



**Kofermentace biologicky rozložitelných materiálů
a čistírenských kalů**
Diplomová práce

Vedoucí práce:
Ing. Tomáš Koutný, Ph.D.

Vypracovala:
Ema Hlavenková

ZADÁNÍ

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: Kofermentace biologických odpadů a čistírenských kalů vypracovala 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 a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědoma, 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

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Tomášovi Koutnému Ph.D. za pomoc, odborné rady a čas při vedení diplomové práce. Poděkování patří i všem pracovníkům Ústavu zemědělské, potravinářské a environmentální techniky za pomoc při provádění laboratorních měření.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o využití travní seče jako vstupní suroviny pro kofermentaci s čistírenskými kaly a materiálem z druhého stupně anaerobní fermentace zemědělské bioplynové stanice. Testovaným materiálem byla travní hmota ze dvou lokalit, Brno-Líšeň a Mokrý-Horákov. Travní hmota byla testována ve formě čerstvé, zavádě travní seče a travní siláže. Fermentační testy byly provedeny v Republikové referenční laboratoři Mendelovy univerzity v Brně. V průběhu testování bylo měřeno množství bioplynu a jeho složení. Testy probíhaly při teplotě 42 °C.

U čerstvé travní hmoty vzniklo při kofermentaci s kalem průměrně 0,497 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,273 m³·kg⁻¹ metanu. Při kofermentaci s materiálem z BPS 0,474 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,252 m³·kg⁻¹ metanu.

Při testování zavádě travní hmoty vzniklo při kofermentaci s kaly 0,416 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,230 m³·kg⁻¹ metanu. S materiálem z BPS vzniklo 0,399 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,208 m³·kg⁻¹ metanu.

Kofermentace travní siláže s kalem vyprodukovala 0,466 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,277 m³·kg⁻¹ metanu. Při kofermentaci s materiálem z BPS vzniklo 0,394 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,227 m³·kg⁻¹ metanu.

Klíčová slova: bioplyn, vstupní substrát, tráva, kal, bioplynová stanice, čistírna odpadních vod, fermentační test.

ABSTRACT

This thesis deals with using of grass cutting as an entrance substrate for biogas plant used in cofermentation with sludge from waste water treatment and sludge from biogas plant. Tested materials were collected in Brno-Líšeň and Mokrá-Horákov. Grass cutting was tested as a fresh material, dry material and grass silage. Fermentation tests were realized in Republiková referenční laboratoř at Mendelova univerzita in Brno. Temperature during the testing was 42 °C.

The production of biogas from fresh grass cutting produced in cofermentation with sludge from waste water treatment was 0,497 m³·kg⁻¹, it contained 0,273 m³·kg⁻¹ of methan. The production of biogas in cofermentation with sludge from biogas plant was 0,474 m³·kg⁻¹ and 0,252 m³·kg⁻¹ of methan.

The production of biogas from dry grass cutting in cofermentation with sludge from waste water treatment was 0,416 m³·kg⁻¹ of biogas and 0,230 m³·kg⁻¹ of methan. Cofermentation of dry grass cutting with biogas plant sludge produced 0,399 m³·kg⁻¹ of biogas and 0,208 m³·kg⁻¹ of methan.

Last measurement of produced biogas from grass silage in cofermentation with waste water treatment was 0,466 m³·kg⁻¹ of biogas and 0,277 m³·kg⁻¹ of methan. Grass silage and biogas plant sewage produced 0,394 m³·kg⁻¹ of biogas and 0,277 m³·kg⁻¹ of methane.

Key words: biogas, entrance substrate, grass, sewage, biogas plant, wastewater treatment, fermentation test.

Obsah

1	ÚVOD.....	10
2	CÍL.....	12
3	LITERÁRNÍ PŘEHLED	13
3.1	Anaerobní fermentace	13
3.1.1	Hydrolyza	13
3.1.2	Acidogeneze	13
3.1.3	Acetogeneze	13
3.1.4	Metanogeneze.....	13
3.2	Parametry ovlivňující anaerobní fermentaci	14
3.2.1	Vstupní materiál	14
3.2.2	Koncentrace mikroorganismů	15
3.2.3	Velikost částic	15
3.2.4	Teplota fermentovaného materiálu.....	15
3.2.5	Vlhkost materiálu	16
3.2.6	Hodnota pH materiálu	16
3.2.7	Poměr C:N a stopové prvky	16
3.2.8	Doba zdržení.....	17
3.2.9	Míchání materiálu.....	17
3.2.10	Inhibitory v materiálu.....	17
3.3	Rozdělení bioplynových stanic	17
3.3.1	Podle zpracovávaných materiálů.....	17
3.3.2	Podle obsahu sušiny materiálu	18
3.3.3	Podle procesní teploty	19
3.3.4	Podle počtu fermentorů	19
3.4	Výstupy z bioplynové stanice	20

3.4.1	Bioplyn	20
3.4.2	Fermentační zbytek	21
3.5	Způsoby nakládání s travní hmotou, technologie a technika	21
3.5.1	Mulčování.....	21
3.5.2	Anaerobní fermentace	22
3.5.3	Kompostování	22
3.5.4	Briketování, peletování	22
3.5.5	Silážování	23
3.6	Legislativa biologicky rozložitelných odpadů	25
4	MATERIÁL A METODIKA	29
4.1	Popis laboratoře a fermentační aparatury.....	29
4.2	Obecný popis průběhu testů	31
4.2.1	Odběr vzorků.....	31
4.2.2	Odběr inokulačního materiálu	32
4.2.3	Příprava vzorků	32
4.2.4	Stanovení sušiny a podílu spalitelných látek.....	34
4.3	Zvolené látkové zatížení	35
4.4	Měření produkce bioplynu	36
5	VÝSLEDKY A DISKUZE.....	37
5.1	Složení testovaných materiálů.....	37
5.2	Vliv inokula na testovaný materiál	38
5.2.1	Čerstvá travní hmota	39
5.2.2	Zavadlá travní hmota.....	42
5.2.3	Travní siláž.....	45
5.3	Vliv konzervace materiálu na produkci bioplynu a metanu.....	47
5.3.1	Srovnání konzervovaných materiálů při kofermentaci s kaly.....	48

5.3.2	Srovnání konzervovaných materiálů při kofermentaci s materiálem z BPS	50
6	ZÁVĚR.....	52
7	ZDROJE	53
7.1	Zdroje literární	53
7.2	Právní předpisy.....	55
7.3	Zdroje internetové	56
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	57
9	SEZNAM TABULEK	58
10	SEZNAM ROVNIC.....	59
11	SEZNAM ZKRATEK	60

1 ÚVOD

V okolí lidských obydlí je kladen důraz na pěstování a udržování veřejné zeleně. Veřejná zeleň je veřejným prostranstvím dle zákona o obcích č. 128/2000 Sb. ve znění pozdějších předpisů a obec veřejně závaznou vyhláškou stanovuje způsob péče o ni. Mezi veřejnou zeleň řadíme volně rostoucí a veřejně přístupné rostliny. Veřejná zeleň v obcích plní důležité úkoly. Především ekologické, zdravotní, krajinnotvorné, půdoochranné, vodohospodářské a v neposlední řadě estetické.

Péče o veřejnou zeleň je doprovázena vznikem travní hmoty, které může vznikat i 6 tun z hektaru (Havelková, Seifrtová, 2016). Tento materiál je vhodné navracet do půdy jako hnojivo, například mulčováním, tedy ponecháním hmoty na místě seče. Materiálu však při častých sečích vzniká nadbytek, proto se nabízí použití travní hmoty jako vstupního materiálu pro bioplynové stanice. Travní hmota navíc může pozitivně ovlivňovat složení fermentačního zbytku při kofermentaci s kaly z čistíren odpadních vod.

Pro diplomovou práci byly vybrány dvě lokality. Městská část Brno-Líšeň a obec Mokrá-Horákov, katastrální území Mokrá. Obě lokality spolu sousedí a jejich zástavba je podobná. Obydlené části jsou střídány veřejnými prostranstvím se zelení. Nejčastějším prvkem veřejné zeleně v obci Mokrá-Horákov a městské části Brno-Líšeň jsou travnaté plochy. Tyto plochy jsou udržovány sečením až 10krát za rok, a tak není množství travní hmoty vzniklé pravidelnými sečemi nevýznamné. V městské části Brno-Líšeň je udržováno přibližně 834 500 m². V současné době je travní hmota z městské části Brno-Líšeň částečně ponechávána na místě seče. Je použita jako mulč, zbylé množství je odváženo firmou, která seče provádí a je použito opět jako mulč na firemních plochách. Travní hmota z obce Mokrá-Horákov je sbírána a odvážena na kompostárnu.

Travní hmota se stává odpadem v momentě, kdy se jí osoba zbavuje nebo má úmysl nebo povinnost se jí zbavit dle zákona o odpadech č. 185/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů. Stává se biologicky rozložitelným odpadem, kterým se rozumí jakýkoli odpad, který podléhá aerobnímu nebo anaerobnímu rozkladu dle zákona o odpadech. Biologicky rozložitelný odpad nese v katalogu odpadů dle vyhlášky 93/2016 Sb., ve znění pozdějších předpisů, kód 20 02 01. Biologicky rozložitelný odpad může být

zpracován především kompostováním nebo anaerobní fermentací v zařízeních tomu určených, tedy kompostárnách a bioplynových stanicích.

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití biologicky rozložitelných materiálů, konkrétně travní seče z údržby veřejné zeleně při anaerobní fermentaci s kaly z čistíren odpadních vod v Modřicích a s materiálem ze zemědělské bioplynové stanice.

2 CÍL

Cílem práce je posoudit možnosti využití biologicky rozložitelného materiálu, travní hmoty z údržby veřejných prostranství, pro výrobu bioplynu. Za tímto účelem byly vybrány dva dílčí cíle laboratorních testů anaerobní fermentace:

- posoudit vliv inokulačního materiálu (materiál ze zemědělské bioplynové stanice, kal z anaerobního čištění komunální odpadní vody) při kofermentaci s travní hmotou
- posoudit vliv konzervace travní směsi na produkci bioplynu a metanu a to ve třech variantách: čerstvá, zavadlá a silážovaná travní hmota

Vyhodnocení výsledků bude provedeno na základě měrné produkce bioplynu a metanu a koncentrace metanu v bioplynu.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentace je biochemický proces, při kterém dochází k rozkladu organické hmoty obsažené ve vstupech do BPS za pomoci velmi rozdílných kmenů mikroorganismů. Proces probíhá, jak sám název říká anaerobně, tedy bez přístupu kyslíku. Celý proces je rozdělen do 4 fází, kdy v každé fázi vzniká působením mikroorganismů produkt pro mikroorganismy působící v následné fázi. Jednotlivé fáze musí mít vhodné podmínky a parametry (Cenek,2001).

3.1.1 Hydrolýza

Při hydrolýze jsou štěpeny makromolekulární látky jako polysacharidy, bílkoviny a tuky na jednodušší látky, kterými jsou monosacharidy, aminokyseliny a mastné kyseliny. Látky jsou štěpeny hydrolyticky extracelulárními enzymy (Gerardi, 2003). Protože materiál vkládaný do fermentoru může obsahovat kyslík, jedná se o fázi fakultativně anaerobní. Fakultativně anaerobní bakterie připraví zcela anaerobní prostředí pro navazující fáze (Deublin, Steinhauser, 2011).

3.1.2 Acidogeneze

Produkty hydrolýzy jsou dále rozkládány na nižší mastné kyseliny, kyselinu octovou, propionovou, máselnou a další, oxid uhličitý a vodík. Protože jsou produkty této fáze kyselé, je pro acidogenezi typický pokles pH (Schulz, Eder, 2003).

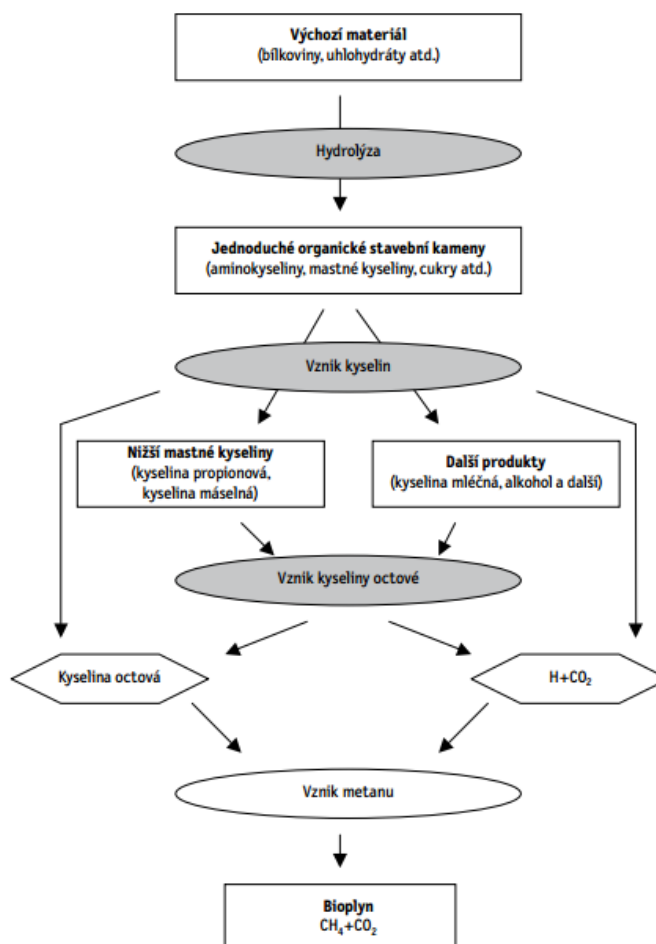
3.1.3 Acetogeneze

Z nižších mastných kyselin vzniká kyselina octová. Dalšími produkty jsou oxid uhličitý a vodík. Koncentrace vodíku je důležitým parametrem této fáze. Pokud není vodík průběžně přeměňován metanogenními mikroorganismy, acetogeneze zkolabuje a tím i celý proces (Deublin, Steinhauser, 2011).

3.1.4 Metanogeneze

Metanogeneze je poslední fází anaerobní fermentace, při které vzniká z kyseliny octové metan za striktně anaerobních podmínek. Bioplyn vzniklý z kyseliny octové je zastoupen přibližně 70 %. Metan dále v množství přibližně 30 %, vzniká syntézou vodi-

ku a oxidu uhličitého (Mata–Alvarez, 2014). Na rozdíl od autogeneze, reakce metanogeneze jsou exotermní. Generační doba metanogenních bakterií je přibližně 12 dní. Z této znalosti je stanovena doba zdržení materiálu ve fermentoru.



Obrázek 1: Shrnutí fází a produktů anaerobní fermentace (BIOM.CZ)

3.2 Parametry ovlivňující anaerobní fermentaci

3.2.1 Vstupní materiál

Cílem provozovatele BPS je co nejvíce bioplynu s dostatečným obsahem metanu. Různé materiály používané jako vstupy do BPS mají nejrůznější látkovou skladbu, rozdílně procentuálně zastoupenou. V tabulce níže je naznačena produkce a složení bioplynu vztážená na 1 kg organické sušiny (Trávníček, 2015).

Tabulka 1: Teoretická produkce bioplynu (Trávníček, 2015)

Látka	Produkce bioplynu [m ³]	Složení bioplynu CH ₄ [% obj.]
Tuky	1,10 – 1,60	80
Mono- a polysacharidy	0,75 – 0,90	54
Bílkoviny	0,60 – 0,80	60

3.2.2 Koncentrace mikroorganismů

Koncentrace mikroorganismů je závislá na jejich generační době. Nejkratší generační dobu mají acidogenní bakterie, která je méně než 24 hodin. Acetogenní bakterie mají generační dobu přibližně 85 hodin. Nejdelší generační dobou je doba pro metanogenní archea, trvá 5 až 16 dní (Schön, 1994).

3.2.3 Velikost částic

Struktura a velikost částic zpracovávaného materiálu hraje důležitou roli v účinnosti a rychlosti rozkladu. Menší částice jsou mikroorganismy rychleji rozkládány, protože je zvětšen povrch pro jejich působení.

3.2.4 Teplota fermentovaného materiálu

Mikroorganismy lze rozdělit dle jejich požadavků na teplotu prostředí. Nejvyšší růstový potenciál je od 0–70 °C.

Dle optimální hodnoty mohou být rozděleny na

- a) psychrofilní (pod 20 °C),
- b) mezofilní (25–39 °C),
- c) termofilní mikroorganismy (40–55 °C).

Mikroorganismy snášejí teploty až k 90 °C, poté hynou. Naopak při poklesu teploty pod 0°C sice přežívají, ale netvoří bioplyn. Nejčastěji je v praxi využíván mezofilní teplotní režim. V BPS je důležité udržovat stálou teplotu, jakýkoli teplotní výkyv může citlivý proces tvorby bioplynu narušit (Benda, 2012).

3.2.5 Vlhkost materiálu

Materiál pro anaerobní fermentaci musí být vlhký. Proto se materiál, který má vysoký obsah sušiny před vstupem do fermentoru mísí s kejdou, případně fugátem na výslednou sušinu pro danou technologii (Benda, 2012).

3.2.6 Hodnota pH materiálu

V průběhu všech fází vzniku bioplynu se pH mění. Většina biologických systémů pracuje při pH mezi 6-8. Každá fáze má své optimální pH, avšak vzhledem k souběžnosti procesů se pH ve fermentoru ustálí tak, aby bylo prostředí vhodné pro všechny mikroorganismy. Ke zpomalení procesu tvorby metanu zpravidla dochází při poklesu pH pod 6 během acidogeneze. Příliš vysoké pH (přibližně 8) při metanogenezi pro změnu inhibuje acidogenezi. Podle těchto skutečností, můžeme parametr pH označit jako jeden z nejlepších indikátorů stability procesu výroby bioplynu (Straka, Dohányos, 2003).

3.2.7 Poměr C:N a stopové prvky

Organický materiál je složen ze základních makroprvků. Z hlediska tvorby bioplynu jsou nejdůležitější dusík a uhlí a jejich poměr v materiálu. Ideální poměr C:N je 25–30:1. Z tabulky je patrné, že co do obsahu C:N se silážovaná tráva jeví jako vhodný vstupní materiál. Při těchto hodnotách probíhá činnost mikroorganismů nejvýhodněji.

Tabulka 2: Poměr C:N (Haider, 2015)

Vstupní materiál	Poměr C:N v sušině
Čistírenský kal	6
Kejda	14–20
Sláma	70
BRKO	18
Silážovaná tráva	14–22

Pro proces anaerobní fermentace jsou důležité i další prvky jako nikl, zinek, železo, sodík, draslík, vápník, hořčík. Ty mohou proces ovlivňovat jak pozitivně, tak při překročení mezních koncentrací inhibičně. V konečném důsledku může proces ovlivňovat i nevyváženost vstupů (Callaghan, 2002).

3.2.8 Doba zdržení

Při projektování doby zdržení je nutné zohlednit generační dobu mikroorganismů (Schön, 1994). Vhodná doba zdržení závisí na mnoha parametrech jako na typu zpracovávaného materiálu, na jeho velikosti a obsahu sušiny, provozní teplotě BPS, technologii BPS, atd. U netekuté vsázkové Technologies doba zdržení nejčastěji 30 dní a poté se jedna třetina materiálu vymění. Celková doba zdržení je přibližně 90 dní. Technologie tekuté fermentace je doba zdržení v závislosti na počtu sériově řazených fermentorů 30–60 dní.

3.2.9 Míchání materiálu

Míchání materiálu ve fermentoru je nevyhnutelné. Pokud by se materiál nemíchal, vznikla by na povrchu křusta, která by mohla zastavit celý proces a fermentor by musel být vyprázdněn, což je velmi nežádoucí. Míchání zajišťuje rovnoměrné rozprostření vstupního materiálu a homogenní fyzikální vlastnosti pro mikroorganismy.

3.2.10 Inhibitory v materiálu

Inhibitory mohou zpomalit až zastavit celý proces. Mohou to být látky přicházející do fermentoru se vstupním materiálem nebo produkty některé z fází procesu tvorby bioplynu. Inhibitory mohou být čpavek, sulfidy, sodík, draslík, hořčík, vápník, hliník, těžké kovy, desinfekční přípravky, antibiotika, insekticidy nebo herbicidy.

3.3 Rozdělení bioplynových stanic

BPS je technologické zařízení, které nabízí optimální podmínky pro přeměnu vstupních surovin – biologicky rozložitelných látek – na výstupní produkty – bioplyn a fermentační zbytek za pomoci anaerobní fermentace.

BPS můžeme dělit podle nejrůznějších parametrů. Jediným legislativně ukotveným dělením je rozdělení BPS dle zpracovaných materiálů. Ostatní rozdělení vychází z různých technologických postupů.

3.3.1 Podle zpracovávaných materiálů

Podle metodického pokynu MŽP se BPS dělí do 3 skupin:

- a) Zemědělské BPS

Tento druh BPS patří mezi nejrozšířenější a je určen ke zpracování cíleně pěstovaných energetických plodin jako je kukuřice, žito, travní siláž nebo čirok. V zemědělských BPS je možné zpracovávat také hnůj a kejdu hospodářských zvířat.

b) Čistírenské BPS

Čistírenské BPS zpracovávají pouze kaly z ČOV. Technologie anaerobní fermentace je využívána za účelem anaerobní stabilizace kalu vznikajícího v ČOV. Tato technologie dle metodického pokynu MŽP není určena ke zpracování BRO, ale slouží pouze jako součást kalového hospodářství.

To je v tuto chvíli hlavním důvodem, proč se v ČR nemísí čistírenské kaly s BRO.

c) Ostatní BPS

Ostatní BPS mohou zpracovávat BRO. Dále mohou zpracovávat vedlejší živočišné produkty, zařízení pak ale musí splňovat nařízení ES č. 1069/2009. Protože BRO je nesourodý a může obsahovat nečistoty a choroboplodné zárodky musí před vstupem do BPS projít homogenizací a hygienizací.

BPS zpracovávající čistírenské kaly a biologicky rozložitelný materiál by spadala do této kategorie.

3.3.2 Podle obsahu sušiny materiálu

a) BPS na tekuté substráty

Jedná se o nejrozšířenější technologii BPS v ČR. Vstupní materiál obsahuje maximálně 15 % sušiny. Obsah sušiny nižší než 5 % není pro technologii BPS hospodárný. Obsah sušiny vyšší než 15 % je na mezi čerpatelnosti, stěžuje tak manipulaci s materiálem (Schulz, Eder, 2004).

b) BPS na netekuté substráty

V ČR jsou provozovány pouze 2 % BPS používající tuto technologii. Vstupní materiál obsahuje více než 15 % sušiny, jedná se především o hnůj, kukuřičnou siláž a senáž.

3.3.3 Podle procesní teploty

a) 30–45 °C

Dle názvu skupiny mikroorganismů prosperujících v tomto teplotním rozmezí můžeme procesní teplotu nazývat mezofilní. Naprostá většina BPS funguje při mezofilních teplotách. Je dosaženo relativně vysokého výtěžku bioplynu a dobré procesní stability.

b) 50–60 °C

Jedná se v praxi o málo využívanou metodu a to především kvůli citlivosti termofilních mikroorganismů, náročnosti technologie na ohřev a izolaci fermentoru. Výhodou těchto provozních teplot je však hygienizace materiálu a vyšší výtěžek bioplynu (Straka, Dohányos, 2003).

3.3.4 Podle počtu fermentorů

a) Jednostupňový proces

Proces anaerobní fermentace se odehrává ve čtyřech výše zmíněných fázích. Pokud všechny čtyři fáze probíhají v jednom fermentoru, jedná se o jednostupňový proces. Fáze dosáhnou tzv. stabilizované metanogeneze, kde se v reaktoru dlouhodobě udržuje rovnováha mezi všemi navazujícími procesy.

b) Dvoustupňový proces

Alternativou je proces dvoustupňový, kdy v prvním fermentoru probíhá předně hydrolýza a acidogeneze a ve druhém fermentoru probíhá hlavně acetogeneze a metanogeneze. Fakticky v obou fermentorech probíhají všechny čtyři fáze tvorby bioplynu, ale podmínky jsou v jednotlivých fermentorech upraveny tak, aby upřednostňovaly požadované fáze, a tím maximalizovaly množství produktů pro fázi navazující. Proto je tento proces výhodný, díky možnosti vytvořit dvě různá prostředí, ve kterých je dosaženo lepších podmínek pro vyskytující se mikroorganismy, které se tak navzájem nekonkurují.

3.4 Výstupy z bioplynové stanice

3.4.1 Bioplyn

Bioplyn je látka skládající se z metanu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2). Dále může obsahovat sirovodík (H_2S), amoniak (NH_3), vodní páru (H_2O) a další minoritní plyny, např. vodík (H_2). Obsah metanu v bioplynu nabývá hodnot 50-85 %. Obsah metanu je významným ukazatel při určování výhřevnosti bioplynu (Deubline,Steinhauser, 2008)

Bioplyn je možné využívat podobně jako jiná plynná paliva. Mezi nejčastější způsoby využití bioplynu patří:

- přímé spalování
- výroba elektrické energie a ohřev teplotnosného media (kogenerace)
- výroba elektrické energie, ohřev teplotnosného media a teplo pro chlazení (trigenerace)
- pohon spalovacích motorů nebo turbín pro získání mechanické energie

4.1.1. Složení bioplynu

Z následující tabulky uvádějící chemické vlastnosti a složení bioplynu je vidět, že výhřevnost významně ovlivňuje pouze obsah metanu, který závisí především na složení vstupu a technologických parametrech BPS. Problémovou složkou bioplynu je sirovodík, který je při spalování bioplynu příčinou tvorby kyseliny sírové. Ta při kondenzaci spalin způsobuje korozi materiálu zařízení. Proto musí být sirovodík z bioplynu odstraňován.

Tabulka 3: Složení bioplynu (Pastorek, 2004)

Charakteristika	CH_4	CO_2	H_2	H_2S	CH_4 60 %, CO_2 40 %
Obj. procento [% obj.]	55-70	27-47	1	0,005	100
Výhřevnost [MJ·m ⁻³]	35,8	-	10,8	22,8	21,5
Hustota [kg·m ⁻³]	0,72	1,98	0,09	1,54	1,2

3.4.2 Fermentační zbytek

Dalším výstupem z BPS je fermentační zbytek, který sice není požadovaným výstupem, ale co se množství týče, vzniká ho nejvíce. Jedná se o zbytky organického materiálu, který mikroorganismy nevyužily.

Složení fermentačního zbytku je odrazem složení vstupních surovin, používané technologie a způsobu a doby skladování. Fermentační zbytek můžeme dělit na tekutou složku, která se nazývá fugát a pevnou složku nazývanou separát. Fugát obsahuje 6–12 % celkové sušiny, separát obsahuje přibližně 33–40 % celkové sušiny (Straka, Dohányos, 2003).

Fermentační zbytek obsahuje množství látek jako je dusík, draslík nebo fosfor, obsahuje i organický uhlík, který nebyl rozložen při anaerobní fermentaci.

Možnosti využití fermentačního zbytku jako hnojiva budou popsány dále.

3.5 Způsoby nakládání s travní hmotou, technologie a technika

3.5.1 Mulčování

Je agronomická technologie, při které se posečená travní hmota ponechává na sečené ploše. Jedná se o napodobení přirozeného lesního krytí půdy. Jako mulč lze použít kůra, štěpka, piliny, sláma, slamnatý hnůj, rašelina, listí, tráva, štěrk, oblázky nebo textilie. Možné jsou také kombinace předchozích. Při mulčování veřejné zeleně se jako nejjednodušší jeví mulčování pokosenou travní hmotou.

Mulčování je blahodárné pro travní porosty, musí však být provedeno správně. Ideální je časté kosení, kdy se tráva zkracuje maximálně o třetinu své délky a co nejsušší stav porostu. Díky tomu jsou kousky mulče velmi drobné a jednoduše se dezintegrují a propadávají mezi stávající porost. Mulčování se však nesmí používat často, nejvhodnější je použití třikrát za vegetační období, to znamená na jaře, v létě a na podzim.

Mulč působí tak, že pokryje neporostlou plochu a zabraňuje prorůstání nežádoucích plevelů. Dále napomáhá vsakování dešťové vody, snižuje se její odpařování, zvyšuje množství organické hmoty v půdě, poskytuje živiny pro půdní organismy, a tím se zvětšuje množství půdních mikroorganismů, zmírňuje denní teplotní výkyvy atp.

3.5.2 Anaerobní fermentace

Je soubor na sebe navazujících biochemických procesů zprostředkovaných mikroorganismy. Probíhá v BPS, kde jsou dodrženy vhodné podmínky pro získání bioplynu s co nejvyšším zastoupením metanu (Supaphol, 2011).

3.5.3 Kompostování

Jedná se o využívání BRO, který se za kontrolovaných podmínek aerobních procesů, tedy za přístupu vzduchu a činností mikroorganismů přeměňuje na kompost. Kompostování je proces, který zajišťuje zpětný přísun organické hmoty a rostlinných živin zpět do půdy a uzavírá koloběh látek v přírodě. Mimo přísun organické hmoty může mít kompost kladný vliv na imobilizaci těžkých kovů v půdě, pozitivně působí na zvýšenou erozi půdy a zvyšuje infiltraci půdy, takže nedochází ke snižování zásob podzemní vody, v neposlední řadě při správném dodržení technologické teploty je kompost hygienizovaný (Plíva, 2016).

Celá technologie kompostování využívá výhradně obnovitelných zdrojů, zpracovává BRO a je tedy šetrná k životnímu prostředí.

Tabulka 4: Teplotní režimy při hygienizaci kompostováním (vyhláška 341/2008 Sb.)

Technologie	Vstupy	Teplota, doba
Malé zařízení	Odpady ze zahrad a zeleně	≥ 45 °C, 5 dní
Kompostování	Odpady ze zahrad a zeleně, zbytková biomasa ze zemědělství	≥ 45 °C, 10 dní
Kompostování	Biologicky rozložitelné odpady (dle přílohy č. 1 seznam A)	≥ 55 °C, 21 dní ≥ 65 °C, 5 dní
Kompostování v uzavřených prostorách	Biologicky rozložitelné odpady (dle přílohy č. 1, seznam A)	≥ 65 °C, 5 dní

3.5.4 Briketování, peletování

Další možností energetického využití travní hmoty s vyšším stupněm lignifikace buněčných stěn je výroba fytopaliva, které je možné využít v kotelnách

na spalování stébelnin (komprimované balíky sena) nebo k výrobě briket nebo pelet, v kombinaci s dřevním odpadem, pro lokální vytápění rodinných domků (www.zahrada.web.cz). Využití suché travní fytomasy ke spalování je v ČR reálné, neboť kotelny na stébelniny se již řadu let budují a v rodinných domcích je nainstalováno cca 35 tisíc kotlů vhodných na spalování briket nebo pelet na bázi fytomasy (Biom.cz).

Při výrobě briket z travní hmoty je důležitá především vlhkost materiálu. Travní hmota musí být nejprve sušena, to ji znevýhodňuje před jinými druhy fytomasy, např. slámou obilovin nebo řepky. Na druhou stranu pro tyto slámy nalezneme i jiné uplatnění v rámci zemědělství, což o travní hmotě říci nemůžeme. Zlepšení vlastností briket dosáhneme kombinacemi s dalšími rostlinnými materiály jako jsou například ty v následující tabulce.

Tabulka 5: Mechanické a palivoenergetické vlastnosti topných briket na bázi fytomasy z trvalých travních porostů (TTP), (Biom.cz)

Složení	Hustota [kg·m ⁻³]	Popel [%]	Výhřevnost [MJ·kg ⁻¹]	Obsah S [%]	Obsah Cl [%]
TTP	720	5,21	15,81	0,09	0,23
TTP + topolová štěpka (1:1)	790	4,62	16,33	0,06	0,13
TTP + topolová štěpka (1:3)	790	4,33	16,58	0,04	0,08
TTP + energetický šťovík (1:1)	600	5,35	15,56	0,07	0,15
TTP + energetický šťovík (1:3)	820	5,42	15,43	0,06	0,11
TTP + smrková kůra (1:1)	890	4,27	16,00	0,06	0,12

3.5.5 Silážování

Silážování je vhodný způsob uchování materiálu se zachovanými živinami. Při využití travní hmoty jako vstupu do BPS jsme nuceni zajistit dodávku po celý rok, kon-

tinuálně. Od jara do podzimu není problém zásobovat BPS čerstvou travní hmotou. Problém nastává v zimních obdobích. Proto se jeví silážování jako vhodný způsob konzervace (Doležal, 2006).

Silážování je biologický proces, při kterém bakterie mléčného kvašení v anaerobním prostředí vytváří kyselinu mléčnou. Anaerobního prostředí v silážovaném materiálu je dosaženo co nejdokonalejším udusáním materiálu. V materiálu jsou obsaženy různé druhy bakterií, které fermentují materiál. Jsou to enterobakterie, klostridie a bakterie mléčného kvašení. Při správné rovnováze bakterií produkty mléčného kvašení zcela inhibují zbylé bakterie. V důsledku vzniku kyseliny mléčné vzniká v siláži kyselé pH hodnoty přibližně 4 a spolu s anaerobním prostředím je bakteriím a plísním nastaveno nepříznivé prostředí pro jejich růst. Tím dochází ke konzervaci materiálu s minimálním znehodnocením původního materiálu. Proces úspěšného silážování je ovlivněn několika faktory.

Při silážování materiálů s nízkým obsahem sušiny (nižší než 25 %) je nutné dosáhnout co nejnižšího pH, aby byla siláž stabilní. Při vyšším obsahu sušiny může být pH vyšší. Důvodem je vyšší osmotický tlak.

Materiály s vysokým obsahem vody jsou hůře stlačitelné, proto roste riziko inhibice procesu kyslíkem, a tím se zvyšuje riziko nárůstu nevhodných bakterií.

Pufrační kapacita je měřítkem, kolik kyselin bakterie potřebují produkovat, aby dostatečně snížily pH. Význam např. vojtěška a jetel jsou bohaté na dusíkaté látky, mají vyšší pufrační kapacitu, naopak tráva a kukuřice nižší. Plodiny s vysokou pufrační kapacitou vyžadují delší dobu fermentace, aby se pH snížilo pod kritickou hodnotu a vytvořil se stabilní stav. Jsou proto obtížněji silážovatelné ve srovnání s plodinami s nízkou pufrační kapacitou. Nebezpečí u obtížně silážovatelných plodin je, že snížení pH nebude dostatečné a povede ke znehodnocení materiálu (www.nutrivet.cz).

3.6 Legislativa biologicky rozložitelných odpadů

Zákon o odpadech č. 185/2001 Sb. ve znění pozdějších předpisů

- Přináší obcím základní povinnost odděleného sběru bioodpadů. Dále obsahuje požadavky týkající se sběru a zpracování bioodpadů.
- § 12 stanovuje obecné povinnosti při nakládání s odpady,
- § 16 stanovuje povinnosti původců odpadů.
- § 32 a § 33 definuje kal z ČOV a BRO a povinnosti při zpracování těchto odpadů

Vyhláška č. 321/2014 Sb., o rozsahu a způsobu zajištění odděleného soustředování složek komunálních odpadů

- v § 2 upravuje rozsah a způsob zajištění odděleného soustředování složek bioodpadů.

Vyhláška č. 93/2016 Sb. Katalog odpadů,

- V příloze 1 jsou zařazeny a rozděleny BRO. BRO má kód 20 02 01.

Vyhláška č. 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady ve znění pozdějších předpisů

- V příloze 1 je obsažen seznam využitelných bioodpadů
- V příloze 2 jsou obsaženy technologické požadavky na anaerobní fermentaci BRO
- V příloze 4 jsou náležitosti provozního řádu zařízení
- Příloha 5 obsahuje hodnocení a kontrolu výstupů ze zařízení. Jsou zde uvedeny znaky jakosti rekultivačního digestátu

Tabulka 6: Hodnocení a kontrola výstupů ze zařízení (vyhláška č. 341/2008 Sb.)

Znaky jakosti	Jednotky	Hodnota znaku jakosti
Vlhkost	% hm.	max. 98,0
Celkový dusík jako N přepočtený na vysušený vzorek	% hm.	min. 0,3
pH	-	6,5-9,0

- Pokud je provozována ostatní BPS (nezpracovávající VŽP), nalezneme v příloze 5 pokyn k provádění kontrol s mezními hodnotami:

Tabulka 7: Provádění kontrol, mezní hodnoty mikroorganismů (vyhláška 341/2008 Sb.)

Indikátorový mikroorganismu	Výstup	Jednotky	Počet zkoušených vzorků při každé kontrole výstupu	Limit (nálezy/ KTJ)	
Salmonella spp.	Rekultivační kompost/rekultivační digestát	nález v 50 g	5	negativní	
Termotolerantní koliformní bakterie	Rekultivační kompost/rekultivační digestát	KTJ v 1 gramu	5	2	<10 ³
				3	<50
Enterokoky	Rekultivační kompost/rekultivační digestát	KTJ v 1 gramu	5	2	<10 ³
				3	<50

- Příloha 6 obsahuje rozdělení výstupů do skupin podle způsobu jejich využití

Vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady

- Příloha 5 obsahuje seznam odpadů, které je zakázáno ukládat na skládky všech skupin. Ukládání bioodpadů na skládky je zakázáno vyhláškou 294/2005 Sb. V této vyhlášce se v § 4 odstavce 4 odkazuje na přílohu

č. 5, kde se v odstavci B v čísle 4 zakazuje ukládat biologicky rozložitelné odpady. Bioodpady mohou být ukládány pouze tehdy, jedná-li se o biologicky rozložitelné složky obsažené v komunálním odpadu (skupiny 20 Katalogu odpadů)

- Pro tento druh odpadů je stanoven harmonogram postupného omezování jejich ukládání na skládky. Harmonogram je stanoven v bodě 7, odstavci d) v příloze č. 4. Tam je napsáno, že: d) biologicky rozložitelný podíl komunálního odpadu ukládaný na skládky musí být postupně omezován v souladu s harmonogramem stanoveným v Plánu odpadového hospodářství ČR a krajů (cílem je snížit tento podíl do roku 2010 na 75 %, do roku 2013 na 50 % a do roku 2020 na 35 % celkového množství (hmotnosti) biologicky rozložitelného komunálního odpadu vzniklého v roce 1995).

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 upravuje použití fermentačního zbytku ze zemědělských BPS společně se zákonem o hnojivech č. 156/1998 Sb., pokud je používán mimo pozemky vlastníka BPS. Hnojivo musí být registrované u ÚKZUZ a dále je řízeno vyhláškou č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu použití hnojiv.
- Příloha č. 3 obsahuje typy hnojiv, fermentační zbytek ze zemědělské BPS se řadí do tabulky:

Tabulka 8: Druh hnojiva, organická a organominerální hnojiva (vyhláška č. 131/2014 Sb.)

Typ	Označení typu	Minimální obsah živin	Součásti určující typ, formy a rozpustnost živin	Hodnocené součásti a další požadavky	Složení, způsob výroby	Zvláštní ustanovení
18.1	organické hnojivo	e) digestát 3-13 %	Sušina		výhradně z krmiv a statkových hnojiv	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu
		0,3 % N	celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku		
		f) digestát – fugát <3 %	Sušina		výhradně z krmiv a statkových hnojiv	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, tekutý podíl po separaci, svým charakterem může vykazovat působení minerálního hnojiva
		0,1 % N	celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku		
		g) separovaný digestát			výhradně z krmiv a statkových hnojiv	hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu, tuhý podíl po separaci

NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1069/2009, ze dne 21. října 2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě ve znění pozdějších předpisů

- Stanovuje podmínky pro provozování zařízení BPS zpracovávající živočišné odpady nebo VŽP (nevztahuje se na statková hnojiva).

4 MATERIÁL A METODIKA

Testy vybraných materiálů technologií anaerobní fermentace byly provedeny v Celorepublikové referenční laboratoři bioplynových transformací v Brně, na Mendelově univerzitě.

4.1 Popis laboratoře a fermentační aparatury

Laboratoř se nachází v přízemí budovy Q, v areálu MENDELU. V laboratoři jsou dva typy fermentoru. Laboratoř je založena na principu normy VDI 4630.

Prvním typem fermentoru je válcovitá nádoba o objemu 0,120 m³. Každá z těchto nádob je vybavena míchadlem, teploměrem a plynoměrem. Nádoby jsou vyhřívány na danou teplotu a automaticky promíchávány. Proto je tento laboratorní proces anaerobní fermentace téměř totožný se skutečnými podmínkami. V laboratoři se nachází 8 kusů těchto fermentoru.

Druhým typem fermentoru jsou skleněné nádoby o objemu 0,005 m³. Laboratoř provozuje 24 kusů těchto fermentorů.

Skleněné nádoby jsou umístěny ve vanách vyhříváných na danou teplotu dle volby technologie. Voda může být ohřívána na teplotu 25–70 °C a je promíchávána čerpadlem. Testy jsou prováděny v mezofilním režimu. Aby nedocházelo k nežádoucímu chladnutí vody, je celá vana tepelně izolovaná. Dále je přikryta víkem, aby nedocházelo k odparu vody a kontaktu fermentovaného materiálu se světlem. Víkem skleněné nádoby umístěné ve vaně je vedena hadice k odměrnému skleněnému válci. Skleněný válec slouží jako plynojem.

Válec je naplněn roztokem destilované vody, chloridu sodného, kyseliny sírové a methyloranží. Tento roztok eliminuje rozpustnost sledovaných plynů a zabraňuje nepřesnosti měření. Methyloranž je do roztoku přidávána ke snadnější viditelnosti při měření.

Válec je hadicí připojen na nádrž, která je umístěna nad aparaturou. Sem je vznikajícím bioplynnem vytlačován roztok. Skleněný válec je opatřen hadicí k připojení analyzátoru. Všechny součásti aparatury jsou plynotěsné a sebemenší netěsnost znehodnotí celé měření.

Pro měření bioplynu je použit analyzátor bioplynu Combimass GA-m pro měření obsahu metanu, který měří obsah CH_4 , CO_2 , O_2 v % obj. a H_2S v ppm.

Laboratoř je vybavena váhami RADWAG AS 220/C/2, elektrickou sušárnou VENTICELL Standard 111, ve které se stanovuje sušina a muflovou pecí LMH 07/12 pro stanovení spalitelných látek.



Obrázek 2: Fermentory o objemu $0,120 \text{ m}^3$



Obrázek 3: Fermentory o objemu 0,005 m³

4.2 Obecný popis průběhu testů

4.2.1 Odběr vzorků

Vzorky pro fermentační test byly odebrány ve dvou lokalitách a to v městské části Brno-Líšeň a obci Mokrá-Horákov, katastrální území Mokrá. Lokality byly vybrány z důvodu snadné dostupnosti, do jisté míry podobné zástavbě, tudíž podobnou skladbou veřejných ploch a blízkou vzdáleností obou lokalit (homogenita travních porostů).

Vzorky byly odebírány na jaře, v létě a na podzim roku 2016. Odběr vzorků korespondoval s prováděním travních sečí v obou lokalitách.

Bylo zvoleno testování tří typů materiálu: čerstvá hmota, zavadlá hmota a travní siláž. Protože provoz BPS probíhá celoročně a travní seč je sezonním materiálem, je potřeba zajistit jeho trvalý přísun. Proto byla do testování zařazena zavadlá hmota a travní siláž.

4.2.2 Odběr inokulačního materiálu

Pro fermentační testy byl použit kal z ČOV v Modřicích, konkrétně čistírenský kal z anaerobní stabilizace kalů a obsah fermentoru druhého stupně fermentace ze zemědělské bioplynové stanice v Čejči. Ten je odebírán neprodleně před začátkem testování 2–3 silnými muži přímo v místě vzniku.

4.2.3 Příprava vzorků

Vzorky čerstvé travní hmoty nebyly před samotným testováním nijak upravovány. Tráva byla míchána už během pokosu v zásobníku žacího stroje a poté opět při sběru materiálu. Důvodem bylo co největší napodobení běžného provozu BPS bez úprav vstupních materiálů. Stébla měla délku do 0,1 m. Pokud nebylo možné testovat čerstvý materiál ihned, byl materiál zamrazen.

Zavadání probíhalo v zastřešené hale bez vytápění za teploty okolí, kde tráva zavadala 30 dní na volné ploše ve vrstvě vysoké přibližně 0,1 m.

Silážování hmoty probíhalo v trubce z PVC a PP o délce 1 m a průměru 0,125 m. Trubka byla na obou koncích vzduchotěsně uzavřena. Ve spodní části trubky bylo vytvořeno dvojité preformované dno, aby mohla odtékat silážní tekutina, která při procesu vzniká.

Ke vzduchotěsnému uzávěru umístěném v horní části byla připevněna hadice, která odváděla vznikající CO₂ přes vodní sloupec. Celá aparatura umožňuje anaerobní podmínky pro správný postup vzniku kvalitní siláže.



Obrázek 4: Příprava travní siláže



Obrázek 5: Výsledná travní siláž před dávkováním do reaktoru

4.2.4 Stanovení sušiny a podílu spalitelných látek

Stanovení sušiny a podílu spalitelných látek proběhlo u všech testovaných materiálů včetně použitého inokula. Stanovení probíhalo v době zahájení testu pro přesné výsledky. Sušina a podíl spalitelných látek se provádělo ve třech opakováních. Sušení materiálu je řízeno normou ČSN EN 14346.

Navážka materiálu je vkládána do předem čistých, suchých a zvážených keramických kelímků. Údaj o hmotnosti prázdného kelímku je zaznamenán a poté je zvážena hmotnost kelímku s materiálem. I ta je zaznamenána. Poté jsou kelímky umístěny do sušárny. Tam jsou sušeny po dobu 24 hodin při teplotě 105 °C. Dále byly kelímky s vysušeným materiálem opět zváženy. Z následujícího vztahu je stanovena sušina vzorku:

Rovnice 1: Výpočet sušiny materiálu

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

kde m_1 je hmotnost prázdného kelímku [kg],

m_2 hmotnost kelímku s naváženým vzorkem [kg],

m_3 hmotnost kelímku s vysušeným vzorkem [kg].

Ke stanovení spalitelných látek se používá muflová pec, kam se vkládají vysušené vzorky a jsou žihány při 550 °C. Po vyžihání jsou vzorky zváženy a hodnoty zaznamenány. Obsah spalitelných látek se též nazývá organická sušina. Obsah spalitelných látek potom vypočteme vztahem:

Rovnice 2: Výpočet spalitelných látek v materiálu

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

kde m_1 je hmotnost prázdného kelímku [kg],

m_3 hmotnost kelímku s vysušeným vzorkem [kg],

m_4 hmotnost kelímku s vyžiháným vzorkem [kg].

4.3 Zvolené látkové zatížení

Biologicky rozložitelné materiály bývají velmi proměnlivé, co se složení týče. Travní seč je složena z více druhů trav o různém složení, proto není jednoduché zvolit správné látkové zatížení. Vhodné látkové zatížení se odvíjí od použité technologie a vstupních materiálů. Od látkového zatížení se dále odvíjí množství vstupních materiálů použitých při anaerobní fermentaci.

Z pohledu maximální produkce metanu, dle velikosti fermentoru, je co nejvyšší dávka vstupů nejvýhodnější. Avšak pokud je ve fermentoru překročeno určité látkové zatížení, může dojít k narušení procesu tvorby metanu, a tím k nežádoucímu poklesu jeho produkce. Dalším problémem může být změna zastoupení mikrobiálního osídlení fermentoru, která může vést až k inhibici celého procesu tvorby bioplynu, resp. metanu (Feitkenhauer, 2002).

4.4 Měření produkce bioplynu

Vzorky byly nadávkovány do fermentoru ve dvou opakováních. Stejně byl nadávkován i inokulační materiál. Poté jsou fermentory promíchány a uzavřeny. Produkce bioplynu a jeho složení je měřeno denně a ve stejný čas.

Materiál byl fermentován po dobu 20, 21 a 22 dní při teplotě 42 °C.

Rovnice 3: Přepočet produkce bioplynu na fyzikálně normální podmínky

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

V_n	- objem bioplynu za fyzikálně normálních podmínek	$[\text{m}^3]$
T_0	- fyzikálně normální termodynamická teplota	$[\text{K}]$
T_n	- změřená termodynamická teplota	$[\text{K}]$
e	- kalibrační konstanta měřicího systému	$[\text{dm}^3 \cdot \text{cm}^{-1}]$
h_n	- výška odečtené hladiny	$[\text{cm}]$
p_a	- atmosférický tlak	$[\text{Pa}]$
h_k	- výšková konstanta měřicí trati	$[\text{m}]$
ρ	- hustota zásobní kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
g	- tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole je popsáno testování materiálů. Testování probíhalo ve třech termínech. První termín byl 28. 9. – 17. 10. 2016 (20 dní), druhý termín 28. 9. – 19. 10. 2016 (22 dní) a poslední termín 16. 2. – 3. 3. 2017 (21 dní). Testováno bylo celkem 10 vzorků z městské části Líšeň a z katastrálního území Mokrá. Testování proběhlo s dvěma typy inokula, s čistírenským kalem z anaerobní stabilizace z ČOV v Modřicích a obsahem fermentoru druhého stupně fermentace ze zemědělské BPS v Čejči. Testy probíhaly v mezofilním režimu teplot, při teplotě 42 °C. Současně byly testovány samotná inokula pro zjištění produkce bioplynu a metanu u vlastního materiálu.

5.1 Složení testovaných materiálů

Složení testovaných materiálů je uvedeno v tabulkách 6, 7 a 8. Zatím co u zavdlé travní hmoty a siláže byla sušina materiálu velmi podobná, u vzorků čerstvé travní hmoty se sušina lišila v období stejné seče o 100 %. Naopak ztráta žiháním u vzorků čerstvé travní hmoty kolísala oproti sušině jen málo, 5–8 %. Popsané rozdíly mohly být způsobeny druhovou rozmanitostí trav, která má různou schopnost vázat a zadržovat vodu.

Tabulka 9: Složení čerstvé travní hmoty

Vzorek	Místo	Seč	Sušina [%]	Spalitelné látky [%]
Čerstvá travní hmota	Líšeň	1. seč	21,70	88,26
Čerstvá travní hmota	Mokrá	1. seč	14,04	80,94
Čerstvá travní hmota	Mokrá	2. seč	35,28	88,56
Čerstvá travní hmota	Líšeň	2. seč	17,57	83,83
Čerstvá travní hmota	Líšeň	3. seč	22,79	85,13

Tabulka 10: Složení zavadlé travní hmoty

Vzorek	Místo	Seč	Sušina [%]	Spalitelné látky [%]
Zavadlá travní hmota	Líšeň	2. seč	90,98	86,63
Zavadlá travní hmota	Mokrá	2. seč	91,50	86,71

Tabulka 11: Složení travní siláže

Vzorek	Místo	Seč	Sušina [%]	Spalitelné látky [%]
Travní siláž	Mokrá	2. seč	32,10	89,48
Travní siláž	Mokrá	3. seč	34,63	64,00
Travní siláž	Líšeň	3. seč	31,73	64,50

5.2 Vliv inokula na testovaný materiál

Jako jeden z cílů bylo stanovení vlivu inokula na produkci bioplynu a metanu z testovaného materiálu. Jako inokulum byly použity dva materiály a to kal z čistírný odpadních vod a materiál z druhého stupně fermentace zemědělské BPS. Srovnání je provedeno u čerstvé travní hmoty, zavadlé travní hmoty a travní siláže. V grafech je modře vyznačena produkce bioplynu a červeně produkce metanu. Produkce je uváděna v $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ organické sušiny, tedy na podíl spalitelných látek. Dále je uváděno procentuální zastoupení metanu.

5.2.1 Čerstvá travní hmota

Nejvíce bioplynu, resp. metanu vzniklo u první seče z Mokré při kofermentaci s kalem, $0,655 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu a $0,352 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ metanu. Oproti stejnému materiálu avšak s inokulem z BPS se liší jen málo, o $0,041 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu a $0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ metanu.

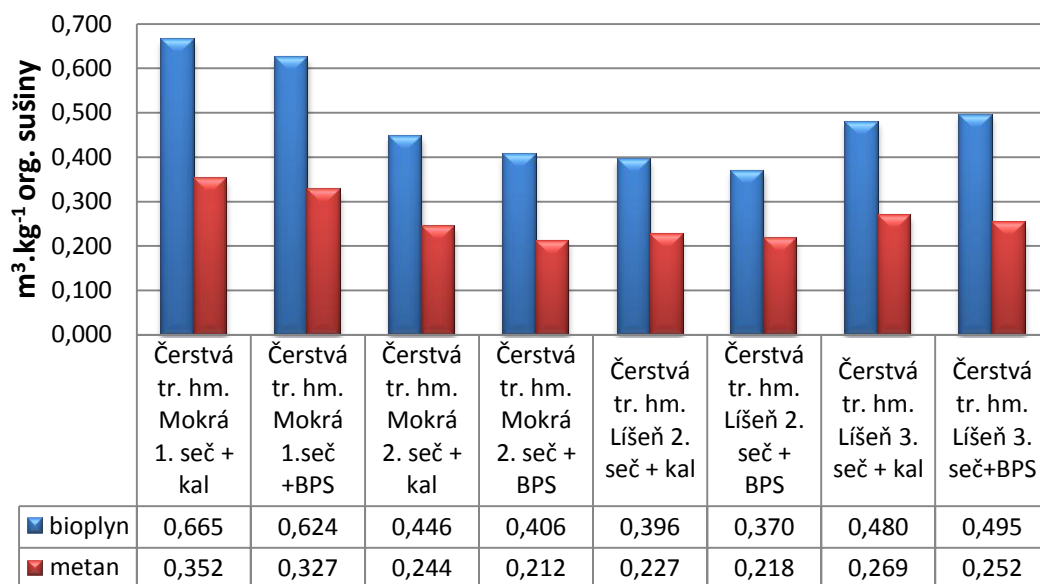
U všech ostatních materiálů byla kofermentace s čistírenským kalem účinnější co do produkce bioplynu a metanu, pouze u vzorku ze 3. seče z Líšně vzniklo více bioplynu při kofermentaci s BPS než s kalem, přesně $0,495 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu a $0,252 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ metanu. Metanu ale vzniklo více u vzorku kofermentace s kalem $0,269 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ metanu.

Nejvyšší produkci bioplynu a metanu z čerstvé travní hmoty potvrzuje i článek Využití travních směsí při anaerobní digesci (Gerndtová, Andert, 2009). Pokos testovaného materiálu byl proveden v jarních měsících. Jednalo se o parkovní, nehnojený pokos, tedy podobný materiál, co se výskytu týče, jako byl použit v testech v diplomové práci. Při kofermentaci travní seče s fugátem ze zemědělské BPS byla produkce bioplynu $0,370 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ s obsahem metanu vyšším než 70 % (více než $0,259 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ metanu). Tyto výsledky jsou srovnatelné s uskutečněným měřením. Důvodem vyšší produkce bioplynu a metanu může být složení jarní seče.

Tabulka 12: Procentuální obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [%obj.]	Medián [%obj.]	Směrodatná odchylka [%obj.]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 1. seč + kal	46,9	46,9	0,258	0,067
Čerstvá tr. hm. Mokrá 1. seč +BPS	45,9	45,9	0,048	0,002
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	50,2	50,0	0,413	0,170
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + BPS	47,6	47,6	0,306	0,093
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2. seč + kal	48,3	48,3	0,065	0,004
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	47,9	47,9	0,585	0,342
Čerstvá tr. hm. Líšeň 3. seč + kal	46,4	46,4	0,748	0,560
Čerstvá tr. hm. Líšeň 3. seč +BPS	44,9	44,9	0,005	$2,48 \cdot 10^{-5}$

Produkce bioplynu a metanu u čerstvé travní hmoty a kalu nebo BPS



Obrázek 6: Graf produkce bioplynu a metanu u čerstvé travní hmoty a kalu nebo BPS

Tabulka 13: Obsah metanu v bioplynu

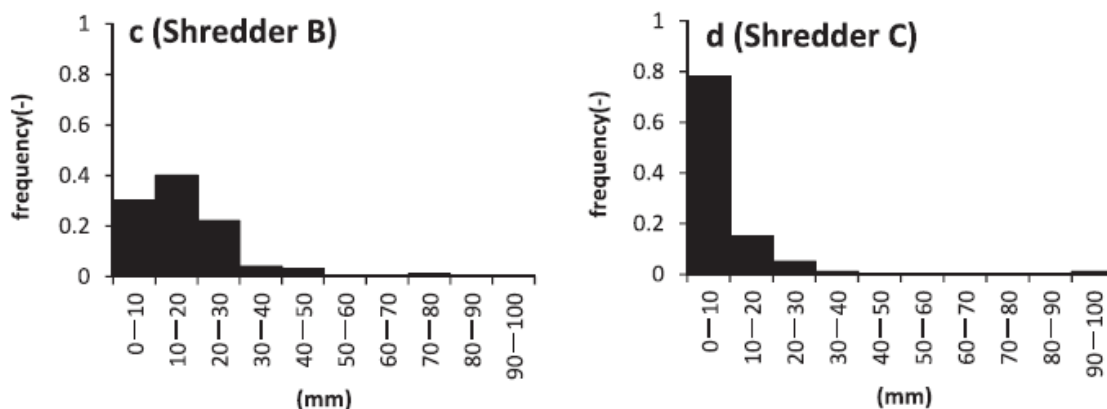
	Střední hodnota [m ³ ·kg ⁻¹]	Medián [m ³ ·kg ⁻¹]	Směrodatná odchylka [m ³ ·kg ⁻¹]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 1. seč + kal	0,352	0,355	0,010	1,07·10 ⁻⁴
Čerstvá tr. hm. Mokrá 1.seč +BPS	0,327	0,326	0,002	2,34·10 ⁻⁶
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	0,244	0,244	0,010	9,7·10 ⁻⁵
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + BPS	0,212	0,211	0,003	9,7·10 ⁻⁶
Čerstvá tr. hm. Lí- šeň 2. seč + kal	0,227	0,225	0,003	1,07·10 ⁻⁵
Čerstvá tr. hm. Lí- šeň 2. seč + BPS	0,218	0,217	0,010	9,9·10 ⁻⁵
Čerstvá tr. hm. Lí- šeň 3. seč + kal	0,269	0,284	0,024	5,6·10 ⁻⁴
Čerstvá tr. hm. Lí- šeň 3. seč +BPS	0,252	0,255	0,008	6,18·10 ⁻⁵

5.2.2 Zavadlá travní hmota

Produkce bioplynu a metanu u zavadlé travní směsi byla velmi vyrovnaná. To mohlo být způsobeno nízkým obsahem vody v materiálu, tedy vysokou sušinou. I zde vznikalo více bioplynu i metanu při kofermentaci s kalem než s materiálem z BPS. Rozdíly v produkci byly minimální a to i v procentuálním zastoupení metanu v bioplynu, které jsou znázorněny v tabulce 14. Dále mohla mít vliv vyšší dezintegrace materiálu, protože vysušený materiál byl vkládán úzkým hrdlem do reaktoru, při kterém došlo k podrcení hmoty. Vliv dezintegrace na travní hmotu může hrát významnou roli.

O dezintegraci materiálu, vlivem které došlo k navýšení produkce bioplynu píše ve článku Využití travních směsí při anaerobní digesci Gerndtová a Andert (Gerndtová, Andert, 2009). Vliv dezintegrace také popisuje ve studii Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces Taira Hidaka (Hidaka,

2012), která byla uskutečněna v Public Works Research Institute v Japonsku. Při pořežení trávy na od 0,1 mm do 30 mm u vzorku Shredder C vzniklo $0,330 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu s obsahem metnanu přibližně 64 %. Při pořežení trávy od 0,1 mm do 50 mm u vzorku Shredder B vzniklo $0,260 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ bioplynu.

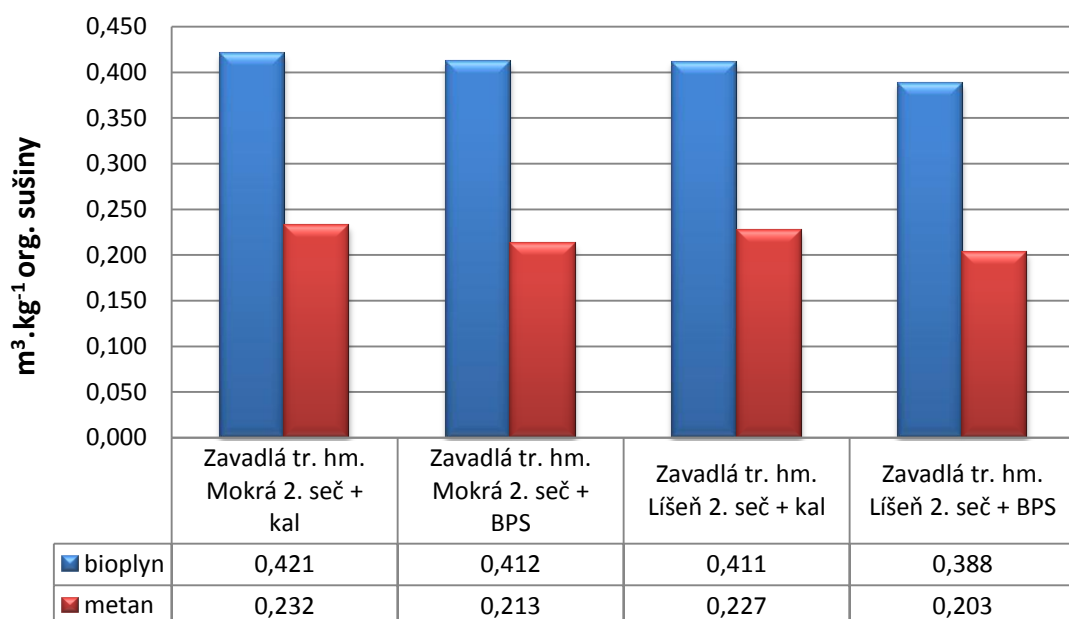


Obrázek 7: Příprava vzorku trávy B a C pořežením (Hidaka, 2012)

Tabulka 14: Procentuální obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [%obj.]	Medián [%obj.]	Směrodatná odchylka [%obj.]	Rozptyl
Zavadlá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	49,0	49,0	0,554	0,306
Zavadlá tr. hm. Mokrá 2. seč + BPS	47,6	47,5	0,385	0,148
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + kal	48,9	49,0	0,256	0,070
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	47,8	47,7	0,118	0,014

Produkce bioplynu a metanu u zavadlé travní hmoty a kalu nebo BPS



Obrázek 8: Graf produkce bioplynu a metanu u zavadlé travní hmoty a kalu nebo BPS

Tabulka 15: Obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [m ³ ·kg ⁻¹]	Medián [m ³ ·kg ⁻¹]	Směrodatná odchylka [m ³ ·kg ⁻¹]	Rozptyl
Zavadlá tr. hm. Mokrú 2. seč + kal	0,232	0,232	0,006	4,07·10 ⁻⁵
Zavadlá tr. hm. Mokrú 2. seč + BPS	0,212	0,211	0,003	1,06·10 ⁻⁵
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + kal	0,227	0,17	0,016	2,59·10 ⁻⁴
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	0,203	0,200	0,003	1,15·10 ⁻⁵

5.2.3 Travní siláž

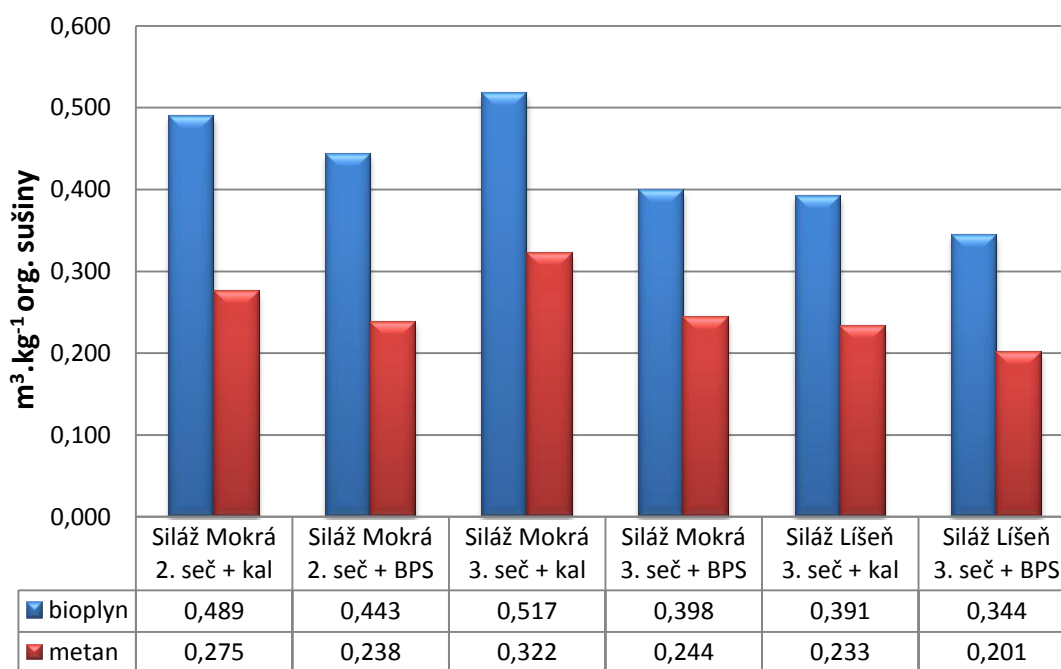
Stejně jako u předchozích měření byla produkce bioplynu s kalem vyšší než s materiálem z ČOV. Potvrzuje se tím trend, který se vyskytl u všech měření. Pravděpodobná příčina tohoto trendu je v mikrobiálním složení obou inokul.

V práci Analýza produkce bioplynu z travních senáží v závislosti na kvalitě pro využití v bioplynových stanicích bylo provedeno testování travních siláží při kofermentaci s kalem z ČOV. Obsah metanu byl v rozmezí 0,293-0,436 m³·kg⁻¹ (Szabó, Koutný, Groda, 2011). Vzorky s obsahem sušiny kolem 28 % dosahovaly nejvyšší produkce metanu, zatímco materiály s vyšší sušinou produkovaly nižší množství metanu. Materiál testovaný v této diplomové práci obsahoval 0,201-0,322 m³·kg⁻¹. Sušina vzorků byla přibližně 33 %. Z toho plyne, že při obou testech byly naměřeny podobné hodnoty.

Tabulka 16: Procentuální obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [% obj.]	Medián [% obj.]	Směrodatná odchylka [% obj.]	Rozptyl
Siláž Mokrý 2. seč + kal	48,9	48,9	0,164	0,027
Siláž Mokrý 2. seč + BPS	46,8	46,7	0,427	0,182
Siláž Mokrý 3. seč + kal	54,1	54,0	1,525	2,324
Siláž Mokrý 3. seč + BPS	51,3	51,1	0,655	0,429
Siláž Líšeň 3. seč + kal	51,3	51,2	0,300	0,090
Siláž Líšeň 3. seč + BPS	48,9	48,9	0,024	0,001

Produkce bioplynu a metanu travní siláže a kalu nebo materiálu z BPS



Obrázek 9: Graf produkce bioplynu a metanu u travní siláže a kalu nebo BPS

Tabulka 17: Obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [m ³ ·kg ⁻¹]	Medián [m ³ ·kg ⁻¹]	Směrodatná odchylka [m ³ ·kg ⁻¹]	Rozptyl
Siláž Mokrý 2. seč + kal	0,275	0,272	0,005	2,83·10 ⁻⁵
Siláž Mokrý 2. seč + BPS	0,238	0,244	0,011	1,26·10 ⁻⁴
Siláž Mokrý 3. seč + kal	0,322	0,323	0,009	7,83·10 ⁻⁵
Siláž Mokrý 3. seč + BPS	0,244	0,254	0,022	4,79·10 ⁻⁴
Siláž Líšeň 3. seč + kal	0,233	0,229	0,005	2,4·10 ⁻⁵
Siláž Líšeň 3. seč + BPS	0,2008	0,2005	0,009	7,81·10 ⁻⁵

5.3 Vliv konzervace materiálu na produkci bioplynu a metanu

V následující kapitole budou prezentovány výsledky v závislosti na typu konzervace materiálů. Pro přehlednost jsou uvedeny materiály s kaly a s materiálem z BPS. Tmavou barvou je znázorněna produkce bioplynu, světlou produkce metanu. Produkce bioplynu i metanu je udávána v m³·kg⁻¹ organické sušiny.

Protože je provoz BPS celoroční, nelze využít sezonní materiály, kterými travní hmota je, bez použití konzervace. Pro diplomovou práci bylo zvoleno zavadání travní hmoty a silážování. Výsledky byly srovnány s produkcí bioplynu a metanu u čerstvé travní směsi. Inokulum bylo použito stejné jako v předchozích testech, tedy kal a materiál z BPS.

Travní hmota byla ponechána v zastřešené hale, ve vrstvě přibližně 0,1 m, při teplotě okolí, kde tráva zavadala přibližně 30 dní. Travní siláž byla silážována v anaerobním prostředí déle než 30 dní.

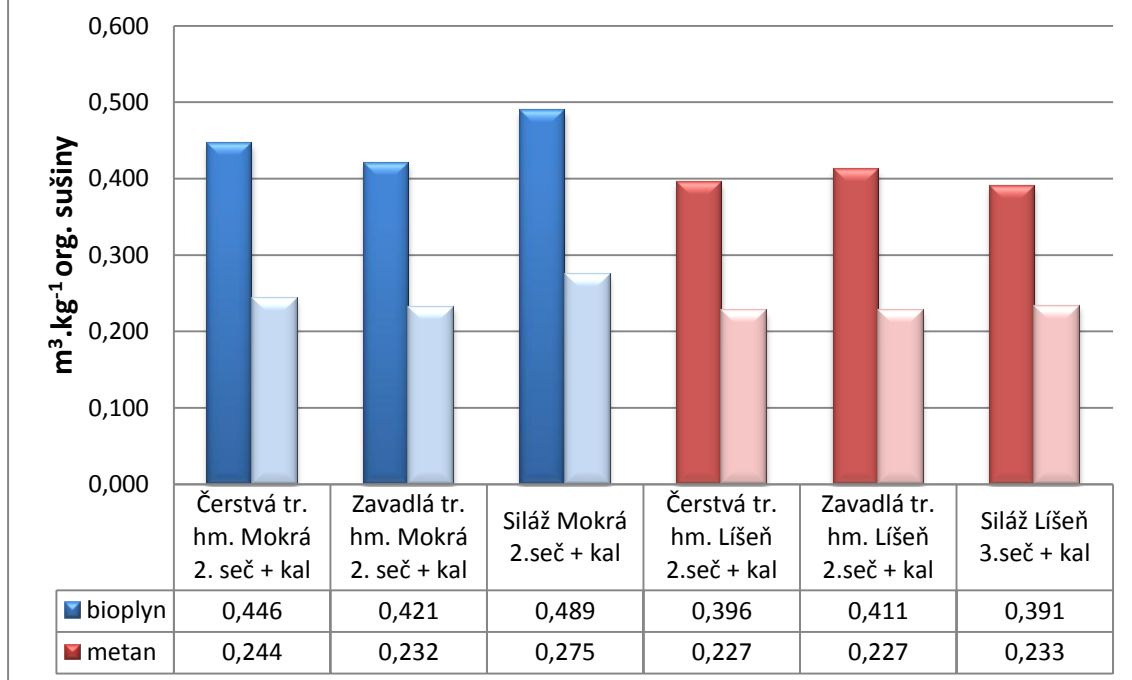
5.3.1 Srovnání konzervovaných materiálů při kofermentaci s kaly

V grafu na obrázku 10 je srovnána produkce čerstvé a zavadlé travní hmoty a travní siláže při kofermentaci s kalem v lokalitě Líšeň a Mokrá-Horákov, katastrální území Mokrá. Jak je z výsledků patrné, produkce bioplynu se výrazně neliší. Nepatrně nižší je produkce bioplynu, resp. metanu u zavadlé hmoty. Ta by mohla být způsobena nižším obsahem vlhkosti. U travní siláže z Mokré je naopak vidět mírný nárůst produkce bioplynu a metanu. Ta mohla být způsobena metodou konzervace. Při silážování kyselina mléčná konzervuje materiál a narušuje strukturu trávy. Proto mohly být snadněji přístupné živiny pro mikroorganismy, které usnadnily proces tvorby bioplynu.

Tabulka 18: Procentuální obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [% obj.]	Medián [% obj.]	Směrodatná odchylka [% obj.]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	50,1	50,0	0,413	0,170
Zavadlá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	49,0	49,0	0,554	0,306
Siláž Mokrá 2.seč + kal	48,9	48,9	0,164	0,027
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2.seč + kal	48,3	48,3	0,065	0,004
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2.seč + kal	48,9	49,0	0,256	0,070
Siláž Líšeň 3. seč + kal	51,3	51,2	0,300	0,090

Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace a kalu



Obrázek 10: Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace a kalu

Tabulka 19: Obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Medián [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Směrodatná odchylka [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	0,244	0,244	0,010	$9,7 \cdot 10^{-5}$
Zavadlá tr. hm. Mokrá 2. seč + kal	0,232	0,232	0,006	$4,07 \cdot 10^{-5}$
Siláž Mokrá 2. seč + kal	0,275	0,272	0,005	$2,83 \cdot 10^{-5}$
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2. seč + kal	0,227	0,225	0,003	$1,07 \cdot 10^{-5}$
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + kal	0,227	0,170	0,016	$2,59 \cdot 10^{-4}$
Siláž Líšeň 3. seč + kal	0,233	0,229	0,005	$2,4 \cdot 10^{-5}$

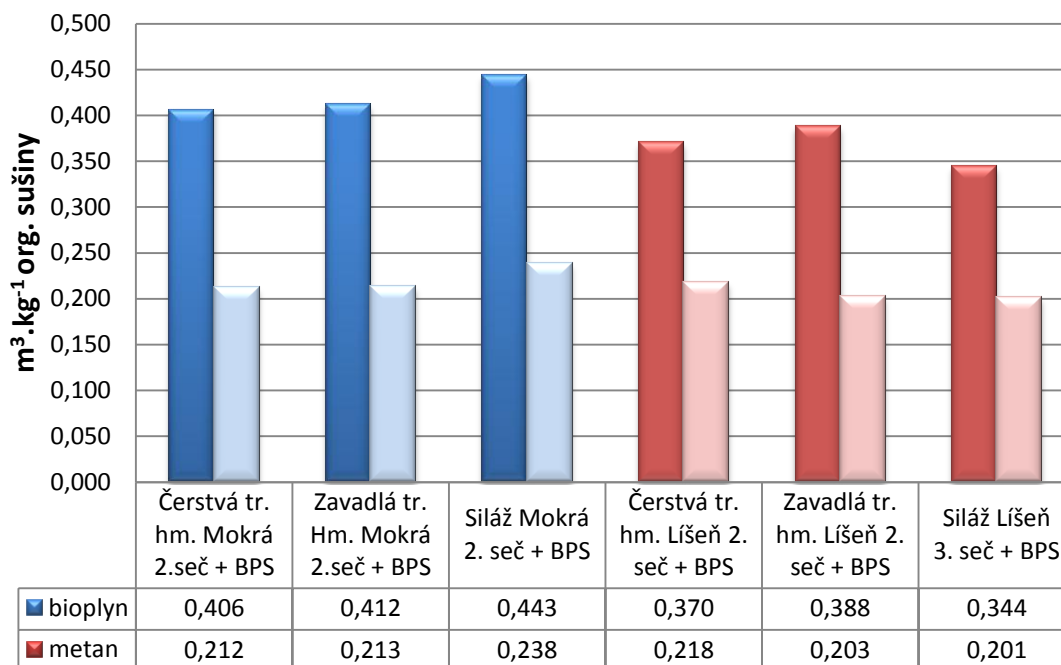
5.3.2 Srovnání konzervovaných materiálů při kofermentaci s materiálem z BPS

Při kofermentaci s materiálem z BPS je produkce bioplynu a metanu o něco málo nižší. I zde můžeme na naměřených hodnotách vidět, že vliv konzervace materiálů, co do produkce bioplynu a metanu je zanedbatelný. U některých vzorků je způsob konzervace dokonce prospěšný, protože se produkce u travní siláže z Mokré zvyšuje. U vzorků siláže z Líšně se produkce sice nezvyšuje, ale zůstává na téměř stejné úrovni jako u čerstvé travní hmoty.

Tabulka 20: Procentuální obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [%obj.]	Medián [%obj.]	Směrodatná odchylka [%obj.]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + BPS	47,6	47,6	0,306	0,093
Zavadlá tr. Hm. Mokrá 2. seč + BPS	47,6	47,5	0,385	0,148
Siláž Mokrá 2. seč + BPS	46,8	46,7	0,427	0,182
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	47,9	47,9	0,585	0,342
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	47,8	47,7	0,118	0,014
Siláž Líšeň 3. seč + BPS	48,9	48,9	0,024	0,001

Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace + BPS



Obrázek 11: Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace a BPS

Tabulka 21: Obsah metanu v bioplynu

	Střední hodnota [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Medián [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Směrodatná odchylka [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Rozptyl
Čerstvá tr. hm. Mokrá 2. seč + BPS	0,212	0,211	0,003	$9,7 \cdot 10^{-6}$
Zavadlá tr. Hm. Mokrá 2. seč + BPS	0,212	0,211	0,003	$1,06 \cdot 10^{-5}$
Siláž Mokrá 2. seč + BPS	0,238	0,244	0,011	$1,26 \cdot 10^{-4}$
Čerstvá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	0,218	0,217	0,010	$9,9 \cdot 10^{-5}$
Zavadlá tr. hm. Líšeň 2. seč + BPS	0,203	0,200	0,003	$1,15 \cdot 10^{-5}$
Siláž Líšeň 3. seč + BPS	0,201	0,201	0,009	$7,81 \cdot 10^{-5}$

6 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala využitím travní hmoty při výrobě bioplynu. Cílem práce bylo otestovat travní hmotu s různými typy inokul a posoudit jejich vliv na testovaný materiál. Dalším cílem bylo posoudit vliv konzervace materiálu na produkci bioplynu a metanu. Protože jsou bioplynové stanice provozovány nepřetržitě, je nutné zajistit celoroční přísun vstupních materiálů. Proto byla testována čerstvá hmota, zavadlá hmota a travní siláž. Travní hmota byla kofermentována s kaly z ČOV Modřice a obsahem fermentoru zemědělské BPS v Čejči. Testování probíhalo po dobu 20, 21 a 22 dní. Probíhalo v mezofilním teplotním režimu, při teplotě 42 °C.

Při testování vlivu inokulačního materiálu se naměřené hodnoty obou kofermentovaných materiálů významně nelišily, avšak více bioplynu a metanu vznikalo vždy při kofermentaci s kaly než s materiálem z BPS. U čerstvé travní hmoty vzniklo při kofermentaci s kalem průměrně 0,497 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,273 m³·kg⁻¹ metanu. Při kofermentaci s materiálem z BPS 0,474 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,252 m³·kg⁻¹ metanu.

Při testování zavadlé travní hmoty vzniklo při kofermentaci s kaly 0,416 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,230 m³·kg⁻¹ metanu. S materiálem z BPS vzniklo 0,399 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,208 m³·kg⁻¹ metanu.

Kofermentace travní siláže s kalem vyprodukovala 0,466 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,277 m³·kg⁻¹ metanu. Při kofermentaci s materiálem z BPS vzniklo 0,394 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,227 m³·kg⁻¹ metanu.

Při testování vlivu konzervace se naměřené hodnoty významně nelišily. Z toho vyplývá, že zvolené způsoby konzervace materiálů nesnižují jeho kvalitu. Proto je vhodný pro dlouhodobé skladování a může být dostupný pro celoroční provoz bioplynové stanice. Jako vhodnější způsob se jeví silážování. Vznikalo přibližně stejné nebo i vyšší množství bioplynu a metanu než u vzorků čerstvé travní hmoty. Silážování zřejmě narušilo stébla trav, živiny se staly pro mikroorganismy přístupnější a mohlo tak vznikat větší množství bioplynu, resp. metanu. Při kofermentaci s kaly vzniklo silážováním o 0,043 m³·kg⁻¹ bioplynu a 0,031 m³·kg⁻¹ metanu více. Při zavadání bylo použito nedostatečné množství vzorku. Došlo k jeho přeschnutí, což mohlo nepříznivě ovlivnit produkci bioplynu a metanu.

7 ZDROJE

7.1 Zdroje literární

BENDA, V., *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: Profi Press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9.

CALLAGHAN, F.J., WASE, D.A.J., THAYANITHY, K., C.F. Forster, Continuous co-digestion of cattle slurry with fruit and vegetable wastes and chicken manure, *Biomass and Bioenergy*, Volume 22, Issue 1, January 2002, Pages 71-77, ISSN 0961-9534.

CENEK, M., *Obnovitelné zdroje energie*. Praha: FCC Public, 1994.

DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A. Biogas, in *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*, Second Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2010. doi: 10.1002/9783527632794.ch8

DOLEŽAL, P., *Konzervace, skladování a úpravy objemných krmiv: (přednášky)*. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2006. ISBN 80-7157-993-9.

FEITKENHAUER, H., SACHS, J. V., MEYER, U. On-line titration of volatile fatty acids for the process control of anaerobic digestion plants, *Water Research*, 2002, 36, 212-218, ISSN: 0043-1354.

GERARDI, M.H. *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2003, 177 s., ISBN: 9780471206934.

HAIDER, M. R., ZESHAN, YOUSAF, S., MALIK, R. N., VISVANATHAN, Ch. Effect of mixing ratio of food waste and rice husk co-digestion and substrate to inoculum ratio on biogas production. *Bioresource Technology*, 2015, 190, 451–457, ISSN: 0960-8524

HAVELKOVÁ, SEIFERTOVÁ, Š., 2016. Loštice, *ústní sdělení*

HIDAKA, T., SARAI, S., OKAMOTO, S., UCHIDA, T., Anaerobic co-digestion of sewage sludge with shredded grass from public green spaces, *Bioresource Technology*, Volume 130, February 2013, Pages 667-672, ISSN 0960-8524, <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.068>.

MATA-ALVAREZ, J., *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid waste*. Iwa publishing, London, 2003, ISBN: 1900222140

PASTOREK, Z., KÁRA, J., JEVIČ, P. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

PLÍVA, P., ALTMANN, V., HANČ, A., HEJÁTKOVÁ, K., ROY, A., VALENTOVÁ, K. Kompostování a kompostárny. Praha: Profi Press, 2016. ISBN 978-80-86726-74-8.

SCHÖN, M. Verfahren zur Vergärung organischer Rückstände in der Abfallwirtschaft, 1994, Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis, pp. 66, Schmidt-Verlag

SCHULZ, H., EDER, B. Bioplyn v praxi: teorie - projektování - stavba zařízení - příklady. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6.

STRAKA, F., a Michal DOHÁNYOS. Bioplyn: [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů]. 2., rozš. a dopl. vyd. Praha [i.e. Říčany u Prahy]: GAS, 2006. ISBN 80-7328-090-6.

SUPAPHOL, S., JENKINS, S.N., INTOMO, P., WAITE, I.S., O'DONNELL, A.G. Microbial community dynamics in mesophilic anaerobic co-digestion of mixed waste. Bioresource Technology, 2011, 102, 4021–4027, ISSN: 0960-8524.

SZABÓ, T., KOUTNÝ, T., GRODA, B. Verifying the properties of grass haylage from anaerobic processing. Inzynieria Rolnicza, 2011, 7(132), 157-161.

TRÁVNÍČEK, P., Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-206-9.

7.2 Právní předpisy

ČSN EN 14346. Charakterizace odpadů - Výpočet sušiny stanovením podílu sušiny nebo obsahu vody. Praha: Český normalizační institut, 2007.

NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 1069/2009, ze dne 21. října 2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, a o zrušení nařízení (ES) č. 1774/2002 (nařízení o vedlejších produktech živočišného původu). Dostupný na:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/ALL/?uri=CELEX:32009R1069>

Vyhláška č. 131/2014 Sb., 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. Dostupné na:

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-131>

Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. Dostupné na:

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-294>

Vyhláška č. 321/2014 Sb., o rozsahu a způsobu zajištění odděleného soustředění složek komunálních odpadů. Dostupné na:

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-321>

Vyhláška č. 341/2008 Sb., 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). Dostupné na:

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-341>

Vyhláška č. 93/2016 Sb., o Katalogu odpadů. Dostupné na:

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93>

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

<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>

7.3 Zdroje internetové

BURG, P., Travní hmota a možnosti jejího využití. *Zahradnictví* [online]. 2007, [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://zahradaweb.cz/travni-hmota-a-moznosti-jejeho-vyuziti/>

BIOM, CZ. Průvodce výrobou a využitím bioplynu. *CZ Biom – České sdružení pro biomasu* [online]. 2009,160 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/pruvodce_vyrobou_vyuziti_m_bioplynu.pdf

HUTLA, P., Tuhá biopaliva z místních zdrojů. *Biom – České sdružení pro biomasu* [online]. 2010-11-01 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/tuha-biopaliva-z-mistnich-zdroju>, ISSN: 1801-2655.

MUŽÍK, O., KÁRA, J., Kofermentace křídlatky při anaerobní digesci hovězí a prasečí kejdy. *Biom.cz* [online]. 2004-08-16 [cit. 2017-04-13]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kofermentace-kridlatky-pri-anaerobni-digesci-hovezi-a-praseci-kejdy>

NutriVet. Silážování jazykem zemědělců. *Salinity Agro* [online]. 2011, 28 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://www.nutrivet.cz/konz/silazovani.pdf>

VÁŇA, J., Využití travní fytomasy k výrobě kompostů. *Biom.cz* [online]. 2001-11-06 [cit. 2017-04-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-travni-fytomasy-k-vyrobe-kompostu>, ISSN: 1801-2655.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Shrnutí fází a produktů anaerobní fermentace (BIOM.CZ)	14
Obrázek 2: Fermentory o objemu 0,120 m ³	30
Obrázek 3: Fermentory o objemu 0,005 m ³	31
Obrázek 4: Příprava travní siláže	33
Obrázek 5: Výsledná travní siláž před dávkováním do reaktoru	34
Obrázek 6: Graf produkce bioplynu a metanu u čerstvé travní hmoty a kalu nebo BPS.....	41
Obrázek 7: Příprava vzorku trávy B a C pořezáním (Hidaka, 2012).....	43
Obrázek 8: Graf produkce bioplynu a metanu u zavadlé travní hmoty a kalu nebo BPS.....	44
Obrázek 9: Graf produkce bioplynu a metanu u travní siláže a kalu nebo BPS .	46
Obrázek 10: Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace a kalu.....	49
Obrázek 11: Produkce bioplynu a metanu u materiálů s použitím různých druhů konzervace a BPS.....	51

9 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Teoretická produkce bioplynu (Trávníček, 2015)	15
Tabulka 2: Poměr C:N (Haider, 2015).....	16
Tabulka 3: Složení bioplynu (Pastorek, 2004).....	20
Tabulka 4: Teplotní režimy při hygienizaci kompostováním	22
Tabulka 5: Mechanické a palivoenergetické vlastnosti topných briket na bázi fytomasy z trvalých travních porostů (TTP), (Biom.cz).....	23
Tabulka 6: Hodnocení a kontrola výstupů ze zařízení.....	26
Tabulka 7: Provádění kontrol, mezní hodnoty mikroorganismů	26
Tabulka 8: Druh hnojiva, organická a organominerální hnojiva	28
Tabulka 9: Složení čerstvé travní hmoty.....	37
Tabulka 10: Složení zavadlé travní hmoty.....	38
Tabulka 11: Složení travní siláže	38
Tabulka 12: Procentuální obsah metanu v bioplynu.....	40
Tabulka 13: Obsah metanu v bioplynu	42
Tabulka 14: Procentuální obsah metanu v bioplynu.....	43
Tabulka 15: Obsah metanu v bioplynu	44
Tabulka 16: Procentuální obsah metanu v bioplynu.....	45
Tabulka 17: Obsah metanu v bioplynu	47
Tabulka 18: Procentuální obsah metanu v bioplynu.....	48
Tabulka 19: Obsah metanu v bioplynu	49
Tabulka 20: Procentuální obsah metanu v bioplynu.....	50
Tabulka 21: Obsah metanu v bioplynu	51

10 SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1: Výpočet sušiny materiálu	34
Rovnice 2: Výpočet spalitelných látek v materiálu	35
Rovnice 3: Přepočet produkce bioplynu na fyzikálně normální podmínky	36

11 SEZNAM ZKRATEK

BPS – Bioplynová stanice

BRKO – Biologicky rozložitelný komunální odpad

BRO – Biologicky rozložitelný odpad

ČOV – Čistírna odpadních vod

KTJ – Kolonie tvořící jednotky

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

PP – Polypropylen

PPM – Parts per million, výraz pro jednu miliontinu celku

PVC – Polyvinylchlorid

TTP – Trvale travnatý porost

ÚKZUZ – Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský

VŽP – Vedlejší živočišný produkt