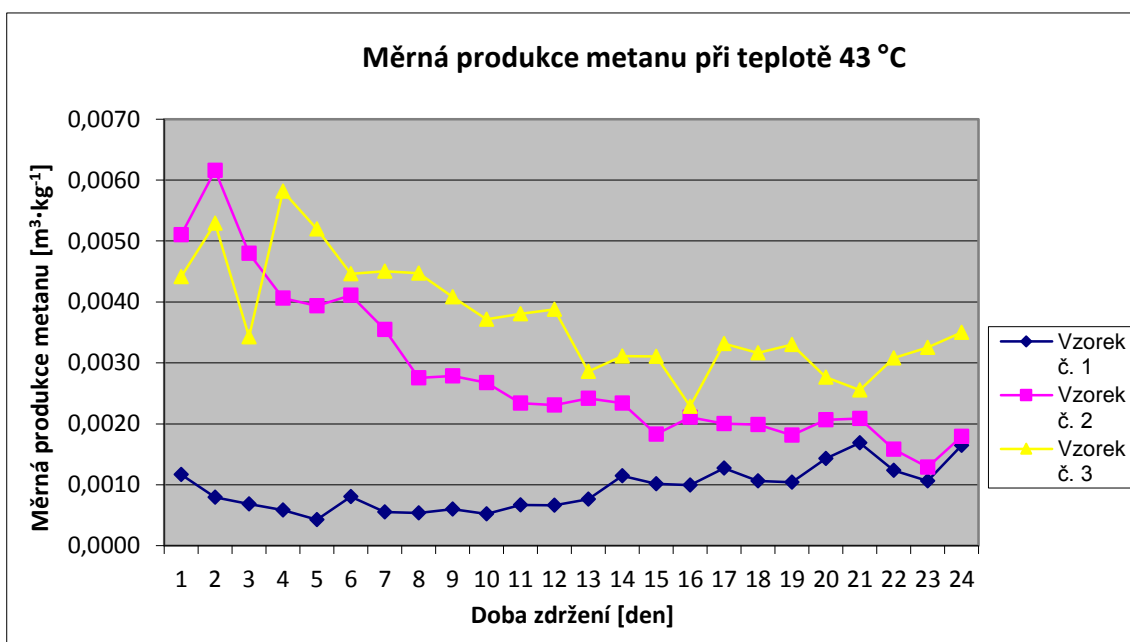
Obrázek 16 - Graf porovnání produkce bioplynu při teplotě 20 °C



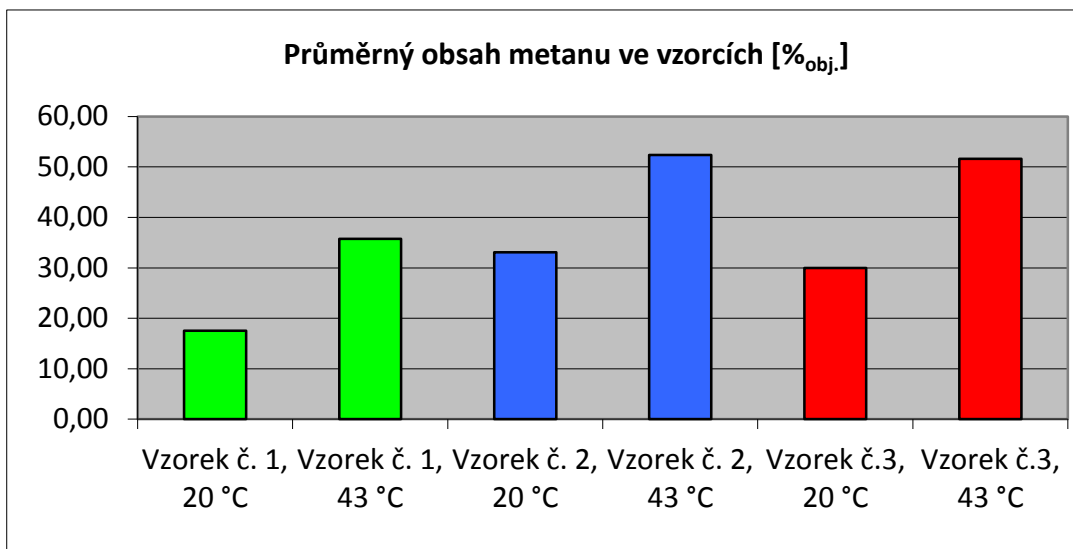
Obrázek 17- Graf porovnání produkce bioplynu při teplotě 43 °C



Obrázek 18 - Graf porovnání měrné produkce metanu při teplotě 20 °C

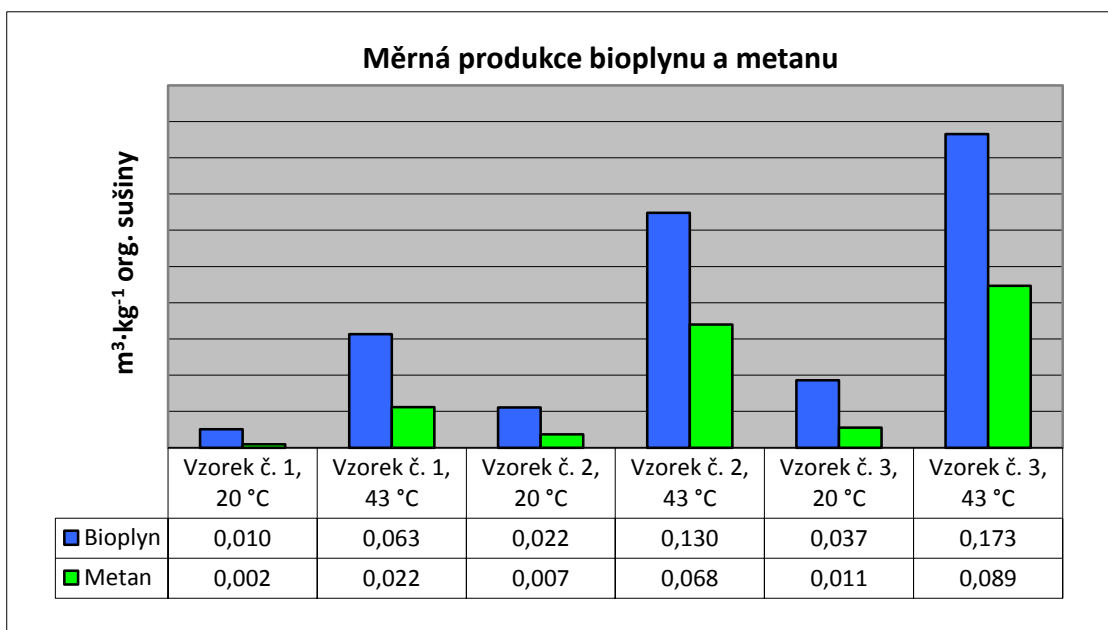


Obrázek 19 - Graf porovnání měrné produkce metanu při teplotě 43 °C



Obrázek 20 - Graf průměrného obsahu metanu ve vzorcích

Obsah metanu v bioplynu je důležitý pro spalování v kogeneračních jednotkách. Únosnost obsahu metanu v bioplynu pro spalování je přibližně 40% podíl metanu a 60% podíl oxidu uhličitého. Snížení obsahu metanu ve směsi snižuje rychlost laminárního plamene a tím nastávají problémy spojené se zhasením motoru během provozu a tím se snižuje účinnost a životnost spalovacího motoru. (Trávníček et al., 2009)



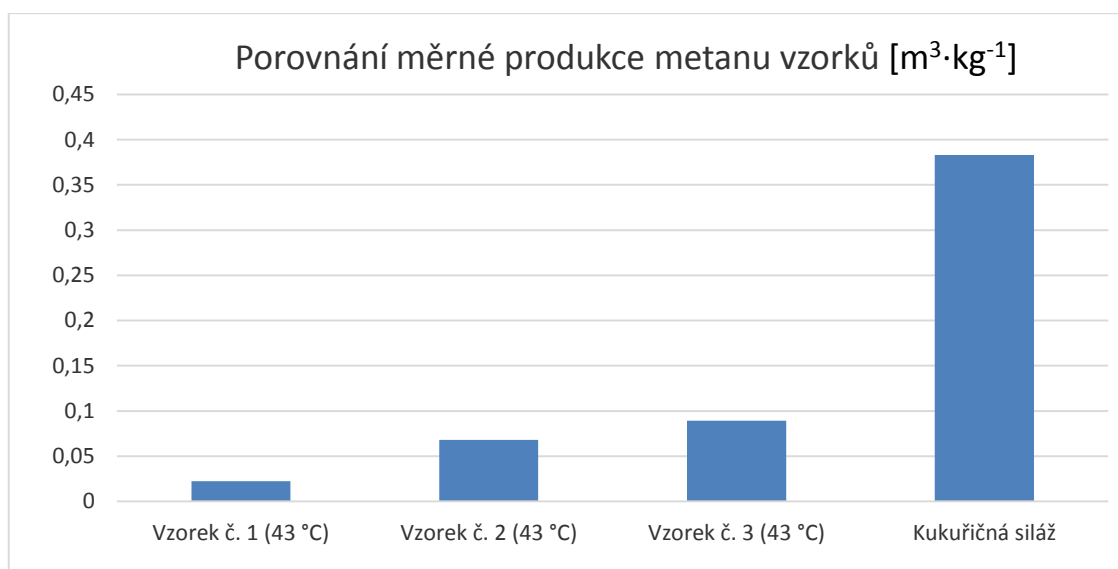
Obrázek 21 - Graf měrné produkce bioplynu a metanu vzorků

Měrná produkce metanu udává, kolik metrů krychlových metanu je za celkovou dobu testu, tedy 24 dní, vyprodukováno z jednoho kilogramu organické sušiny fermentačního zbytku.

Při vyhodnocení vzorků je zřejmá rozdílná dynamika procesu tvorby metanu. U vzorku č. 2 a vzorku č. 3 při teplotě 43 °C nedocházelo k postupnému nárůstu měrné produkce metanu. Největší nárůst měrné produkce metanu byl dosažen ihned po zahájení testování. Tento nárůst byl způsoben, že vzorek č. 2 a vzorek č. 3 obsahovaly největší množství spalitelných látek a s tím související množství rozložitelné sušiny. Tyto dva vzorky pocházely z bioplynové stanice s kratší dobou zdržení.

Na obrázku č. 22 je znázorněna měrná produkce metanu vzorků č. 2 a 3 při teplotě fermentace 43 °C se vzorkem kukuřičné siláže. Měrná produkce vzorků je přibližně 4krát nižší než u kukuřičné siláže. Vzorky při teplotě 20 °C produkují malé měrné množství metanu a nejsou významné pro další využití z finančního hlediska.

Kukuřičná siláž je nejpoužívanější materiál pro výrobu bioplynu. Hybridní veze kukuřičné siláže dosahují měrné produkce metanu  $0,383 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$  při mezofilním teplotním režimu fermentace. (Kajman et al., 2008)



Obrázek 22 - Porovnání měrné produkce metanu ke kukuřičné siláži



## 6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo provést testy fermentačních zbytků, tedy materiálů, které vystupují z bioplynových stanic, za účelem zjištění efektivity bioplynových stanic a zjištění zbytkové produkce bioplynu. Byla provedena analýza složení fermentačních zbytků pocházejících z různých bioplynových stanic a byla vytvořena metodika pro testování zbytkové produkce bioplynu s ohledem na zjištění vlivu teploty na proces a testování.

V rešeršní části byl popsán princip vzniku bioplynu v bioplynových stanicích, jeho chemické složení a problematika výroby. Na tuto část navazovala problematika týkající se fermentačních zbytků a jejich využití.

V praktické části byla vytvořena metodika pro testování fermentačních zbytků pocházejících z bioplynových stanic. Poté bylo provedeno testování fermentačních zbytků v Republikové referenční laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně v suterénu budovy Q. Laboratoř je vybavena pro nezávislé testování materiálu s ohledem na co nejpřesnější simulaci procesů, jako u reálných reaktorů bioplynových stanic.

Výsledkem je soubor naměřených dat a grafů, které byly získány pomocí analýzy fermentačních zbytků a jejich následného testování za další produkci bioplynu. Získaná data slouží k vyhodnocení produkce bioplynu v závislosti na skladbě fermentačního zbytku a procesní teplotě.

Z výsledků lze odvodit, že produkce bioplynu byla největší u vzorků č. 2 a 3 při teplotě fermentace 43 °C. Vzorek č. 2 pocházel z jednostupňové bioplynové stanice s dobou zdržení 34 dnů a vzorek č. 3 pocházel z dvoustupňové bioplynové stanice s dobou zdržení 50 dní. Oba vzorky pocházely ze zemědělské bioplynové stanice, která zpracovávala především prasečí kejdu a kukuřičnou siláž. U vzorku č. 3 vstupovalo do procesu ještě obilí sklizené v mléčné zralosti. Průměrná produkce bioplynu vzorku č. 2 při procesní teplotě 43 °C za 24 dnů byla 0,027 m<sup>3</sup>. U vzorku č. 3 při procesní teplotě 43 °C za 24 dnů byla průměrná produkce bioplynu 0,021 m<sup>3</sup>. U těchto dvou vzorků byl rovněž změřen nejvyšší obsah metanu. Vzorek č. 2 při procesní teplotě 43 °C obsahoval 52 %<sub>obj.</sub> metanu a vzorek č. 3 při procesní teplotě 43 °C obsahoval 51 %<sub>obj.</sub> metanu. Nejnižší obsah metanu v bioplynu pro spalování je přibližně 40 %<sub>obj.</sub>

Pokud srovnáme naměřené hodnoty měrné produkce metanu s hodnotami měrné produkce metanu s cíleně pěstovanými plodinami, tak zjistíme, že tyto hodnoty jsou nízké, obzvláště při procesní teplotě 20 °C. Hodnoty měrné produkce jsou velmi zajímavé z energetického hlediska. Vzorek č. 2 při procesní teplotě 43 °C měl průměrnou celkovou měrnou produkci metanu 0,068 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup> a vzorek č. 3 při procesní teplotě 43 °C měl 0,089 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup> a v porovnání s kukuřičnou siláží, která má měrnou produkci metanu 0,383 m<sup>3</sup>·kg<sup>-1</sup>, je to přibližně 4,5krát méně. Ovšem tato hodnota není špatná a je zde značný potenciál pro jímání této zbytkové produkce bioplynu. Ovšem záleží na finanční náročnosti pro zastřešení uskladňovací nádrže pro fermentační zbytek a její vyhřívání, abychom se dobrali k tomu, zda by to bylo finančně rentabilní.

Ostatní vzorky rovněž produkovaly určité množství bioplynu, ale z celkového hlediska je to zanedbatelné množství, protože produkce je nízká pro další využití a i průměrný obsah metanu je nízký.

Ze získaných dat je zřejmé, že dodatečná produkce bioplynu z fermentačních zbytků se liší v závislosti na době zdržení vstupní suroviny a procesu fermentace v reaktorech.

Na území České republiky jsou nejvíce zastoupeny zemědělské bioplynové stanice. Podle legislativního rámce tyto bioplynové stanice nemusí být zastřešeny a jímají zbytkový bioplyn. Podle provedeného testování zbytkové produkce z fermentačních zbytků vyplývá, že zastřešení skladovacích prostor pro fermentační zbytek by bylo vhodné nejen za účelem zisku bioplynu, ale i také za účelem snížení uvolňování bioplynu do atmosféry. Oxid uhličitý a metan jsou skleníkové plyny, které podporují globální oteplování. Česká republika se zavázala snížit emise skleníkových plynů v Rámcové úmluvě OSN o klimatických změnách a neměla by být opomíjena produkce skleníkových plynů ze skladování nezastřešeného fermentačního zbytku. Rovněž podle zákona o ochraně ovzduší by mělo být předcházeno znečištění ovzduší a snižování úrovně znečištění, aby bylo omezen vznik rizika na lidské zdraví, životní prostředí a ekosystémy.

## LITERATURA

Bednařík M., Šířoká M., 2000: *Fyzika pro gymnázia – Mechanika*. Praha, Prométheus, ISBN 978-80-7196-431-5.

Conerti A., Oliveira R. P. S., Torres B. R., Lodi A., Zilli M., 2009. *Biomass production and valorization by means of a two-step biological process*. *Bioresource Technology* 100, 5771-5776.

Deublein D., Steinhauser A., 2008: *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Weinheim: Wiley-VCH, ISBN 978-3-527-31841-4.

Dohányos M., 1998: *Anaerobní čistírenské technologie*. Brno: NOEL. ISBN 80-86020-19-3

Dohányos M., *Anaerobní reaktor není černou skřínkou - teoretické základy anaerobní fermentace*. *Biom.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z WWW: <[http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace?all\\_ids=1](http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace?all_ids=1)>. ISSN: 1801-2655.

Dohányos M., Zábranská J., Jeníček P., 1996: *Anaerobní technologie v ochraně životního prostředí*. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. ISBN 80-85368-90-0.

Dohányos M., *Závislost výtěžku metanu na složení a předúpravě suroviny*. *Czba.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z WWW: <<http://www.czba.cz/zavislost-vytezku-metanu-na-slozeni-a-preduprave-suroviny.html>>.

Dohányos M., *Zvyšování efektivity fermentace - nejnovější poznatky ve výzkumu a praxi*. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2016-01-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zvysovani-efektivita-fermentace-nejnovejsi-poznatky-ve-vyzkumu-a-praxi>>. ISSN: 1801-2655.

Dvořáček T., *Základní problémy přípravy a provozu bioplynových stanic v České republice*. *Biom.cz* [online]. 2008 [cit. 2016-03-03]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/zakladni-problemy-pripravy-a-provozu-bioplynovych-panic-v-ceske-republice>>. ISSN: 1801-2655.

Chen R., Roos M. M., Thong Y., 2015: *Responses of anaerobic microorganism to different culture conditions and corresponding effects on biogas production and solid digestate*. Biomass and Bioenergy 85, 84-93.

Kajman M., Štindl P., Procházka J., 2008: *Experiences with anaerobic digestion in the Czech Republic*. Příspěvek na konferenci: The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe, Norimberk

Kára J a kolektiv, 2007: *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*, VÚZT Praha, ISBN 978-80-86884-28-8.

Kára J., Koutný R., *Využití fermentačních zbytků anaerobní digesce jako paliva*. Biom.cz [online]. 2009 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-fermentacnich-zbytku-anaerobni-digesce-jako-paliva>>. ISSN: 1801-2655.

Kouřa J., 2008: *Bioplynové stanice s mokřým procesem*. 1. vydání Praha: Informační centrum ČKAIT, Metodické pomůcky k činnosti autorizovaných osob. ISBN 978-80-87093-33-7.

Koukolová V., Homolka P., Kudrna V., 2010: *Vliv strukturních sacharidů na bacheřovou fermentaci, zdraví zvířat a kvalitu mléka*. Praha: Výzkumný ústav živočišné výroby. ISBN 978-80-7403-066-6

Koutný R., *Termické využití separátu po anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných odpadů*. Biom.cz [online]. 2010 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/termicke-vyuziti-separatu-po-anaerobni-fermentaci-biologicky-rozlozitelnych-odpadu>>. ISSN: 1801-2655.

Krčálová E., Marada P., Večeřová V., Kamarád L., Dundálková P., Mareček J., *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem* [online]. 2008 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <[http://eagri.cz/public/web/file/32326/ETAPA\\_IV\\_Metodika\\_digestt\\_FV.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/32326/ETAPA_IV_Metodika_digestt_FV.pdf)>

Lewens B., 2011: *Is Digestate a Cost or Asset?*, Andigestion.

Murtinger K., Beranovský J., 2011: *Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno: Computer press, ISBN 978-80-251-2916-6.

Mužik O., Kára J., *Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR*. Biom.cz [online]. 2009 [cit. 2016-01-31]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>>. ISSN: 1801-2655.

Nařízení Komise (EU) č. 142/2011

Preissler D.; Lemmer A., Oechsner H.; Jungbluth T., 2007: *Anaerobic digestion of maize silage without manure addition*. VDI Berichte 335-340, ISBN 978-318092001-6.

Rainhart D. R., 1993: *A review of recent studies on the sources of hazardous compound emitted from solid waste landfills*. A U.S. experience. – Waste management and Research, 11, ISSN 1096-3669.

Riva C., Orzi V., Carrozi M., Acutis M., Boccasile G., Lonati S., Tambone F., D'Imporzano, Adani F., 2016: *Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts*, Science of the Total Environment 547, 206-214.

Straka F., Ciahotný K., Příbyla Z., Brandejšová E, Procházková A., Jochová E., 2008: *Informační servis GAS – Bioplyn* (InfoGas – speciál). ISSN 1212-7825

Straka F., kolektiv spoluautorů, 2010, *Bioplyn*, 3. zkrácené vydání. ISBN 978-80-7328-235-6

Schulz H., Eder B., 2004, *Bioplyn v praxi*. ISBN 80-86167-21-6

Teodorita Al Seadi, Rutz D., Prassl H., Köttner M., Finsterwalder T., 2008: *Biogas handbook*, Denmark, ISBN 978-87-992962-0-0

Tesařová M., Filip Z., 2010: *Biologické zpracování odpadů*, ISBN 978-80-7375-420-4

Trávníček P., Vitáček I. a kol., 2015: *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití*. ISBN 978-80-7509-206-9

Trávníček P., Karafiát Z.,: *Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů*. Biom.cz [online]. 2009 [cit. 2016-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kogenerace-pomoci-plynovych-spalovacich-motoru>>. ISSN: 1801-2655.

Váňa J.: *Využití digestátů jako organického hnojiva*. Biom.cz [online]. 2007 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-organickeho-hnojiva>>. ISSN: 1801-2655.

Věstník Ministerstva životního prostředí, *Metodický pokyn ke schvalování provozu bioplynových stanic a stanovování závazných podmínek provozu z hlediska ochrany životního prostředí*. Ročník XIV-Únor 2014-Částka 2. [online]. 2014 [cit. 2016-02-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.mzp.cz/www/ipcc4.nsf/b8b42dbc0c8637bac125773c0021a91e/3b5d85c3e44690e3c1257ca5003880d5?OpenDocument>>

Vítěz T., Geršl M., Mareček J., Kudělka J., Krčálová E., 2013. *Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastnosti půd*. [online]. [cit. 2016-1-27]. Dostupné z: <[http://eagri.cz/public/web/file/325087/MZE\\_fermentacni\\_zbytek\\_final\\_2013.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/325087/MZE_fermentacni_zbytek_final_2013.pdf)>

Vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv

Vyhláška č. 131/2014 Sb., vyhláška, kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv

Vyhláška č. 341/2008 Sb., vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky 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)

Vyhláška č. 382/2001 Sb., vyhláška Ministerstva životního prostředí o podmínkách použití upravených kalů na zemědělské půdě

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů

Zákon č. 254/2001 Sb., o vodách a o změně některých zákonů (vodní zákon)

Zákon č. 156/1998 Sb., Zákon o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Grafické znázornění množství využití bioplynu (Trávníček et al., 2015) ..	14
Obrázek 2 - Vliv teploty na růst mikroorganismů .....	18
Obrázek 3 - Výtěžky bioplynu z 1 kg různých materiálů (Preissler et al., 2008).....	22
Obrázek 4 - Znázornění výtěžku bioplynu v termofilním režimu v závislosti na vstupním materiálu (Schulz et al., 2004) .....	24
Obrázek 5 - Porovnání výtěžku bioplynu při různém míchání (Straka et al., 2010) .....	26
Obrázek 6 - Možnosti nakládání s fermentačním zbytkem (Trávníček et al., 2015).....	35
Obrázek 7 - Vsázkové reaktory s testovacím materiálem.....	43
Obrázek 8 - Odměrné válce pro jímání bioplynu .....	44
Obrázek 9 - Analýza složení bioplynu.....	48
Obrázek 10 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 1 .....	53
Obrázek 11 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 1 .....	53
Obrázek 12 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 2 .....	57
Obrázek 13 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 2.....	57
Obrázek 14 - Graf denní produkce bioplynu vzorku č. 3 .....	60
Obrázek 15 - Graf denní měrné produkce metanu vzorku č. 3 .....	60
Obrázek 16 - Graf porovnání produkce bioplynu při teplotě 20 °C .....	61
Obrázek 17- Graf porovnání produkce bioplynu při teplotě 43 °C .....	61
Obrázek 18 - Graf porovnání měrné produkce metanu při teplotě 20 °C.....	62
Obrázek 19 - Graf porovnání měrné produkce metanu při teplotě 43 °C.....	62
Obrázek 20 - Graf průměrného obsahu metanu ve vzorcích .....	63
Obrázek 21 - Graf měrné produkce bioplynu a metanu vzorků .....	63
Obrázek 22 - Porovnání měrné produkce metanu ke kukuřičné siláži .....	64

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Složení plynů (Rainhart, 1994) .....	12
Tabulka 2 - Výnos bioplynu a obsahu metanu (Schulz et al., 2004) .....	13
Tabulka 3 - Možné hlavní suroviny pro zpracování v zemědělských bioplynových stanicích (Metodický pokyn MŽP, 2014) .....	30
Tabulka 4 - Hygienizační podmínky (Váňa, 2007) .....	31
Tabulka 5 - Hygienizační podmínky pro fermentační zbytky pocházející z odpadů (Vyhláška č. 341/2008 Sb.).....	32
Tabulka 6 - Hygienizační podmínky pro fermentační zbytky pocházející z VŽP (Nařízení Komise (EU) č. 142/2011).....	34
Tabulka 7 - Parametry typových hnojiv z anaerobní fermentace (Vyhláška č. 131/2014 Sb.).....	36
Tabulka 8 - Limitní hodnoty rizikových prvků ve fermentačním zbytku, použitého jako hnojivo (Vyhláška č. 131/2014 Sb.) .....	37
Tabulka 9 - Průměrných přívodů živin z fermentačních zbytků. (Vyhláška č. 377/2013 Sb.).....	38
Tabulka 10 - Limitní koncentrace vybraných rizikových látek (Vyhláška č. 341/2008 Sb.) .....	39
Tabulka 11 - Mezní hodnoty koncentrací vybraných rizikových látek a prvků v kalech pro použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 382/2001 Sb.).....	40
Tabulka 12 - Mikrobiologická kritéria kalů pro použití na zemědělské půdě (Vyhláška č. 382/2001 Sb.).....	40
Tabulka 13 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 1 .....	51
Tabulka 14 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 1 .....	52
Tabulka 15 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 2 .....	55
Tabulka 16 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 2 .....	56
Tabulka 17 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 20 °C vzorku č. 3 .....	58



Tabulka 18 - Produkce bioplynu a měrné produkce metanu při teplotě 43 °C vzorku č. 3  
..... 59