

**JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH
BUDĚJOVICÍCH**

ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2011

Jiří Brožek

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA

Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství

Studijní obor: Agroekologie

Katedra: Katedra aplikovaných rostlinných
biotechnologií

Vedoucí katedry: prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem
biomasy pro výrobu metanu ze substrátu pro BPS
Chotýčany, zpracovaném technologií IFBB (Integrated
Generation of Solid Fuel and Biogas from Biomass)

Vedoucí diplomové práce
prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.

Autor
Bc. Jiří Brožek

České Budějovice, duben 2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jiří BROŽEK
Osobní číslo: Z09737
Studijní program: N4101 Zemědělské inženýrství
Studijní obor: Agroekologie
Název tématu: Využití reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy pro výrobu metanu ze substrátu pro BPS Chotýčany, zpracovaném technologií IFBB (Integrated Generation of Solid Fuel and Biogas from Biomass)
Zadávací katedra: Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je provést optimalizaci sestaveného anaerobního reaktoru pro anaerobní digesci substrátu z BPS "Chotýčany" a navrhnout optimální technologii anaerobní digescce.

Proveďte literární rešerši k zadanému tématu.

Seznamte se s metodou stanovení CHSK. V laboratoři se naučte rutinně stanovit CHSK v různých vzorcích. Podle schématu poskytnutém vedoucím práce sestavte pokusný reaktor. Proveďte porovnání různých režimů práce reaktoru v souladu s metodikou. Odzkoušejte funkčnost reaktoru na konkrétním vzorku z BPS "Chotýčany" (teplota, míchání, inokulace, zatížení reaktoru podle CHSK modelového vzorku).

Získané výsledky statisticky vyhodnoťte.

Vypracujte diplomovou práci dle Opatření děkana č. 13 ze dne 18. 12. 2009.

Rozsah grafických prací: dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy: cca 40 - 60 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

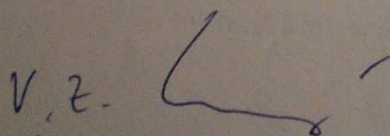
- Kolář, L., Kužel, S., Štindl, P., Peterka, J., Borová-Batt, J. (2010): Agrochemical value of the liquid phase of wastes from fermenters during biogas production. *Plant Soil Environ.*, 56 (1): 23-27
Kolář, L., Kužel, S., Peterka, J., Štindl, P., Plát, V. (2008): Agrochemical value of organic matter of fermenter wastes in biomass production. *Plant Soil Environ.*, 54 (8): 321-328
Kolář, L., Kužel, S., Horáček, J., Čechová, V., Borová-Batt, J., Peterka, J. (2009): Labile fractions of soil organic matter, its quantity and quality. *Plant Soil Environ.*, 55 (6): 245-251
Straka, F. a kol. (2006): Bioplyn - příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových stanic. Gas Praha
Schulz, H., Eder, B. (2004): Bioplyn v praxi. Hel Ostrava
Usták, S. a kol. (2004): Anaerobní digesce BM a komunálních odpadů. CZ BIOM, Praha
Kára, J. a kol. (2007): Výroba a využití bioplynu v zemědělství. VÚZT Praha

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.
Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií
Konzultant diplomové práce: Ing. Jiří Peterka, Ph.D.
Katedra aplikovaných rostlinných biotechnologií

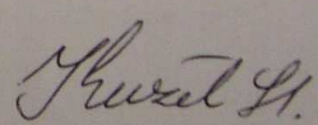
Datum zadání diplomové práce: 15. března 2010

Termín odevzdání diplomové práce: 30. dubna 2011

JIHOČESKÁ UNIVERZITA
V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH
ZEMĚDĚLSKÁ FAKULTA
studijní oddělení
Studentská 13
370 05 České Budějovice


prof. Ing. Miloslav Šoch, CSc.
děkan

L.S.


prof. Ing. Stanislav Kužel, CSc.
vedoucí katedry

V Českých Budějovicích dne 15. března 2010

Prohlášení:

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své diplomové práce, a to v nezkrácené podobě (v úpravě vzniklé vypuštěním vyznačených částí archivovaných Zemědělskou fakultou JU) elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Českých Budějovicích 21. 4. 2011

Jiří Brožek

Poděkování:

Děkuji vedoucímu této diplomové práce prof. Ing. Stanislavu Kuželovi, CSc za podněty k jejímu vypracování. Současně děkuji Ing. Eduardu Strosserovi za pomoc při stanovování $CHSK_{Cr}$. Rovněž děkuji doc. Ing. Janu Horáčkovi CSc a Ing. Josefu Marouškovi, Ph.D. za sestavení a rozběhnutí pokusné reaktorové sestavy. Také děkuji Ing. Štidlovi za zajištění substrátu a obsluze BPS Chotýčany p. Trendovi za jeho vydání.

Abstrakt:

Záměrem této práce byl výzkum činnosti reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy. Samotné pokusné měření probíhalo na reaktorové sestavě postavené v laboratoři. Sledovaným výstupem těchto pokusů byla účinnost odbourávání organických látek během činnosti reaktoru stanovená jako $CHSK_{Cr}$ v daném vzorku. $CHSK_{Cr}$ byla měřena v závislosti na teplotě roztoku a době zdržení v reaktoru. Teplota roztoku v reaktoru byla buď 50 °C nebo 40 °C a doba zdržení vždy 5 hodin. Hmota použitá v reaktoru byla získána technologií IFBB ze substrátu používaném v zemědělské bioplynové stanici Chotýčany u Českých Budějovic a Věžovate Pláně u Českého Krumlova. Výstupem z technologie IFBB je tuhá a kapalná (kašovitá) část původního substrátu. V pokusu byla použita pouze kapalná část jako provozní roztok reaktoru.

Pokusná reaktorová sestava byla postavena v laboratoři. Je složena ze skleněného reaktoru a skleněného separátoru. Dále obsahuje propojovací pryžové hadičky, skleněné trubičky, prvky pro vstup a výstup látek sestavy, ohřívač s termostatem a čerpadlo. Rovněž byla využívána horkovzdušná sušárna pro přípravu vzorků k vyhodnocení. Hlavní vyhodnocení bylo prováděno elektronickým titrátozem Schott. Samotná $CHSK_{Cr}$ nakonec byla vypočtena podle vzorce.

Summary:

The biogas reactor with sludge cloud completed by external biomass separator was tested in this work. Biomass used in that reactor for fermentation was processed by IFBB technology. The biomass's origin is in Chotýčany and Věžovatá Pláně biogas power plant. There are two products of IFBB technology. The solid one which is used as a solid biofuel after dehydration and pelletization. The second product is fluid. This fluid was used as a material for fermentation in tested reactor.

There are written the advantages of IFBB technology in theoretical part of this work. This technology is a very good resolution for areas with large portion of permanent grasslands. Biomass from that grasslands is not so good for fermentation. As a first step of that biomass in IFBB is hydrolization. It is mixed with hot water (60 deg. Celsius). Then this matter is processed by screw press. On the end of pressing there are two substances: solid and fluid part. Solid part is dried and fluid is given to reactor for fermentation.

Reactor was built in university's laboratory. The reactor's group consisted of glass reactor (with volume 2 dm³), glass separator (volume 7 dm³), pump (together with heater and thermostat), valves for filling and emptying and that all was connected by rubber or glass hoses. Two temperatures were used during testing the reactor. That temperatures were 40 or 50 degree Celsius. Each test lasted 5 hours.

Each hour there were taken samples (5 or 10 mm³) when the reactor's group was in operation. These samples were dried, then titrated and finally CHSK_{Cr} was evaluated. While starting measuring on the reactor's group the value of CHSK_{Cr} was around 300 mg.dm⁻³. After five hours of the reactor's operation the best fermentation results has biomass from Věžovatá Pláně. It was 114 mg.dm⁻³ after 50 deg. Celsius and 189 mg.dm⁻³ after 40 deg. Celsius during the fermentation.

Key words: IFBB, methane, reactor with sludge cloud and external biomass separator, CHSK_{Cr}

1 Obsah

1	Obsah	8
2	Úvod	10
3	Pojem bioplyn.....	12
4	Tvorba bioplynu	13
4.1	Průběh fermentace	13
4.1.1	Fáze anaerobního rozkladu.....	13
4.1.2	Teplotní pásma během fermentace	14
4.1.3	Upřesnění činnosti mikroorganismů	15
4.1.4	Většinové zdroje metanu	16
4.1.5	Složení vzniklého bioplynu	16
4.2	Obecný popis substrátu vhodného pro metanizaci	17
4.2.1	Sušina	17
4.2.2	Hodnota pH	18
4.2.3	Poměr C: N.....	18
4.2.4	Obsah příměsí	19
4.2.5	Zacházení se substrátem před samotnou fermentací	19
4.3	Digestát jako vedlejší produkt bioplynových stanic	20
4.3.1	Užití digestátu jako hnojiva v ekologickém zemědělství.....	21
5	Technologie výroby bioplynu v reaktorech.....	22
5.1	Základní součásti technologie v bioplynové stanici	22
5.2	Dělení podle dávkování surového materiálu do fermentoru.....	23
5.3	Dělení podle sušiny vstupního materiálu.....	24
5.3.1	Mokrý fermentace.....	24
5.3.2	Suchá fermentace:.....	24
5.3.3	Seskupení suché a mokré fermentace v jedné BPS	25
5.3.4	Dělení reaktorů podle způsobu fixace reagující biomasy.....	26
5.4	Reaktor UASB	27
5.4.1	Pro konstrukci reaktoru jsou velmi důležité tři faktory.....	28
5.5	Reaktor s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy	28
5.6	Technologie IFBB (Společná výroba pevného biopaliva a bioplynu z biomasy)	28
5.6.1	Příčiny vzniku IFBB	28

5.6.2	Možnosti technologie IFBB.....	30
6	Pokusná část	33
6.1	Metodika	33
6.1.1	Příprava substrátu a inokulačního roztoku	33
6.1.2	Reaktorové sestava	33
6.1.3	Stanovení $CHSK_{Cr}$	36
6.2	Výsledky a diskuze	39
6.2.1	Provoz reaktorové sestavy s inokulem z BPS Chotýčany	39
6.2.2	Provoz reaktorové sestavy s inokulem z BPS Věžovatá Pláně	45
6.3	Závěr	51
6.4	Obrazová příloha.....	53
7	Použitá literatura.....	55

2 Úvod

Produkce bioplynu může řešit současné problémy v zemědělství. Jako hlavní potíž je možno uvést velmi kolísavé výkupní ceny zemědělských komodit. Velkým „propadákem“ byl rok 2008 a 2009. Nebýt dotací z EU, tak by zisk ze sklizených plodin u většiny podniků ani nepokryl náklady na jejich výrobu. Výkup komodit musel být řešen i přes tzv. intervenční výkupy (zde je státem dlouhodobě garantována cena obilí i při jeho přebytku na běžném trhu). Není s podivem, že v této době začal významný rozvoj zemědělských bioplynových stanic. Zemědělci v nich viděli (a stále vidí) spolehlivý a pravidelný zdroj příjmu v době, ve které jsou časté výkyvy cen komodit.

Zemědělská BPS může u některých podniků snižovat závislost na dodávkách energie z distribuční sítě, a to tím, že se elektřina v ní vyrobená může využít přímo v zemědělském podniku. Tato skutečnost byla aktuální hlavně koncem roku 2010. V této době se totiž řešilo hrozící zdražení elektrické energie kvůli podpoře obnovitelných zdrojů energie. Tento „strach“ byl vyvolán hlavně rostoucím počtem a výkonem solárních elektráren. Jejich elektřina byla vykupována za vysoké ceny. Záporné odhady hovořily i o růstu ceny o 20 % pro podniky a 10 % pro domácnosti pro rok 2011. Naštěstí se tento hrozící růst podařilo zvrátit zásahem Ministerstva financí a Vlády ČR (zvýšení daní na solární elektřinu). Výsledný růst má být kolem 5 %.

Výstavba BPS není v České republice neomezená. Je dána Národním akčním plánem pro energii z obnovitelných zdrojů. Tento plán byl vypracován Ministerstvem průmyslu a obchodu. ČR se zavázala vůči Evropské unii tím, že do roku 2020 bude vyrábět 13 % energie z obnovitelných zdrojů. Bioplynové stanice mají dle Národního akčního plánu pro bioplyn odhad výkonu v roce 2020 417 MW elektrického výkonu. Vezme-li se v úvahu průměrný výkon bioplynové stanice na úrovni 800 kW_e, potom je zde ještě prostor pro stavbu 400 stanic do roku 2020. Ke konci roku 2010 bylo v ČR již 174 BPS. Tempo růstu počtu stanic bude velké do roku 2015. Po tomto roce se očekává stagnace kvůli snížení podpory na výstavbu z EU.¹

Často je namítáno, že se zemědělci až příliš zaměřují na výrobu energie a omezují tak výrobu surovin pro potravinářský průmysl i pro přímou spotřebu. Na základě zmíněného Národního akčního plánu však bude i při překročení cílů k roku 2020 potravinová bezpečnost České republiky zajištěna. Celkové množství půdy, které je možné

(při zachování potravinové bezpečnosti ČR) použit pro pěstování energetických rostlin je 970 tis. ha².

Česká republika má v porovnání s jinými evropskými státy dobrou vlastnickou strukturu zemědělské půdy, protože zde převažují podniky obhospodařující výměry nad 500 ha. Podniky jsou dobře vybaveny skladovacími prostory i logistikou pro výrobu objemných krmiv pro živočišnou výrobu. Stejných skladovacích prostorů i logistiky lze využít pro zajištění substrátu pro bioplynovou stanici³.

U podniků, které obhospodařují méně než 500 ha je možnost výstavby BPS malá. Je to proto, že samostatný podnik není schopen zajistit dostatek surovin pro zásobování provozu BPS s minimálním ekonomicky dosažitelným výkonem. Výzkumné a vývojové organizace však pracují na vývoji malých BPS, které by byly ekonomicky uplatnitelné. Do pěti let je zde možnost zvýšení potenciálu těchto malých zdrojů.

Celkový potenciál zemědělských BPS však není možné zcela využít. Je zde několik vlivů, které znemožňují stoprocentní uplatnění BPS v zemědělských podnicích. Těmito vlivy jsou např. špatné finanční zdraví podniku, nevyhovující kapacita jeho managementu. Dále do rozhodování o stavbě může vstoupit i nedostatečná kapacita přenosové soustavy v daném místě a také neochota místních občanů (ti se často obávají zápachu). Kvůli těmto potížím se uskuteční jen asi 70 % možných projektů. Jednou z možností řešení nedostatečné kapacity elektrizační soustavy je její „obejití“. To spočívá v úpravě bioplynu na kvalitu zemního plynu a jeho odbyt plynovody či tlakovými lahvemi.⁴

3 Pojem bioplyn

Na počátku této práce je třeba si vysvětlit, co je pod pojmem bioplyn v dnešní době myšleno. Je to proto, že tento termín v posledních letech 20. století velmi zobecněl.

Již po stovky miliónů let vyrábějí rostliny kyslík a přitom tento kyslík nikdo bioplynem nenazývá. Atmosférický kyslík vzniká výhradně touto cestou (v biologických fotosyntetických procesech). To samé se dá říci i o oxidu uhličitém, který vzniká při ethanolovém kvašení cukrů.

Až rozvinutá praxe anaerobních postupů pro čištění odpadních vod, která dobře funguje od počátku 20. století s sebou přinesla termín bioplyn. Nicméně již tehdy vznikla synonyma - např. kalový a čistírenský plyn.

Názvem bioplyn je obecně míněna plynná směs methanu a oxidu uhličitého. V plynném produktu dobře „pracujících“ metanogenních mikroorganismů je suma vyprodukovaného metanu a oxidu uhličitého blízka 100 % (vždy převažuje metan). V technické praxi se však s takto ideálním bioplynem nepotkáme. Je zde totiž ještě škála dalších plynů - např. vzdušných (N_2 , O_2 , Ar) nebo neúplně spotřebované produkty acidogeneze (H_2 , přebytek CO_2) a také minoritní a stopové příměsi z předcházejících reakcí organické hmoty (H_2S , N_2O , HCN, uhlovodíky a jejich deriváty - převážně kyslíkaté a sirné).

Dále jsou zde různé bahenní plyny, které vznikají v anaerobních prostředích hlubších částí rybníků, slatin a močálů. Stejně tak vznikají i plyny z rýžovišť.

Právě v oboru skládkových plynů je možno dostat se do definičních potíží s tím, co bioplyn ještě je a co již není. Půdní plyny s vysokými koncentracemi metanu a případně ještě vyššími koncentracemi CO_2 a zároveň s nízkým anebo nulovým obsahem kyslíku bude nejlepší vyjmout z kategorie bioplynů. Tyto plyny by se měli řadit bez dalšího upřesnění k půdním plynům.

Skládkový plyn je termín, který se někdy používá pro veškeré plyny, které lze odsát z tělesa skládky odpadů bez ohledu na to zda je v něm obsaženo i jen 1% metanu. Kvalitní skládkový plyn se však svým složením velmi blíží skládkovým bioplynům.⁵

4 Tvorba bioplynu

Metanovou fermentaci je vždy nutno chápat vždy jako soubor na sebe navazujících procesů, v nichž vlastní metanogeny představují pouze poslední článek v řetězci biochemické konverze⁶.

Proces tvorby bioplynu je anaerobní a je také nazýván jako metanizace nebo biometanizace. Jak již bylo zmíněno, tak se jedná o soubor dějů v nichž směsná kultura mikroorganismů za nepřístupu vzduchu postupně rozkládá organické látky které jsou obsaženy ve zpracovávaných materiálech (ve vsádce, v substrátu).

Zpracovávanou hmotou může být celá řada věcí - kaly z odpadních vod, organické kuchyňské odpady, cíleně pěstovaná biomasa (kukuřice, trávy, čirok, slunečnice), odpady živočišného původu (z jatek).

Na konci procesu metanizace je stabilizovaná organická hmota, která obsahuje i narostlou biomasu během proces a hlavně plyn jenž obsahuje zvláště CH₄, CO₂ a někdy i H₂S, H₂ a N₂.

4.1 Průběh fermentace

Anaerobní fermentace probíhá ve čtyřech fázích nazývaných podle mikroorganismů, které v nich hrají klíčovou roli. Činnost mikroorganismů může probíhat rovněž při několika teplotních pásmech.

4.1.1 Fáze anaerobního rozkladu

Anaerobní rozklad organických látek vyžaduje metabolickou součinnost několika mikrobiálních skupin a podle těchto skupin lze proces rozdělit na tyto čtyři fáze: ⁷

- **Hydrolýza:** Zde dochází k rozkladu makromolekulárních rozpuštěných i nerozpuštěných organických látek (polysacharidy, lipidy a proteiny) na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě. Působí zde extracelulární hydrolitické enzymy (hydrolázy).
- **Acidogeneze:** Jedná se zde o další rozklad produktů z předcházejícího stupně. Jsou rozloženy na jednoduché organické látky. Jsou jimi především nižší mastné kyseliny, alkoholy, CO₂ a H₂. Rozklad je zajištěn acidogenními bakteriemi.

- **Acetogeneze:** Tvorba kyseliny octové, vodíku a CO₂ z produktů, které vznikly v předchozích fázích. Acetogenní bakterie produkují vodík, kyselinou octovou a oxid uhličitý jsou zajištěny denitrifikačními a sulfátredukujícími bakteriemi. Dochází také k acetogenní respiraci vodíku a CO₂ homoacetogenními bakteriemi.
- **Metanogeneze:** Tady již vzniká samotný metan z kyseliny octové acetotrofními metanogenními bakteriemi. Z vodíku a oxidu uhličitého se metan tvoří prostřednictvím hydrogenotrofních metanogenních bakterií.

Tyto fáze jsou následné, při kontinuálním provozu ale probíhají současně. Pokud je však proces rozdělen technologicky do dvou stupňů, pak v tom první stupni probíhá buď hydrolitická, nebo hydrolitická s acidogenní fází zároveň. Acetogenní fázi nelze úplně prostorově oddělit od té metanogenní protože je zde syntrofický vztah acetogenních bakterií produkujících vodík a metanogenních hydrogenotrofních bakterií.

Pro stabilitu procesu anaerobní fermentace organických materiálů je velmi důležitá optimální rovnováha v kinetice jednotlivých fází, probíhajících s odlišnou kinetickou rychlostí. Metanogenní fáze probíhá přibližně 5x pomaleji než zbylé tři fáze. Tomu je třeba přizpůsobit konstrukci bioplynových technologických systémů a dávkování surového materiálu jinak hrozí přetížení fermentoru se všemi nepříznivými důsledky.⁸

4.1.2 Teplotní pásma během fermentace

Dalším rozlišení metanizace je z hlediska teplotního režimu v kterém proces probíhá:

- kryofilní: 0 až 5 °C
- psychofilní: 5 až 27 °C
- mezofilní: 27 až 45 °C
- termofilní: 45 až 60 °C

Chladomilné (psychofilní) mikroorganismy jsou pro současnou technickou praxi nepoužitelné protože jejich produkční rychlosti jsou malé. V praxi se nanejvýše uplatní při tvorbě plynu na některých skládkách.

4.1.3 Upřesnění činnosti mikroorganismů

Počáteční fáze rozkladu organické hmoty nejsou uskutečňovány vlastními metanogeny a začínají ještě v přítomnosti kyslíku. Je to dáno přítomností fakultativních anaerobů v této fázi. Tyto organizmy zajistí poměrně rychle vytvoření plně anaerobního prostředí, v němž se mohou tvořit i metanogeny.

Acidogenní (kyselinotvornou) fázi zajišťují již ryzí anaeroby. V této fázi také vznikají oba hlavní substráty pro tvorbu metanu. Těmito substráty jsou:

- **kyselina octová** - ta je zpracovávána na metan tzv. acetotrofními metanogeny
- **směs vodíku a oxidu uhličitého** - jenž je ještě rychleji převáděna na metan hydrogenotrofními metanogeny

Hydrogenotrofy se generují velmi rychle a způsobují úplné vymizení vodíku z produkovaného bioplynu. Jakmile by se v bioplynu vodík přeci jen objevil, tak to svědčí o narušení rovnováhy mezi acido a metanogenními procesy. Bývá to provázeno i poklesem pH. Příčinou může být např. přetížení reaktoru, nevhodná skladba substrátu a také případná inhibice hydrogenotrofních bakterií⁹.

Následky inhibice hydrogenotrofů je možno pozorovat i při trávení přežvýkavců. Hydrolyza celulózy a hemicelulózy v jejich krmné dávce je doprovázena značným vývinem plynů - zvláště vodíku a oxidu uhličitého. Hydrogenotrofní metanogeny zajišťují významné snížení množství těchto plynů. Po průniku kyslíku do trávícího traktu - např. v podobě čerstvé zelené píce s dosud aktivními fotosyntetickými procesy může dojít k již zmíněné inhibici hydrogenotrofů. Tím je omezen proces biometanizace. Následný velký objem vodíku a oxidu uhličitého může způsobit velké nadýmání a nutnost veterinárního zákroku.³

Rysem pro právě probíhající metanogenezi je přibližně neutrální pH. Tam, kde jsou v činnosti pouze acidogeny je pH nízké 4,0 - 5,8 a s rozvojem metanogenů dochází k růstu pH až na 6,0 - 7,0 i výše. Některé druhy metanogenů mohou být v činnosti i ve velmi alkalických prostředích s pH 8 - 9¹⁰.

Pro úplnost je nutno dodat, že celý rozkladný proces nemusí probíhat jen díky bakteriím a jim podobným organismům. Často se totiž rozkladných hydrolytických procesů zúčastňují vyšší a mnohem složitější organizmy. Například v trávícím ústrojí přežvýkavců jsou velmi aktivní prvoci z kmene nálevníků. Podíl těchto mikroorganismů na hydrolyze

rostlinné stravy je některými autory udáván hodnotou 34 %. V bachorech byli nalezeni v nižších počtech i bičíkovci. Jedná se však o zoospory hub (např. *Neocallimastix frontalis*) Za vhodných podmínek tvoří biomasa těchto hub (podkmen *Phycomycetes* neboli řasohouby či plísň pravé) v bachorech 8 % celkové mikrobiální biomasy v něm obsažené. Právě tyto houby se určitě podílejí na hydrolýze celulózy a škrobových polysacharidů, nicméně jejich celkový podíl na celkovém odbourávání polysacharidových struktur nebyl dosud přesněji zjištěn.¹¹

4.1.4 Většinové zdroje metanu

Původně se předpokládalo že metanogenní bakterie jsou schopny dělat metan z celé řady vstupních látek. Nejnovější výzkumy však ukazují, že tyto bakterie jsou ve výběru substrátu značně specializované.

Jako většinové zdroje metanu byly prokázány jen kyselina octová, oxid uhličitý a vodík.¹² Majoritní podíl metanu pochází z rozkladu polysacharidů (hlavně celulózových typů). Vysokou výtěžností bioplynu vynikají tuky. Bílkoviny jsou také velmi dobře rozkládány, nicméně potíží je v zastoupení dusíku a síry v jejich původních strukturách. Tato síra se pak dostává do bioplynu ve většině případů jako sulfan, jenž je pak zdrojem dalších potíží.¹³

Ale ještě horší než síra je organicky vázaný dusík. Obsah dusíku v bílkovinách je značně vyšší než obsah síry. Tento dusík je v anaerobních procesech ve značné míře převáděn na amonné soli. Pokud následně v tomto prostředí stoupne koncentrace amonných iontů (nebo pH) může dojít k významnému zbrzdění fermentace. Je to kvůli přítomnosti volného, nedisociovaného amoniaku.

V přírodních materiálech obsažený lignin (dřevo, papír, ostatní rostliny) není metanizován vůbec a celým procesem prochází nezměněn.¹⁴

4.1.5 Složení vzniklého bioplynu

Jelikož je tvorba metanu rovnovážným procesem, v němž spolupracují acidogenní a metanogenní organizmy, tak vyrobený bioplyn neobsahuje pouze metan. Je tam obsažen i oxid uhličitý. Obsah metanu se pohybuje mezi 50 až 85 % objemu bioplynu. Zbytek složení do 100 % je téměř výlučně tvořen oxidem uhličitým (CO₂). Kvalitní bioplyn

obsahuje jen zlomky procenta dusíku, žádný vodík (méně nežli desetiny procenta) a ani žádný kyslík.

Vysoký obsah oxidu uhličitého (CO_2) znamená, že nebyly vytvořeny optimální podmínky pro anaerobní fermentaci. Přítomnost volného kyslíku (O_2) s výjimkou počáteční fáze procesu může být zapříčiněna zavzdušňováním pracovního prostoru. Tento stav je nežádoucí z bezpečnostního hlediska tvorby výbušné směsi metanu se vzdušným kyslíkem.

V bioplynu se mohou objevit stopy argonu, který je vzdušného původu, amoniaku a oxidu dusného. V případě komunálního odpadu se mohou v bioplynu ze skládky objevit stopy dalších nežádoucích příměsí (například halogenuhlovdíků a jejich derivátů, atd.).

Objeví-li se v bioplynu stopy vodíku (H_2), není to na závadu jeho energetické kvalitě, ale svědčí to o narušení rovnováhy mezi průběhem acidogenní a metanogenní fáze, způsobené nadměrnou zátěží reaktoru surovým materiálem a nebo dochází z různých důvodů k inhibičním účinkům, které potlačují rozvoj metanogenních organismů.

Stopy oxidu uhelnatého (CO) mohou okazovat na místní vznik ložisek požáru při suché anaerobní fermentaci. Tato nebezpečná situace se vyskytuje především na skládkách komunálních odpadů, nikoliv v reaktorech.

Velmi významným minoritním plynem v bioplynu je v některých případech sulfan (H_2S), který pochází zpravidla z biochemických procesů při rozkladu bílkovin. Obsah sulfanu v bioplynu je velmi proměnlivý. Při zpracování exkrementů z chovu skotu je jeho obsah zanedbatelný, u exkrementů prasat a drůbeže je naopak velmi vysoký, což působí potíže při následném konečném využití bioplynu.¹⁵ (Kára 2001).

4.2 Obecný popis substrátu vhodného pro metanizaci

Základem pro to, aby byl zvolený substrát vhodný k fermentaci je jednak nízký obsah anorganických látek (popelovin). Tyto látky projdou procesem beze změny a jen ho zbytečně zatěžují. Druhým požadavkem je samozřejmě hmota s vysokým podílem biologicky rozložitelných látek.

4.2.1 Sušina

Optimální obsah sušiny pro zpracování pevných odpadů je 22 – 25 %, v případě tekutých odpadů 8 – 14 %. Tekuté odpady s obsahem sušiny menším než 3 % jsou zpracovávány anaerobní fermentací s zápornou energetickou bilancí (proces je udržován na požadované provozní teplotě za předpokladu dodávky doplňkového tepla z vnějšího

zdroje). Kladná energetická bilance je dosahována zpravidla až při sušině tekutých odpadů vyšší než 3 - 5 %.

Horní hranici optimálního obsahu sušiny tekutého odpadu tvoří vždy mez čerpatelnosti materiálu. Absolutní hranice obsahu sušiny, při které ještě probíhá anaerobní fermentace, je 50 %.

Heterogenní vlhkostní pole v pevném organickém materiálu způsobuje, že v praktickém provozu je metanogeneze tlumena postupně a nikoliv rázově. To je velmi významný faktor mající význam především při zpracování velkých objemů materiálů, které jsou dostupné například na skládkách komunálních odpadů.

4.2.2 Hodnota pH

Významným faktorem ovlivňujícím metanogenní fermentaci je číslo pH (kyselost nebo zásaditost) materiálu. Za optimální hodnotu pH na vstupu do procesu se považuje interval blízký neutrální hodnotě $\text{pH} = 7 \div 7,8$.

V průběhu procesu se tento parametr mění. Na začátku převažuje aktivita acidogenů a číslo pH může poklesnout na $4 \div 6$. Při hodnotách pH substrátu menších než 5 se mohou začít objevovat inhibiční účinky na některé kmeny metanogenů. Dojde-li však za příznivých podmínek k jejich rozvoji, zvýší svojí aktivitou číslo pH substrátu až na neutrální hodnotu $\text{pH} = 7$.

Některé kmeny metanogenů jsou schopny se rozvíjet i v silně alkalickém prostředí ($\text{pH} = 8 \div 9$). V praxi se optimální hodnota pH materiálu na vstupu do procesu upravuje homogenizací směsných materiálů nebo alkalickými přísadami.

4.2.3 Poměr C: N

Významným parametrem pro hodnocení vhodnosti materiálů pro anaerobní fermentaci je poměr uhlíkatých a dusíkatých látek. Za optimální se považuje pásmo kolem 30 : 1.

Vysoký obsah dusíkatých látek se může projevit negativně na složení bioplynu (obsahuje minoritní obsah plynů jako například amoniaku NH_3 a oxidu dusného N_2O). Mezi materiály s vysokým obsahem N patří výkaly všech druhů hospodářských zvířat, opačný extrém (vysoký obsah C) tvoří materiály rostlinného původu. V praxi se optimálního poměru C : N dosahuje míšením různých materiálů.

4.2.4 Obsah příměsí

Vhodnost materiálu pro anaerobní fermentaci může být významně narušena nežádoucími příměsemi. Jedná se zpravidla o látky potlačující mikrobiální rozvoj, především o všechny druhy antibiotik používaných jako léčiva pro zvířata, nebo preventivně jako součást krmných směsí pro drůbež.

Do pracovního prostoru reaktorů bychom neměli dávat ani materiály, které jsou již ve hnilobném rozkladu.

4.2.5 Zacházení se substrátem před samotnou fermentací

Vhodnost materiálu pro anaerobní fermentaci může být narušena jeho předchozím zpracováním nebo manipulací. Dlouhodobým skladováním materiálu, při kterém proběhne proces aerobní fermentace (kompostování), nebo fyzikálně-mechanickými účinky na materiál (například při potrubní dopravě slamnaté chlěvské mrvy, atd.) se může narušit následný proces anaerobního zpracování takového materiálu.

Podle složení substrátu se vytvářejí vhodné podmínky pro množení určitých kmenů bakterií způsobujících rozklad organické látky. Množství mikroorganismů odpovídá jejich růstové křivce, na níž lze sledovat 6 fází:

1. **Lagová fáze** – mikroorganismy se postupně adaptují na dané podmínky.
2. **Fáze zrychleného růstu** – částečně přizpůsobené mikroorganismy se začínají množit.
3. **Fáze exponenciálního růstu** – zcela přizpůsobené mikroorganismy se silně množí, protože mají dostatečné množství živin.
4. **Fáze zpomaleného růstu** – rychlost růstu mikroorganismů se zpomaluje.
5. **Stacionární fáze** - vlivem počínajícího nedostatku živin je počet vznikajících a umírajících mikroorganismů v rovnováze.
6. **Fáze poklesu** – absolutní nedostatek živin způsobuje postupné odumírání a rozklad mikroorganismů.

Pro urychlení náběhu fermentačního procesu se využívá očkovací látky (inokulum) z fermentoru, který je již v ustáleném provozním stavu (již rozběhlá BPS). Je také možno použít sušené stimulatory obsahující metanogeny v inaktivovaném stavu.⁶

4.3 Digestát jako vedlejší produkt bioplynových stanic

Pro začátek je třeba vyvrátit převládající názor, že digestát z bioplynové stanice je výborným organickým hnojivem. To, že je digestát výborným hnojivem je jen marketingovým tahem výrobců bioplynových technologií.

Především, digestát není organickým, ale jen slabým minerálním hnojivem. Má-li mít nějaké hmota označení organické hnojivo, potom musí splňovat základní požadavek - musí být snadno mikrobiálně rozložitelná. Jedině tak je totiž schopna uvolnit pro půdní mikroorganismy potřebnou energii. Při jejím rozkladu se rovněž uvolňují minerální živiny. Nicméně, když se organická látka oxidačně nerozkládá, potom nemůže uvolnit minerální živiny.

Důvodem, že digestát není až tak vhodný jako hnojivo je ten, že nejlabilnější frakce organické hmoty krmiv byla využita hospodářskými zvířaty, mírně labilní frakce výkalů byla spotřebována anaerobní digescí a do půdy k hnojení se nakonec dostane pouze stabilní digestát, který obsahuje jen špatně rozložitelnou organickou hmotu. A její stabilita je tím větší, čím účinnější je technologie BPS a čím vyšší je výtěžek bioplynu. Moderní BPS s mezofilním vyhníváním dávají z hlediska kvality organického hnojiva digestát mnohem horší, než zastaralé psychrofilní BPS zpracovávající městské kanalizační kaly v minulém století.¹⁶

Jak bylo dále zjištěno,¹² stabilní organická hmota pevné fáze digestátu je zejména výborným, pomalu se rozkládajícím prostředkem pro zlehčení těžkých půd a úpravu jejich vlastností. Zvýšení provzdušenosti takových půd může mít větší výnosový efekt, než intenzivní hnojení půd se špatnými fyzikálními vlastnostmi.

Nicméně digestátu z bioplynových stanic bude mnohem více než by bylo možno použít na vylehčování těžkých půd. A navíc, digestát na výstupu z bioplynové stanice vybavené technologií IFBB je až extrémně zředěný (pevná hmota je využita jako tuhé biopalivo) a obsah minerálních částic je tudíž nepatrný. Právě proto je nyní hledán způsob, jak digestát z technologie IFBB zkoncentrovat a tím tak získat průměrné kapalné minerální hnojivo.

4.3.1 Užití digestátu jako hnojiva v ekologickém zemědělství

Jelikož se v České republice nekoná pouze rozmach zemědělských bioplynových stanic, ale i značné zvětšování počtu ekologických farem i plochy, kterou obhospodařují, bude vhodné uvést i podmínky využití digestátu právě na polích zařazených do ekologického režimu.

Obecně platí podle Nařízení Rady (ES) č. 834/2007 o ekologické produkci a označování ekologických produktů, že digestát lze v ekologickém zemědělství použít pouze v případě, že by BPS pracovala v režimu platném pro ekologicky hospodařící farmu, a potom by i vstupní suroviny musely splňovat podmínku organického hnojiva použitelného pro produkci ekologických výrobků.

Právní požadavky však umožňují udělit výjimku pro případ částečného použití digestátu z ekologicky hospodařícího subjektu. Příslušné právní předpisy pojednávají o hnojení prostřednictvím výrobku vzniklém anaerobní fermentací spojenou s výrobou bioplynu z rostlinných materiálů a rostlinného a živočišného odpadu tříděného u zdroje.¹⁷

5 Technologie výroby bioplynu v reaktorech

Technologie anaerobní fermentace vznikly na počátku 20. století v rámci čištění odpadních vod. V roce 1907 byla v Německu patentována nádrž se dvěma sedimentačními prostory na čištění odpadních vod. Tento první reaktor je znám pod názvem „emšerská studně“. Prvním, ryze anaerobním reaktorem byl uveden do provozu roku 1910 v anglickém Birminghamu na zpracování čistírenského kalu¹⁸ (Dohányos 1988).

Během dalšího vývoje došlo k vylepšení v podobě vytápění reaktoru teplem vzniklým při spalování vyrobeného bioplynu. Zařízení rozhodně nemělo sloužit k výrobě energie, ale hlavně zpracovávat odpadní kal a odstraňovat z něj organické látky. Druhá polovina 20. století vyla ve znamení rozvoje reaktorových procesů. Byly zaváděny nové substráty (nejen kaly, ale i tuhé odpady a pěstovaná biomasa).

Současné poznání v této oblasti dokládá, že jako vstupní surovinu lze použít směs libovolných odpadů a biomasy. Pokud jsou tyto složky biologicky rozložitelné, pak je zde jen málo technologických omezení.

5.1 Základní součásti technologie v bioplynové stanici

1. **Reaktor:** To je nejdůležitější součástí celé strojní linky, která rozhoduje o její kvalitní funkci. Reaktory jsou válcové, betonové, kovové, plastové. Osa reaktoru může být buď svislá, nebo vodorovná. Řízený metanogenní proces znamená, že je reaktor vybaven ohřevem vsádky, míchacím, homogenizačním a dávkovacím zařízením.
2. **Bioplynová koncovka:** Zde je obsaženo potrubí na dopravu bioplynu, bezpečnostní zařízení pro dopravu bioplynu, dmychadlo, zásobník (plynojem), prvky kontroly a regulace. Může tu být i zařízení na úpravu bioplynu (na jeho čištění od H₂O, CO₂, H₂S a mechanických nečistot). A také nezbytný hořák zbytkového plynu.
3. **Kogenerační jednotka:** Ta může být v podobě pístového motoru, nebo mikroturbíny vyrábějící elektrický proud a teplo (ve formě ohřáté vody). Nicméně bioplyn nemusí být využit přímo v místě jeho výroby - tedy v kogenerační jednotce v areálu BPS. Po zmíněné úpravě na kvalitu zemního plynu může být dodán právě do rozvodné sítě zemního plynu, nebo přímo v místě stlačován do tlakových lahví a rozvážen na místa spotřeby. Rozhodující pro rychlou ekonomickou návratnost

investic do BPS je využití tepla. Hlavně v České republice není teplo příliš využíváno a je přes chladicí soustavu kogenerační jednotky odváděno do atmosféry. Nejjednodušším využitím je jeho rozvod pro vytápění okolních podnikových nebo obecních objektů. Jsou-li objekty vhodné pro vytápění příliš daleko, vyplatí se uvažovat o vybudování plynovodu na bioplyn a umístění kogenerační jednotky až v místě využití tepla - tedy poblíž vytápěných objektů. Vybudovat plynovod je nejenom levnější, než stavba teplovodu, ale hlavně vedení plynu nemá v porovnání s vedením tepla žádné tepelné ztráty. Nevýhoda tohoto řešení je v tom, že stále musí být zajištěno vyhřívání fermentoru, které se nejčastěji zajišťuje kotlem spalujícím bioplyn, případně i další kogenerační jednotkou. Kogenerační jednotky na vytápění fermentoru mohou být rovněž dvě, přičemž jedna běží stále a ta druhá je spuštěna jen ve velmi chladném období.

4. **Kalová koncovka:** Ta obsahuje také armatury, dopravní čerpadla, homogenizátory, sklady, separační zařízení (spádová síta, lisy). Dosud jsou koncové sklady na digestát budovány jako otevřené. Produkce bioplynu z koncového skladu byla však naměřena na úrovni 5 % z celkového množství bioplynu. Zakrytí tohoto skladu za účelem využití tohoto zbytkového bioplynu by bylo ekonomicky nevýhodné. Z ekologického hlediska je však takovýto únik metanu do atmosféry již značný. Z této příčiny bude v novele zákona o obnovitelných zdrojích energie zakotveno plynotěsné zakrytí koncových jímek jako podmínka pro poskytnutí vyšší výkupní ceny elektřiny z BPS.

5.2 Dělení podle dávkování surového materiálu do fermentoru.

1. **Diskontinuální:** Toto pracuje s přerušovaným provozem. Doba jednoho pracovního cyklu odpovídá době zdržení materiálu ve fermentoru. Je to užíváno zvláště při suché fermentaci tuhých organických materiálů. Způsob manipulace s materiálem je ale náročný na obsluhu.
2. **Semikontinuální:** Zde je doba mezi jednotlivými dávkami kratší než doba zdržení ve fermentoru. Toto je nejčastější způsob plnění fermentorů při zpracování tekutých organických materiálů. Materiál je dávkován 1 krát, 4 krát i vícekrát za den. Vstupující materiál má malý vliv na změnu pracovních parametrů ve fermentoru (homogenita, teplota). Toto dávkování lze snadno automatizovat, a tím to není tak náročné na obsluhu.

3. **Kontinuální:** To je použito pro fermentory, jenž pracují s tekutými odpady s malým podílem sušiny. Nejčastěji je toto řešení vidět při čištění odpadních vod.

5.3 Dělení podle sušiny vstupního materiálu

5.3.1 Mokrý fermentace

Ta je dnes nejčastěji používaná. Je prováděna ve velkých vyhřívaných a míchaných nádržích (fermentorech). Pracují buď v kontinuálním, nebo semikontinuálním provozu. Pracovní sušina fermentované hmoty je 4 - 12 %. Ve fermentorech se odbourá 50 - 70 % organické hmoty. Velikost nádrží je dána množstvím a kvalitou vstupního materiálu a také požadovanou dobou zdržení.

5.3.2 Suchá fermentace:

Zde je zpracovávána sušina 30 - 35 %. Rozsah teplot je v mezofilní oblasti s teplotami 32 - 38 st. C. Technologie suché fermentace může být diskontinuální i kontinuální. Výhodou suché fermentace je možnost zpracování biomasy, kterou mokrá cesta nezvládá (např. podestýlky s pilinami v mokřém způsobu vyhívání tvoří krusty a ucpávají čerpadla, totéž platí pro nedokonale vytríděné bioodpady - s příměsemi dřeva, zeminy, kovů, plastů).

V podlahách suchých fermentorů bývá zpravidla topení. Místo topení v podlaze se začíná užívat jiný způsob ohřevu reagující hmoty. Spočívá v tom, že veškeré teplo se dodá velkým množstvím procesní kapaliny ohřáté na požadovanou teplotu. Tato kapalina je po jejím přefiltrování dodávána z mokré fermentace. Mokrou fermentaci v tomto případě zajišťuje pouze malý fermentor. Podmínkou takového způsobu ohřevu je bezvadná drenáž v podlaze suchého fermentoru, která není náchylná k ucpávání.

- **Diskontinuální:** Zde je užito několika reakčních komor (což může být kovový kontejner nebo zděná komora s plynotěsnými vraty) a meziskladu. Doprava materiálu určeného k fermentaci probíhá např. obyčejným nakladačem. Vyhívací proces je řízen dávkováním procesní tekutiny. Jelikož je proces přerušovaný, tak vyprázdnění a naplnění komory a start nové reakce trvá 3 dny. Vlastní reakce s tvorbou bioplynu trvá 21 - 27 dnů. Pro potřeby naočkování hmoty je využito pravidelné vstřikování tzv. perkolátu (což je látka s obsahem vhodných kultur anaerobních mikroorganismů). Využité jsou rovněž zbytky po předešlé fermentaci. Perkolát je dávkován do čerstvé hmoty.

- **Kontinuální:** Tyto jsou investičně velmi náročné. Využití mají hlavně pro zpracování komunálních a tříděných domovních odpadů. Reakční objem je rozdělen do několika fermentorů. Jsou využívány ležaté fermentory s jedním pomaluběžným míchacím zařízením uloženým napříč celým fermentorem

5.3.3 Seskupení suché a mokré fermentace v jedné BPS

Tato možnost je nejnápadnějším prvkem nových BPS, zvláště v západní Evropě. Tyto technologie významně zvyšují výtěžnost bioplynu z jednotky organické hmoty vložené do fermentačního procesu. Dále je rovněž snížena investiční náročnost na jednotku skutečně dosahovaného výkonu stanice. Také je snížen zábor stavební plochy přepočtený na konečný výkon stanice.¹⁹

Již byl proveden projekční návrh kombinované BPS určené na zpracování biologicky rozložitelného komunálního odpadu. Hmota ze svozových vozů nejprve projde rotačním tříděčem. Z tohoto tříděče jde potom jemná frakce do mokré fermentace a ta hrubší frakce je využita v suché fermentaci. Celé toto zařízení má společnou kogenerační jednotku i plynajem. Na výstupu ze suché fermentace je zařazen separátor. Tuhá část ze separátoru je společně se zbytkem po suché fermentaci je dále zpracována v kryté tunelové kompostárně. Tunely jsou stavebně shodné jako suché fermentory, s tím, že v podlaze není topení a kanálky v podlaze neslouží k odvodu procesní kapaliny, ale k vhánění vzduchu. Také vrata nemusejí být nutně plynotěsná jako u suchého fermentoru. Tunely jsou vždy nejméně dva a kromě hygienizace umožňují i úplné vysušení vstupní hmoty na sušinu 85 %. V podlaze kompostárny jsou již zmíněné kanálky, do kterých jsou jednak zaústěny ventilátory pro provzdušňování kompostu, ale také je do těchto kanálků přivedeno i výfukové potrubí z kogenerační jednotky.

Suchá i mokrá fermentace pracují v mezofilním režimu (kolem 40 °C). V aerobním kompostovacím procesu se dosahuje teploty 70 °C po dobu několika dní. Celý objekt kompostárny je napojen na mohutný biofiltr, skrze něhož je filtrován veškerý vzduch opouštějící kompostárnu.

Výstupem kompostárny je předsušený fermentát, který se dá buď dokořpostovat nebo, delším pobytem v tunelu za stálého profukování výfukovými plyny, dosušit na palivo. Palivo má potom výhřevnost 14 MJ.kg⁻¹. Kvůli příměsi plastů je nutné ho spalovat jenom v kotlích s vyšší teplotou hoření. Po posledním kompostování je nutné hmotu opět třídít. Výsledkem třídění jsou 4 % odpadu.

5.3.4 Dělení reaktorů podle způsobu fixace reagující biomasy

5.3.4.1 Suspenzní (bezvýplňové) reaktory:

Zde je reagující biomasa nesena na zpracovávaném substrátu. Tuto technologii používá většina zemědělských bioplynových stanic. Kromě míchadel, topných součástí a usměrňovacích nástaveb není v reaktoru žádná jiná výplň.

Naopak, v technologii čištění odpadních vod s nízkými koncentracemi organického znečištění a u vod s převahou rozpuštěného znečištění tento typ reaktoru musel ustoupit přednostem tzv. vysokovýkonných reaktorů.³

Imobilizace a agregace reagující biomasy (jako u vysokovýkonných reaktorů) by zamezovala kontakt mikroorganismů s jednotlivými částicemi organické hmoty, a tím by byla zpomalena jejich hydrolyza. Navíc by ve zvýšené míře docházelo k ucpávání reaktorů. Organickou hmotou by totiž mohly být nahrazovány částice tvořené mikroorganismy - tím by byl snížen podíl aktivní biomasy. Anebo by organická hmota prošla reaktorem téměř nedotčena, čímž by byla účinnost reaktoru velmi nízká.

5.3.4.2 Reaktory s fixovanou (agregovanou, imobilizovanou) biomasou:

Zatím jsou používány pro čištění potravinářských odpadů a odpadních vod, kde jím procházejí pouze jemné suspenze zpracovávané biomasy. Pro husté suspenze je vhodnější právě suspenzní reaktor (neobsahuje fixované vrstvy biomasy, nedochází tedy tolik k jeho ucpávání).

V těchto reaktorech je reagující biomasa fixována buď na pevném nosiči na výplních aparátů anebo je granulována a zdržuje se jako kalový mrak ve vznosu. Tyto reaktory dosahují vyšší zatížitelnosti než reaktory zmíněné v bodu 1.

Doba zdržení reagující biomasy je podstatně delší než doba zdržení substrátu pro výrobu metanu. A také platí, že doba zdržení reagující biomasy je nezávislá na době zdržení substrátu v reaktoru. Tím je umožněno dosažení vysoké koncentrace anaerobní reagující biomasy v reaktoru, a tím celý proces intenzifikovat.

Jsou zde čtyři hlavní metody imobilizace buněk:

1. Připojení na povrch vhodných nosičů
2. Zachycení v porézní matici
3. Uzavření za polopropustnou membránu

4. Uměle vyvolaná vzájemná agregace buněk: Tato metoda je v praxi velmi úspěšná a je využívána velkou skupinou reaktorů s tzv. granulovanou biomasou. Tyto reaktory jsou děleny do dvou hlavních skupin:

5.3.4.3 Reaktory s biomasou ve formě nárostů biofilmu²⁰ na povrchu inertního materiálu, které se dále dělí na:

- reaktory s pevnou náplní a průtokem zdola nahoru (upflow)
- s pevnou náplní, avšak s průtokem shora dolů (downflow)
- reaktory s pohyblivou náplní

5.3.4.4 Reaktory s agregovanou (granulovanou) biomasou

Tyto reaktory se vyznačují tím, že pracují s vysoce aktivní agregovanou biomasou a dále děleny na:

- reaktory s vnitřním separátorem bioplynu a biomasy
- s vnějším separátorem
- a přepážkové reaktory

Právě reaktor s kalovým mrakem a vnějším (externím) separátorem biomasy byl použit v pokusné části této diplomové práce.

5.4 Reaktor UASB

Reaktor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) je nejvýznamnějším představitelem skupiny reaktorů s agregovanou biomasou. Jedná se o reaktor s kalovým ložem a vnitřním separátorem biomasy. V tomto reaktoru byla poprvé vykultivována anaerobní biomasa ve formě granulí. Toto se podařilo kolektivu kolem prof. Lettingy z nizozemské univerzity nacházející se v Wageningenu.

Reaktor má několik hlavních principů. Při zabezpečení vhodných fyzikálních i chemických podmínek anaerobní biomasa tvoří dobře separovatelné granule. Tato dobře agregovaná granulovaná biomasa je potom stabilní a dobře snáší i poměrně velké míchací síly. Vyplavování částic biomasy, které jsou uvolněny z kalového lože je zabráněno vestavěným separátorem, který umožňuje vynášeným částicám zpětnou flokulaci a usazení. Nejdůležitější pro tento typ reaktoru je jeho správné zapracování, na němž závisí kvalita vzniklé granulované biomasy.

5.4.1 Pro konstrukci reaktoru jsou velmi důležité tři faktory

1. Přítok do reaktoru musí být rozdělen po celé ploše reaktoru, aby se zabránilo tvorbě kanálků v kalovém loži a zkratových proudů. Čím menší je vzestupná rychlost hmoty v reaktoru a produkce bioplynu, tím větší musí být hustota přítokových míst.
2. Další běžnou součástí reaktoru je separátor, jehož význam pro správnou funkci reaktoru je klíčový. Separátor zachycuje a odvádí bioplyn z reaktoru, zabraňuje vyplavování biomasy z reaktoru a flotaci granulí, zachycenou biomasu vrací zpět do kalového lože. Dále slouží jako bariéra proti náhlému rozpínání kalového lože. Důležitá je také volba materiálu, z něhož je separátor sestaven, protože je nutno ho přizpůsobit značným korozním podmínkám v prostředí, v němž je umístěn.
3. Mimořádně důležitý je také tvar a velikost reaktoru. Mohou být válcovité i pravoúhlé, stejně tak ocelové i betonové. Při navrhování jeho rozměrů je potřeba přihlížet k omezujícím hodnotám vzestupní rychlosti hmoty. Nejvhodnější výška reaktoru je 6 m, je-li to více, mohou nastat potíže se separací biomasy. Trendem současné doby při stavbě těchto reaktorů je snaha vyhnout se velkým objemům a místo toho spojit několik menších reaktorů do celků požadované velikosti.

5.5 Reaktor s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy

Reaktor je zde svislou nádobou z průtokem vsádky zespona nahoru. Míchání je zajištěno pouze vznikajícím bioplymem²¹. To, spolu se svislým průtokem umožňuje vytvoření koncentračního gradientu biomasy v reaktoru. Ve spodní části reaktoru je tvořen tzv. kalový mrak, který je složen z vločkovité biomasy. Část biomasy je vlivem flotace bioplymem vynášena a postupuje do vnějšího separátoru biomasy. Zde je oddělena od kapalně fáze a podle potřeby se může opět vrátit do reaktoru. Mezi reaktor a separátor je často zařazeno zařízení na odplynění, čímž je zlepšena účinnost separace biomasy.³

5.6 Technologie IFBB (Společná výroba pevného biopaliva a bioplynu z biomasy)

5.6.1 Příčiny vzniku IFBB

Hlavním důvodem pro uplatnění technologie byla rostoucí plocha trvalých travních porostů. Hledalo se řešení, jak nejlépe využít biomasy na nich vypěstovanou.

5.6.1.1 Rostoucí využívání zemědělských surovin pro energetické účely

Zemědělské bioplynové stanice v České republice (ale i v celé Evropské unii) zažívají v současné době nebyvalý rozvoj. Jedním z důvodů tohoto rozvoje je obliba obnovitelných zdrojů v současnou lidskou společnost, která si je vědoma vyčerpatelnosti fosilních zdrojů. Samotná obliba by však nikoho nemotivovala k jejich výstavbě bioplynových stanic. A tak Evropská unie vytvořila tzv. akční plán pro obnovitelné zdroje energie. Jejich cílem je mít určité procento obnovitelných zdrojů na celkové výrobě energie k určitému datu. Každý členský stát tento závazek musí přijmout a zanést tak do své legislativy. A za účelem splnění tohoto závazku výrobce „zelené“ energie určitými způsoby dotuje, aby se jim investice vyplatila a měla i rozumnou návratnost.

Díky této podpoře se začaly rozšiřovat zemědělské bioplynové stanice (zpracovávající hlavně kukuřici na siláž), ale i rafinerie na bioetanol (pšenice, tritikale) a metylester řepkového oleje (řepka). Nicméně potíží je v tom, že využívání těchto plodin jako paliv soupeří s jejich potravinářským využitím (jak tomu bylo odjakživa). V některých letech se právě kvůli palivům zvedá zvednout i cena potravin (hlavně v případě světové neúrody a spekulace na komoditních trzích).

5.6.1.2 Využití biomasy z TTP

Zároveň však klesají stavy skotu, a tím i využití trvalých travních porostů. A stále větší podíl skotu zbylého je krmem koncentrovanými krmivými vyráběnými na orné půdě. To je pro ornou půdu již značné zatížení - vyrábět potraviny, palivo a krmivo²². Nabízí se však možnost nějak hodnotit právě ty méně využívané trvalé travní porosty. Někde tyto porosty nejsou využívány vůbec a podléhají na nich probíhající přírodní sukcesi. To znamená, že začínají zarůstat keři, stromy a celkově klesá rozmanitost druhů na nich zastoupených. Aby se tyto druhy i porosty zachovaly, je třeba najít jejich nové využití - např. energetické.²³

Biomasa z těchto porostů však není vhodná jak pro současné bioplynové technologie, tak pro přímé spalování. Je to dáno jejím chemickým složením, které při fermentaci nevytváří dostatek metanu (mají příliš vlákniny) a při přímém spalování obsažené prvky způsobují korozi (včetně obalování) spalovací komory a také tvorbu škodlivých emisí.

5.6.1.3 Nevhodné spalování biomasy z TTP

Nevhodnost biomasy spalování je dána například obsahem chlóru (a to i v iontové formě). Při jeho spalování v oblasti teplot 350 - 700 °C mohou vznikat jedovaté a rakovinotvorné polychlorované dioxiny a dibenzofurany. Proto je žádoucí z té biomasy odstranit chlór.²⁴ Rovněž tak obsah draslíku, síry a sodíku není vhodný protože se při jejich spalování tvoří silně korozivní spaliny a zároveň se rychle snižuje teplota tání popela. Dusík obsažený v biomase zvyšuje znečištění atmosféry oxidy dusíku, a proto je třeba ho také odstranit.

Naopak, obsah vápníku v biomase určené pro spalování je žádoucí, protože vede ke zvyšování teploty tání popela.

5.6.2 Možnosti technologie IFBB

Nejlepším řešením je převést tyto látky (nevhodné pro spalování) do kapalné fáze, jenž by byla fermentována v samotné BPS, a tím zvýšit hnojivou hodnotu fugátu. Ze zbylé pevné fáze by se vyrobilo pevné biopalivo vhodné ke spalování. Je dokonce možné vyrábět bioplyn pouze z lehce hydrolyzovatelných organických látek kapalné fáze. Tím by se značně ušetřilo na investičních nákladech při stavbách BPS a průběh fermentace by byl zároveň i rychlejší a dokonalejší.¹²

Technologie IFBB umožňuje vytvořit z biomasy jak bioplyn, tak i pevné palivo a to vše při dobré kvalitě. IFBB spočívá v hydrotermické úpravě biomasy s následným oddělením pevné a kapalné (suspenze) fáze pomocí šroubového lisu²⁵. Suspenze je dále vedena do bioplynového reaktoru. Pevný zbytek je následně vysušen a dále jsou z něj lisovány pelety. Na vysušení je využito tepla z kogenerační jednotky, která spaluje bioplyn. Vyrobené pelety již nemají nevýhody původní biomasy (mají vyšší teplotu tání popela srovnatelnou se dřevem, a nezanášejí tak spalovací komoru).

5.6.2.1 Výhody IFBB

Pro shrnutí jsou zde uvedeny čtyři základní produkty technologie IFBB:

1. **Pevné biopalivo (pelety):** Vhodné pro přímé spalování i pro zplyňování. V budoucnu bude možné jejich další zpracování do více ušlechtilých syntetických paliv.
2. **Elektrický proud:** Ten je vyráběn v kogenerační jednotce poháněné bioplynem. S tím souvisí i výroba tepla jako vedlejšího produktu při výrobě elektrické energie.

3. **Bioplyn:** Je také možné bioplyn přímo nespalovat - a netvořit tak z něj elektrickou energii, ale uplatnit ho v jeho surovém, případně upraveném (na kvalitu zemního plynu) stavu. Takto se užije buď jako palivo pro motorová vozidla, nebo je přímo dodáván do plynové rozvodné soustavy.
4. **Digestát:** Podaří-li se jeho zkoncentrování, potom z něj bude dobré kapalné hnojivo s rychle uvolnitelnými živinami.

5.6.2.2 Ověřování IFBB

Němečtí výzkumníci se zabývají využitím hmoty z polopřirozených trvalých travních porostů právě pomocí technologie IFBB.

Nejprve se tato hmota vypírá ve vodě o různé teplotě (5, 60 a 80 °C). Probíhá to tak, že se např. siláž po krátký čas míchá s vodou a zároveň zahřívá. Tato činnost má narušit buněčné stěny a umožnit ze vstupní hmoty vytvořit řídkou míchaninu. Tato míchanina je následně mechanicky dehydratována prostřednictvím šroubového lisu. Výstupem z lisu je pevná a kapalná fáze, přičemž každá slouží následně jinému účelu.

Bylo zjištěno, že 18 % hrubé vlákniny bylo obsaženo v kapalné části, zbytek byl součástí pevného výlisku. Zastoupení stravitelných organických látek v kapalné fázi bylo následující: surová bílkovina 40 % a extrakt neobsahující dusík 31 %.²⁶

V pevné fázi bylo hodně polysacharidů - celulóza, hemicelulóza a lignin, nicméně minerálů zde bylo méně (což je ale žádoucí s ohledem na přímé spalování pevné fáze). Obsah sušiny ve hmotě, která opustila šroubový lis byl pouze 45 - 50 %. Zde nastává potřeba tuto sušinu zvýšit na hodnotu nejméně 85 % (za účelem snadné peletizace a následného uskladnění). To se děje využitím přebytečného tepla z motoru kogenerační jednotky bioplynové stanice.

Velmi potěšitelné byly výsledky obsahu hořčíku, draslíku a chlóru. Tyto prvky byly převedeny do kapalné fáze z 52 - 89 %, což bude pozitivní pro následné spalování tuhého zbytku (ochuzeného o daný podíl těchto prvků). Vápník byl rozdělen rovnoměrně mezi obě fáze (50 % pevná, 50 % kapalná).

Nejúčinněji byly prvky „vyprány“ při teplotě 60 °C (draslík a hořčík) a 80 °C (hrubá vláknina a extrakt neobsahující dusík).

Nicméně bylo zjištěno, že se kvůli této separaci na pevnou a kapalnou část vrátí (jako digestát) na původní travní porost pouze část prvků z něj vyňatých. Draslíku se „vrátí“ 64 - 85 % což neklade až tak vysoké požadavky na dodatečné hnojení. Ale dusíku do travních porostů dostane pouze 32 - 45 %. Aby byl tento úbytek dusíku napraven, tak se

ve výsledné zprávě tohoto německého výzkumu udává nutnost zvýšit v porostu zastoupení rostlin fixujících vzdušný dusík (např. leguminózy - jetel, vojtěška). Dále byla uvedena možnost aplikace popela ze spalování pevné biomasy z IFBB na travní porosty, čímž by byly doplněny minerály (kromě dusíku a uhlíku) téměř ze sta procent.

6 Pokusná část

6.1 Metodika

6.1.1 Příprava substrátu a inokulačního roztoku

Jako inokulační roztok (dále jen inokulum) byla nejprve použita hmota z kalové koncovky bioplynové stanice Chotýčany. Pro porovnání výsledků byla nakonec využita i hmota z bioplynové stanice Věžovatá Pláně.

Substrát do pokusné reaktorové sestavy byl připraven technologií IFBB. Složení substrátu bylo pro obě inokula stejné jako v BPS Chotýčany - tedy silážovaná kukuřice, travní senáž a kejda dojného skotu v poměru 2:1:1.

Postup přípravy substrátu technologií IFBB byl následující:

1. Odebrání čerstvého substrátu v BPS Chotýčany (siláž, senáž, kejda).
2. Hmota z bodu 1 byla v laboratoři rozmělněna mixérem ve vodě 60 °C teplé. Objem teplé vody byl stejný jako objem čerstvé hmoty (substrátu) z BPS. Směs teplé vody a substrátu byla po rozmělnění ponechána 30 minut v klidu (při udržování teploty na hodnotě 60 °C).
3. Směs byla po 30-ti minutách zfiltrována a pevná část byla následně zpracována lisem na ovoce. Tekutý výstup z lisu byl přidán k filtrátu.

Před samotnými měřeními docházelo k naplnění reaktorové sestavy tímto filtrátem, který byl však ředěn s vodou v poměru 1:10 (filtrát : voda), aby došlo k plnému zaplnění sestavy. Během zahajování práce sestavy byl rovněž přidán inokulační roztok v množství 100 ml. Množství substrátu (jeho filtrátu) bylo 1 dm³ a množství vody nutné na zaplnění reaktorové sestavy bylo 10 dm³. Po zahřátí celého objemu sestavy na měřicí teplotu byl odebrán vzorek pro stanovení $CHSK_{Cr}$ v nulté době zdržení.

6.1.2 Reaktorové sestava

6.1.2.1 Popis sestavy

Za účelem provádění pokusu byla sestavena laboratorní reaktorová soustava vycházející z mírně upraveného typu reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem

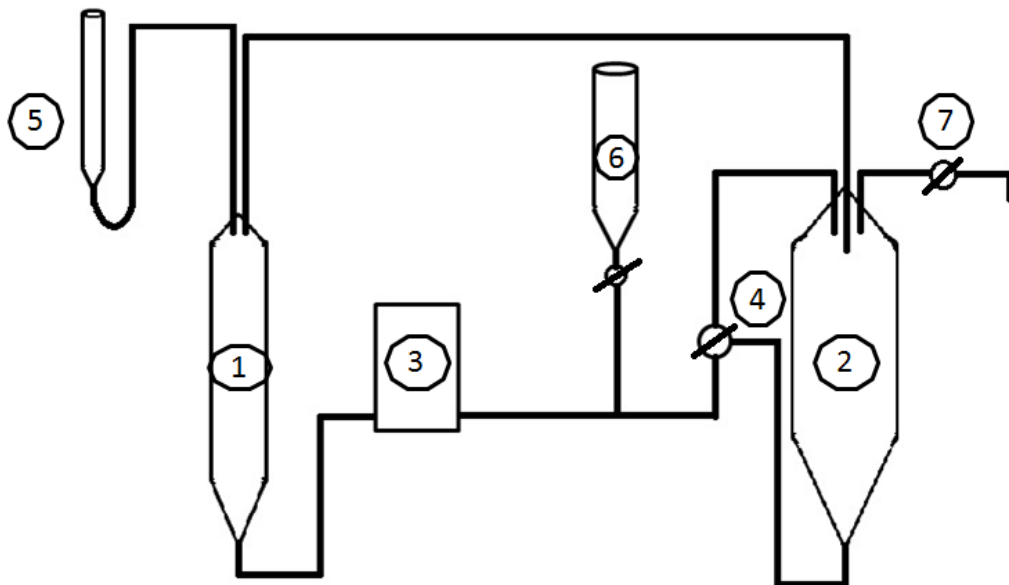
biomasy. Úprava spočívala především ve vypuštění odplynovacího zařízení, jenž se obvykle nachází mezi reaktorem a separátorem. K jeho vypuštění došlo proto, že vlastně v laboratorních podmínkách není nutné.

Laboratorní reaktorová sestava byla složena ze sedmi základních prvků. Tyto prvky byly mezi sebou propojeny plynárenskými hadičkami (obyčejné pryžové nebyly nakonec použity z důvodu jejich praskání na koncích), případně skleněnými trubičkami (ty byly součástí baněk sloužících jako reaktory).

Základními sedmi prvky reaktorové sestavy byly:

1. Reaktor
2. Separátor
3. Čerpadlo - ohřívač - termostat
4. Trojcestný ventil
5. Odvod bioplynu
6. Nálevka na inokulum
7. Vypouštěcí ventil

Obrázek 1: Nákres reaktorové sestavy



6.1.2.2 Provoz sestavy

Odstavená reaktorová sestava byla naplněna čistou vodou při teplotě shodné s teplotou v laboratorní místnosti.

V případě rozjždění sestavy za účelem měření byla nejprve digitálně nastavena požadovaná teplota provozního roztoku a zapnuto čerpadlo (to je spojeno do jednoho bloku s ohřívačem roztoku a termostatem). Po zahřátí vody v celé sestavě (cca 10 l) bylo přes nálevku nadávkováno inokulum a filtrát připravený ze substrátu technologií IFBB.

Během ustáleného provozu sestavy spočívala její obsluha pouze v kontrole případné netěsnosti ve spojích atp. Hlavní činnost se konala jednou za hodinu - a to odebráním části provozního roztoku za účelem jeho vysušení a následném stanovení CHSK_{Cr} , přičemž vzorek pro „nulové zdržení“ byl odebrán po zahřátí sestavy a nadávkování potřebných roztoků.

6.1.3 Stanovení CHSK_{Cr}

CHSK_{Cr} (chemická spotřeba kyslíku) byla v pokusné části použita jako hlavní veličina popisující účinnost odbourávání organických látek při různých režimech práce reaktoru.

Chemická spotřeba kyslíku je definována jako množství kyslíku, které se za přesně daných podmínek spotřebuje na oxidaci organických látek ve vodě silným organickým rozpouštědlem. Udává se jako hmotnost kyslíku, která je odpovídající ke spotřebě oxidačního činidla, na 1 litr vody - obvykle v mg.l^{-1} .²⁷

Metod na stanovení CHSK je mnoho. Hodnoty CHSK stanovené různými metodami však mezi sebou nejsou porovnatelné. Je to dáno tím, že různé látky se za použití různého činidla oxidují do různého stupně. V dnešní době je nejčastěji užíváno dvou metod. Jedna metoda používá jako oxidační činidlo manganistan draselný (CHSK_{Mn}) a druhá dichroman draselný (CHSK_{Cr}). Metoda s dichromanem je účinnější.

6.1.3.1 Postup stanovení CHSK_{Cr}

1. Odebrání asi 50 ml z reaktorové sestavy prostřednictvím vypouštěcího kohoutu a následné odměření potřebného objemu vzorku (5 nebo 10 ml)
2. Sušení tohoto vzorku při teplotě 70 °C až do úplného vysušení. Dle zkušeností je úplného vysušení dosaženo cca po 10 hodinách.

3. Do každého usušeného vzorku prostřednictvím pipety dolito 5 ml chromsírové směsi (0,4 N CHS).
4. Příprava tří tzv. slepých vzorků. Do prázdné kádinky se nadávkováno 5 ml chromsírové směsi (0,4 N CHS).
5. Sušení všech vzorků „obohacených“ o chromsírovou směs v sušárně při teplotě 125 °C po dobu 45 minut.
6. Během sušení příprava vzorků pro stanovení faktoru Mohrovi soli. Zde jsou opět 3 vzorky. Každý je složen z 5 ml dichromanu draselného a 1,5 - 2 ml koncentrované kyseliny sírové. Dávkováno pipetou. Následuje doplnění destilovanou vodou v množství takovém, aby elektroda titrátoru byla ponořena (cca 40 ml destilované vody).
7. Titrace pomocí digitálního titrátoru. Titrátor umožňuje titraci jak v manuálním, tak automatickém režimu. První titraci je doporučeno provádět manuálně. Titrace spočívá v hledání tzv. bodu ekvivalence. Před začátkem titrace má být napětí naměřené elektrodou ve vzorku na hodnotě kolem 800 mV. Bod ekvivalence byl nejčastěji v hodnotách kolem 600 mV. Dosažení tohoto bodu se projeví samovolným poklesem napětí na elektrodě až na hodnotu kolem 580 mV.

Při manuální titraci je ručně dávkována Mohrova sůl do vzorků (jednotlivé přídávky jsou v řádech desetin až setin mililitru) a v následném sledování napětí na elektrodě a zjištění počátku jeho trvalého samovolného poklesu.

Automatická titrace si Mohrovu sůl dávkuje sama a je schopna najít bod ekvivalence. Někdy však v tomto hledání selže - a to se pozná podle stále vysokého napětí (600 - 800 mV) na elektrodě a hlášení o ukončení měření. V případě selhání je nutno titraci opět spustit a zároveň si poznamenat množství již nadávkované Mohrovi soli. Toto množství pak přičíst k množství Mohrovi soli, jež titrátor musel nadávkovat, aby se dostal na požadovaný bod ekvivalence.

- a) Titrace vzorků připravených v bodě 6 za účelem stanovení faktoru Mohrovi soli.
 - b) Titrace vzorků ze sušárny
8. Výpočet $CHSK_{Cr}$ podle vzorce (vzorec 1):

Vzorec 1: Výpočet $CHSK_{Cr}$

$$CHSK_{Cr}(mg \cdot l^{-1}) = \frac{(V_S - V_{MS}) \cdot f \cdot 1,6 \cdot 1000}{V_V}$$

- Kde: V_S průměrný objem Mohrovi soli spotřebované při titraci slepých vzorků (ml)
 V_{MS} objem Mohrovi soli spotřebované při titraci vzorku z reaktoru (ml)
 f faktor Mohrovi soli, který se vypočte pomocí vzorce 2
 V_V objem vzorku z reaktoru (ml)

Vzorec 2: Výpočet faktoru Mohrovi soli

$$f = \frac{V_D}{V_{MSP}}$$

- Kde: V_D objem dichromanu draselného přidaného do vzorku pro stanovení faktoru (ml)
 V_{MSP} průměrný objem Mohrovi spotřebované pro titraci vzorků pro stanovení faktoru

6.2 Výsledky a diskuze

6.2.1 Provoz reaktorové sestavy s inokulem z BPS Chotýčany

BPS Chotýčany se nachází 7 km severně od Českých Budějovic. Stavbu zajistila společnost Farnet a. s. Po přibližně roční výstavbě naběhla tato stanice na plný výkon na podzim 2008. Je zde použita rovněž dvoustupňová fermentace. Je však použit pouze jeden fermentor typu „kruh v kruhu“, přičemž dofermentor je „uvnitř“ hlavního fermentoru. Toto řešení má výhodu jednak v menším zastavěném prostoru a jednak také v nižších tepelných ztrátách (oproti běžnému řešení s dvěma samostatnými fermentory. Objem obou fermentorů je 4600 m³. Samozřejmě je také nádrž na digestát. Plynojem o objemu 400 m³ je umístěn v budově, ve které se nachází rovněž velín a kogenerační jednotka.

Substrát pro tuto BPS má následující složení: kukuřičná siláž 37 %, travní senáž 24 % a hovězí kejda 39 %. Při tomto zastoupení složek substrátu je denně dávkováno do fermentoru 31 tun hmoty.

Stanice ročně vyrobí 2,38 mil. m³ bioplynu. Kogenerační jednotka GE Jenbacher 312 má elektrický výkon 526 kW a tepelný 582 kW²⁸.

6.2.1.1 Zjištění sušiny materiálu, ze kterého bylo připraveno inokulum, faktoru Mohrovi soli a spotřebu Mohrovi soli u slepých vzorků.

Materiál, ze kterého bylo připraveno inokulum byl odebrán na výstupu z dofermentoru BPS Chotýčany. Po dopravení této hmoty na katedru, byla tato hmota ihned dána do chladicího zařízení a v něm skladována při teplotě 5 °C.

Před pokusem byla hmota vyndána z chladicího zařízení a přefiltrována přes tkaninu. Takto získaných 100 ml hmoty bylo následně nadávkováno do reaktorové sestavy (předem spuštěné a zahřáté na požadovanou teplotu 50 nebo 40 °C).

Inokulum bylo stejné (sušinou) po obě měření (při 50 °C i při 40 °C). Zásoba Mohrovi soli v titrátoru však nevystačila na provedení celého měření CHSK_{Cr} (celé měření znamená kádinky 1 - 23). Proto byla po ukončení měření 19. kádinky dolita nová Mohrova sůl, pro kterou se musel stanovit nový faktor i slepý vzorek. Výsledky vzorků s novou Mohrovou solí jsou v příslušné tabulce označeny zeleně (Tabulka 5).

Tabulka 1: Stanovení sušiny hmoty pro přípravu inokula

	hmotnost vzorku (g)	sušina (%)
před vysušením	42,024	5,3
po vysušení	2,227	

Obsah sušiny v kalové koncovce 5,3 % (Tab. 1) je v zemědělských bioplynových stanicích běžný. Podobnou sušinu (6 %) zjistil i Kazda (2009)²⁹, který tuto hodnotu sušiny dále vysvětluje tím, že substrát (sušina kolem 35 %), jenž se dávkuje na vstupu do prvního fermentoru je za účelem naočkování bakteriemi ředěn právě digestátem.

Tabulka 2: Stanovení faktoru Mohrovi soli

stanovení faktoru MS				
vzorek (5 ml)	pro kádinky 1 - 19		pro kádinky 20 - 23	
	spotřeba MS (ml)	faktor MS	spotřeba MS (ml)	faktor MS
1	5,58	0,8808	4,45	1,1202
2	5,69		4,49	
3	5,76		4,45	
průměr	5,6767		4,46	

Tabulka 3: Stanovení spotřeby Mohrovi soli u slepých vzorků

slepé vzorky			
pro kádinky 1 - 19		pro kádinky 20 - 23	
vzorek (5 ml CHS)	spotřeba MS (ml)	vzorek (10 ml CHS)	spotřeba MS (ml)
1	11,15	1	8,78
2	11,16		
3	11,20		
průměr	11,17		

Čísla uvedená v Tabulkách 2 a 3 (faktor Mohrovi soli a spotřeba Mohrovi soli na titraci slepých vzorků) jsou nutná pro správné dosazení do Vzorce 1. Byla zjištěna laboratorními metodami - hlavně titrací.

Množství Mohrovi soli v zásobníku titrátoru však bylo špatně odhadnuto. Velký počet vzorků (cca 25) měřených během jednoho dne vyvolal nutnost doplnění Mohrovi soli, stanovení jejího nového faktoru a stanovení i nového slepého vzorku. Právě proto jsou Tabulky 9 a 10 rozděleny podle čísel kádinek na 1 - 19 (první Mohrova sůl) a 20 - 23 (druhá Mohrova sůl).

6.2.1.2 Stanovení CHSK_{Cr} při 40 °C

Tabulka 4: Stanovení CHSK_{Cr} při 40 °C

kádinka	doba zdržení vzorku (h)	vzorek z reaktoru (ml)	přidáno chromsírové směsi (ml)	potřeba Mohrovi soli (ml)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹) průměr
1	0	10	5	8,94	314,27	314,27
2	1	10	5	8,93	315,68	310,75
3		10	5	9,00	305,81	
4	2	10	5	9,04	300,18	311,45
5		10	5	8,88	322,72	
6	3	10	5	9,01	304,40	304,40
7		10	5	9,27	267,76	
8	4	10	5	8,93	315,68	311,45
9		10	5	8,99	307,22	
10	5	10	5	8,86	325,54	314,27
11		10	5	8,94	314,27	

Jak vyplývá z Tab. 4, teplota procesu 40 °C nevedla k účinnému odbourání organické hmoty. Do třech hodin po rozjezdu reaktoru sice byla organická hmota odbourávána, nicméně toto odbourávání se počínaje čtvrtou hodinou zastavilo a tento stav trval až do konce páté hodiny měření.

Vysvětlením může být právě inokulum z BPS Chotýčany. Buď v něm nebylo dostatek aktivních mikroorganismů, což mohlo být způsobeno již samotnou přepravou digestátu z BPS na katedru za účelem přípravy inokula. Během skladování připraveného inokula mohlo v chladničce dojít i k jeho podchlazení. Rizikem mohlo být i nedostatečně umyté laboratorní vybavení, na němž se mohla vyskytovat nějaké inhibiční látka. Stejně tak i nižší teplota procesu (40 °C) mohla vést k inhibici mikroorganismů. Mohlo se také jednat o velmi „vyhladovělé“ inokulum³⁰.

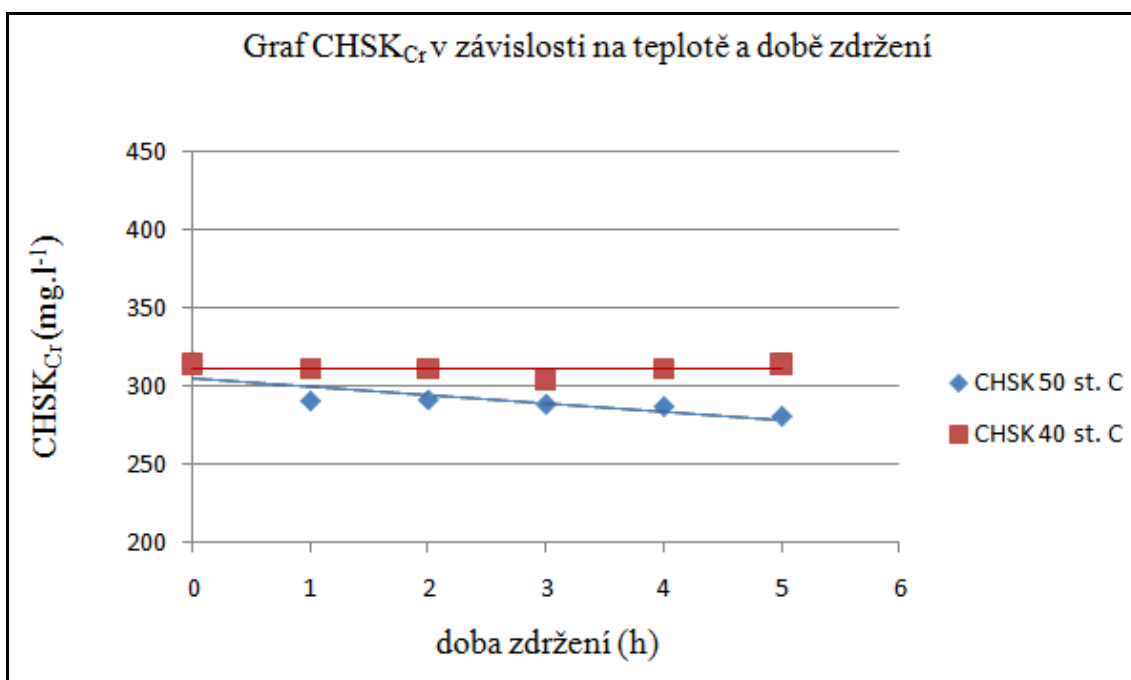
6.2.1.3 Stanovení CHSK_{Cr} při 50 °C

Tabulka 5: Stanovení CHSK_{Cr} při 50 °C

kádinka	doba zdržení vzorku (h)	vzorek z reaktoru (ml)	přidáno chromsírové směsi (ml)	potřeba Mohrovi soli (ml)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹) průměr
12	0	10	5	8,95	312,86	315,68
13		10	5	8,91	318,50	
14	1	10	5	9,19	279,04	290,31
15		10	5	9,03	301,59	
16	2	10	5	9,09	293,13	291,02
17		10	5	9,12	288,90	
18	3	10	5	9,16	283,26	288,20
19		10	5	9,09	293,13	
20	4	10	5	7,21	281,40	286,78
21		10	5	7,15	292,16	
22	5	10	5	7,22	279,61	280,51
23		10	5	7,21	281,40	

Měření při teplotě 50 °C přineslo mnohem lepší výsledky. Jak je uvedeno v Tabulce 5, chemická spotřeba kyslíku klesá s rostoucí dobou zdržení hmoty v reaktoru, což je správný trend. Z této „plynulosti“ vybočuje pouze údaj z druhé hodiny zdržení. Zde byla totiž vypočtena lehce vyšší CHSK_{Cr} než po předchozí, hodinové hodnotě. To si vysvětlují nějakou chybou ve vyhodnocení vzorku - titraci.

Graf 1: CHSK_{Cr} při 40 a 50 °C



V Grafu 1 jsou uvedeny výsledky CHSK_{Cr} v závislosti na době zdržení a teplotě procesu. Jednotlivé body byly proloženy lineární spojnicí trendu. Jak tyto spojnice jasně ukazují, vhodnější teplota pro anaerobní fermentaci substrátu z BPS Chotýčany a inokula ze stejné stanice je 50°C. Při této teplotě totiž došlo během stejné doby k vyššímu odbourání organických látek.

Právě teplota 50 °C mohla být pro metanogenní a jiné rozkládající mikroorganismy z inokula vhodnější.

6.2.2 Provoz reaktorové sestavy s inokulem z BPS Věžovatá Pláně

Toto měření bylo provedeno vlastně nad rámec zadání této diplomové práce. Jeho hlavním účelem bylo mít porovnání pro měření předešlé - měření provozu reaktoru s inokulem z BPS Chotýčany. Výsledek tohoto srovnání je uveden v závěru této práce.

Bioplynová stanice Věžovatá Pláně se nalézá 8 km jihovýchodně od Českého Krumlova. Dodavatelem stavby byla firma agriKomp Bohemia s. r. o. Zemní práce byly započaty v září 2008, v lednu 2009 se začal rozbíhat fermentační proces a v březnu 2009 již stanice pracovala na plný výkon. Je využito dvoustupňové fermentace.

Objem fermentoru je 1526 m³, dofermentoru 1885 m³ a koncového skladu na digestát 2944 m³.

Substrát pro tvorbu bioplynu je tvořen: kukuřičná siláž 32 %, luční travní senáž 32 %, hovězí hnůj 26 % a voda 10 %. Celková denní vsádka je 19 tun hmoty při dodržení výše zmíněného zastoupení jednotlivých částí substrátu.

Elektrický výkon této stanice je 250 kW. Výrobce kogenerační jednotky je firma Schnell ES 2507. Ročně je zde vyrobeno kolem 1 mil. m³ bioplynu.³¹

6.2.2.1 Zjištění sušiny materiálu, ze kterého bylo připraveno inokulum, faktoru Mohrovi soli a spotřebu Mohrovi soli u slepých vzorků.

Materiál, z něhož bylo získáno inokulum pro pokusné reaktory byl získán z kalové koncovky BPS Věžová Pláně. Po jeho dopravení na katedru byl až do počátku pokusu udržován při teplotě 5 °C v chladícím zařízení. Před začátkem pokusu byl vyjmut z chladu a přefiltrován přes filtrační papír. Tento filtrát následně posloužil jako inokulum reaktorové sestavy pro oba pokusy - tedy jak při 50 °C, tak později při 40 °C. Mezi těmito dvěma pokusy bylo zbylé inokulum vloženo zpět do chladícího zařízení.

Sušina materiálu, z něhož bylo inokulum je proto počítána pouze jednou. Naopak, faktor Mohrovi soli a spotřeba Mohrovi soli na slepý vzorek je počítána pro každou teplotu měření zvlášť. Je to proto v době mezi vyhodnocováním jednotlivých pokusů byla doplněna nová Mohrova sůl.

Substrát pro toto měření pocházel z BPS Chotýčany a prošel stejnou vstupní úpravou jako v bodě 6.2.1 (IFBB).

Tabulka 6: Stanovení sušiny hmoty pro přípravu inokula

	hmotnost vzorku (g)	sušina (%)
před vysušením	131,706	5,1
po vysušení	6,751	

Jak je vidět v Tabulce 6, tak sušina hmoty z kalové koncovky (digestátu) BPS Věžovatá Pláně byla podobná sušině digestátu z BPS Chotýčany.

6.2.2.2 Stanovení $CHSK_{Cr}$ při 50 °C

Pro výpočet $CHSK_{Cr}$ bylo nutno nejprve stanovit faktor Mohrovi soli v titrátoru a také spotřebu Mohrovi soli na titraci slepých vzorků.

Odběry vzorků z reaktoru byly i v tomto měření odebírány ve stejných časových rozestupech jako v měření v bodě 6.2.1.

Tabulka 7: Stanovení faktoru MS

stanovení faktoru MS		
vzorek (5 ml)	spotřeba MS (ml)	faktor MS
1	5,09	0,9823
2	5,09	
3	5,1	
průměr	5,09	

Tabulka 8: Stanovení spotřeby Mohrovi soli u slepých vzorků

slepé vzorky	
vzorek (5 ml CHS)	spotřeba MS (ml)
1	9,88
2	9,95
3	9,91
průměr	9,91

Čísla v Tabulkách 7 a 8, z nichž jsou následně počítány průměry jsou si docela podobná, tudíž je stanovení průměrných hodnot v obou tabulkách velmi přesné a může to být dáno i již zvládnutou metodikou jejich měření.

Tabulka 9: Stanovení CHSK_{Cr} při 50 °C

kádinka	doba zdržení vzorku (h)	vzorek z reaktoru (ml)	přidáno chromsírové směsi (ml)	potřeba Mohrovi soli (ml)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹)	CHSK _{Cr} (mg.l ⁻¹) průměr
1	0	5	5	8,79	310,17	301,0
2		5	5	8,85	291,75	
3	1	5	5	8,93	267,18	270,2
4		5	5	8,91	273,32	
5	3	5	5	9,06	227,26	228,8
6		5	5	9,05	230,33	
7	4	5	5	9,27	162,76	162,8
8		5	5	9,27	162,76	
9	5	5	5	9,43	113,63	113,6
10		5	5	9,43	113,63	

Výsledky CHSK_{Cr} v Tabulce 9 při 50 °C se dají hodnotit jako výborné. Během měření došlo za pět hodin odbourání více než poloviny organických látek v substrátu. Odbourávání organických látek mělo navíc s prodlužující se dobou zdržení zrychlující průběh.

Jelikož takto dobrý průběh nevykazoval běh reaktoru s inokulem z BPS Chotýčany, lze usuzovat, že inokulum z BPS Věžovatá Pláně je mnohem lepší pro použití v laboratorní reaktorové sestavě.

6.2.2.3 Stanovení CHSK_{Cr} při 40 °C

Po prvním měření při 50 °C následovalo doplňující měření při reaktorové teplotě 40 °C. Hlavním účelem tohoto měření bylo zjistit, zdali se při této teplotě organické látky odbourávají lépe či hůře než při předchozí teplotě.

Jelikož toto měření bylo provedeno s větším časovým odstupem od toho předchozího, tak bylo nutné znovu stanovit faktor Mohrovi soli i slepé vzorky. Sušina materiálu pro inokulum byla stejná, jelikož byl tento materiál uchován v chladničce bez působení vnějších vlivů.

Tabulka 10: Stanovení faktoru MS

stanovení faktoru MS		
vzorek (5 ml)	spotřeba MS (ml)	faktor MS
1	5,58	0,9597
2	5,24	
3	5,17	
průměr	5,21	

Tabulka 11: Stanovení spotřeby Mohrovi soli u slepých vzorků

slepé vzorky	
vzorek (5 ml CHS)	spotřeba MS (ml)
1	9,63
2	9,97
3	9,80
průměr	9,80

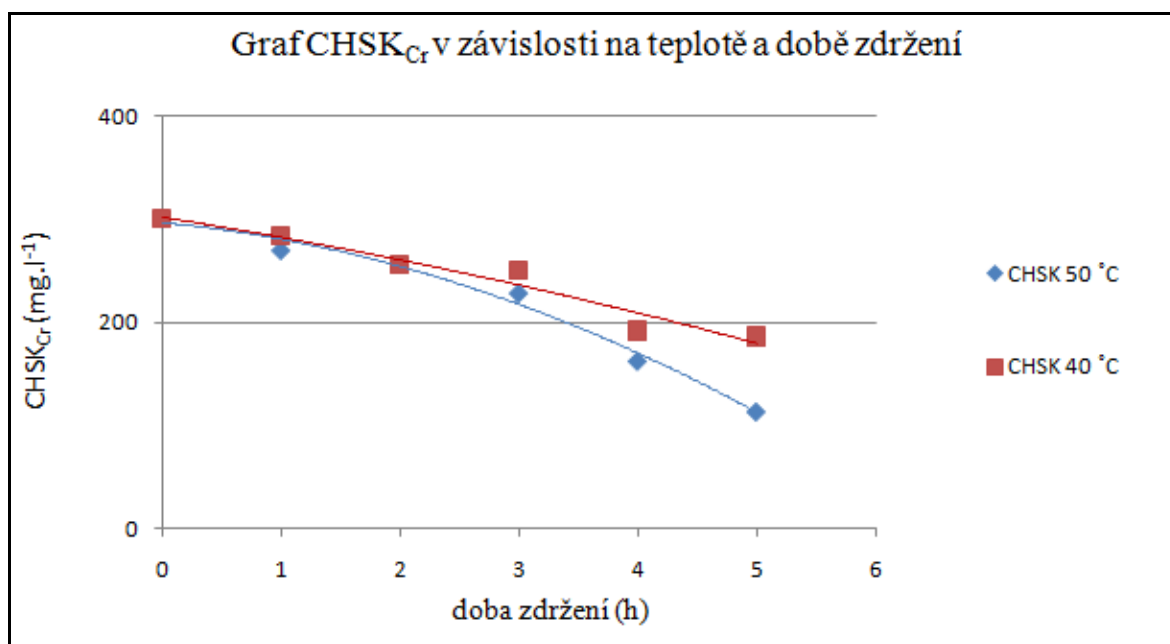
Hodnoty v Tabulkách 10 a 11 jsou podobné hodnotám v Tab. 7 a 8 a svědčí tak o použití Mohrovi soli s obdobnými vlastnostmi pro obě měření (40 i 50 °C).

Tabulka 12: Stanovení CHSK_{Cr} při 40 °C

kádinka	doba zdržení vzorku (h)	vzorek z reaktoru (ml)	přidáno chromsírové směsi (ml)	potřeba Mohrovi soli (ml)	CHSK _{Cr} (mg.l. ⁻¹)	CHSK _{Cr} (mg.l. ⁻¹) průměr
1	0	10	5	8,00	300,80	299,98
2		10	5	8,01	299,15	
3	1	10	5	8,20	269,29	284,22
4		10	5	8,01	299,15	
5	2	10	5	8,42	234,71	255,93
6		10	5	8,15	277,14	
7	3	10	5	8,12	281,86	250,43
8		10	5	8,52	218,99	
9	4	10	5	8,69	192,27	191,49
10		10	5	8,70	190,70	
11	5	10	5	8,75	182,84	185,99
12		10	5	8,71	189,13	

Výsledek měření při 40 °C je uveden v Tabulce 12. Jak z jeho výsledků vyplývá, došlo rovněž k účinnému rozkladu organických látek. Největší skok v poklesu CHSK_{Cr} byl pozorován mezi třetí a čtvrtou hodinou měření. Nicméně ani před koncem měření (mezi čtvrtou a pátou hodinou) nebyl rozklad organických látek v reaktoru v útlumu.

Graf 2: CHSK_{Cr} při 40 a 50 °C



Graf 2, jenž názorně shrnuje výsledek provozu reaktorové sestavy s inokulem z BPS Věžovatá Pláně a substrátem z bioplynové stanice Chotýčany jasně ukazuje, že zde použité inokulum má mnohem větší vliv na odbourávání organické hmoty ze substrátu. Ve srovnání s Grafem 1 (inokulum Chotýčany) má Graf 2 mnohem dynamičtější průběh křivek odbourávání organické hmoty.

Také rozdíl mezi počáteční a konečnou hodnotou CHSK_{Cr} je v Grafu 2 vyšší než v Grafu 1. V Grafu 2 je také vidět větší rozdíl mezi v rychlosti odbourávání organických látek v závislosti na jednotlivých teplotách, přičemž účinnější odbourávání je při teplotě 50 °C.

6.3 Závěr

Příprava substrátu pro laboratorní reaktorovou sestavu technologií IFBB, která spočívala ve smíchání čerstvého substrátu BPS Chotýčany ve stejném objemu vody 60 °C teplé - to vše ponechané při dané teplotě 30 minut v klidu byla dobře zvládnuta i v laboratorních podmínkách za použití mixéru a následně i lisu na ovoce. Filtrát, jako výstup z procesu IFBB byl po smísení s vodou (v poměru 1:1) potom využit jako náplň reaktorové sestavy. Nakládání s filtrátem bylo jednoduché, stejně tak i samotný provoz sestavy byl bezproblémový. Bylo to hlavně proto, že filtrát neobsahoval hrubé části, které by mohly zacpávat jednotlivé prvky v reaktorové sestavě (nejcitlivější by bylo čerpadlo a spojovací články mezi jednotlivými hlavními prvky sestavy).

Dle zadání této práce se mělo měřit pouze se substrátem i inokulem z BPS Chotýčany. Po dohodě s vedoucím této práce bylo provedeno i srovnávací měření. V tomto srovnávacím měření byl použit rovněž substrát z BPS Chotýčany, avšak jako inokulum bylo použito upraveného digestátu z kalové koncovky BPS Věžovatá Pláně.

Při měření bylo totiž zjištěno, že inokulum z BPS Chotýčany nebylo až tak vhodné pro fermentaci substrátu ze stejné bioplynové stanice v použitém reaktoru s kalovým mrakem a externím separátorem biomasy. Odbourávání organické hmoty nebylo příliš účinné, zvláště během fermentační teploty 40 °C. Při této teplotě se v reaktoru téměř žádná organická hmota neodbourala a $CHSK_{Cr}$ byla jak na začátku tak na konci procesu na hodnotě 314 $mg.l^{-1}$. Teplota 50 °C vedla k účinnějšímu ($CHSK_{Cr}$ poklesla ze 316 na začátku fermentace na 281 $mg.l^{-1}$ na konci fermentace) odbourávání organických látek, avšak zdaleka ne tolik, jako během srovnávacího měření s použitím inokula z Věžovatých Plání. Substrát inokulovaný z BPS Věžovatá Pláně byl při obou teplotách lépe fermentován. Jeho $CHSK_{Cr}$ poklesla z hodnoty 300 $mg.l^{-1}$ po pětihodinovém provozu reaktoru na 186 $mg.l^{-1}$ při 40 °C a na 114 $mg.l^{-1}$ při teplotě 50 °C.

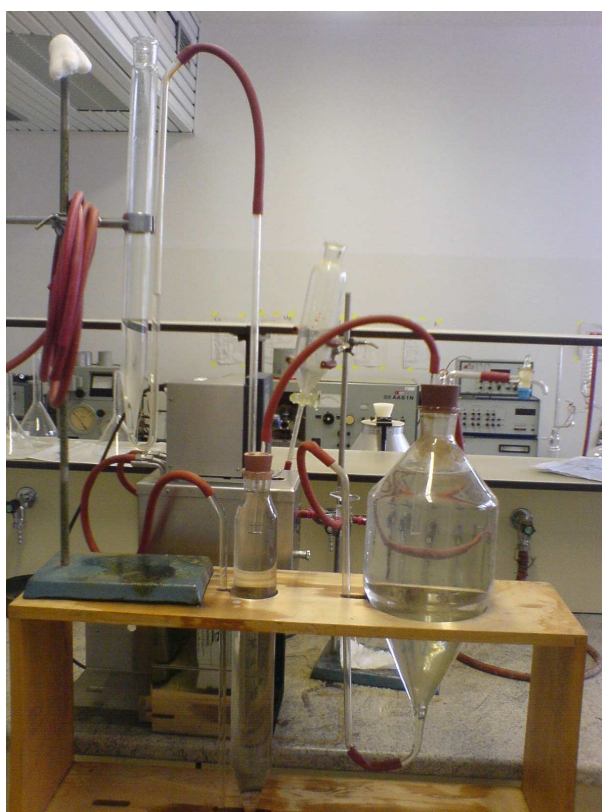
Hmota odebraná z kalové koncovky BPS Chotýčany, ze které bylo potom v laboratoři připraveno inokulum pravděpodobně utrpěla vlastní přepravou z bioplynové stanice do laboratoře na katedře. Rovněž mohla aktivita mikroorganismů poklesnout po skladování v chladničce. Naopak, hmota pro přípravu inokula z BPS Věžovatá Pláně nijak během přepravy i skladování v chladničce neztratila na aktivitě v ní obsažených metanogenních mikroorganismů. Vysvětlením může být i složení substrátu do těchto bioplynových stanic. Obě stanice používají jako vstupní suroviny travní senáž a

kukuřičnou siláž. Liší se však v druhu statkových odpadů, kdy na vstupu do BPS Chotýčany je kejda skotu a BPS Věžovatá Pláně využívá chlévské mrvy od skotu. Bylo-li by toto vysvětlení tím pravým, pak lze říct, že přítomnost chlévské mrvy na vstupu do bioplynové stanice je pro přežití (odolnost) metanogenních mikroorganismů mimo samotný fermentor vhodnější.

6.4 Obrazová příloha



Obrázek 2: Reaktorová sestava za provozu



Obrázek 3: Reaktorová sestava v klidu bez inokula



Obrázek 4: Titrátor Schott



Obrázek 5: Vzorek na začátku titrace



Obrázek 6: Vzorek na konci titrace

7 Použitá literatura

- ¹ SEIFERTOVÁ, E. Příliv bioplynových stanic ještě nekončí. *Zemědělec*. 2011, 6, s. 27. ISSN 1211-3816.
- ² PASTOREK, Z.: Využití biomasy k energetickým účelům, kap. 10. In: CENEK, M. a kol.: *Obnovitelné zdroje energie*. II. vydání. Praha, FCC Public 2000
- ³ SYROVÝ, O., et al. *Doprava v zemědělství*. Praha : Profi Press, 2008. 248 s. ISBN 978-80-86726-30-4.
- ⁴ HABART, J.; STUPAVSKÝ, V. Potenciál zemědělských bioplynových stanic. *Energie* 21. 2010, III, 5, s. 18 - 20. ISSN 1833-0394.
- ⁵ STRAKA, F., et al. *Bioplyn*. Praha : GAS s. r. o., 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
- ⁶ ARCHER, D. B.; ROBERTSON, J. A.; PECK, M. W. *The Microbiology and Biochemistry of Biogas Production from Solid Wastes*. Chester : Richards, 1988. 393 - 405
- ⁷ DOHANYOS, M.; MARTAN, P. *Anaerobní čištění odpadních vod*. Praha : Vodní hospodářství, 1985. 219 - 223 s.
- ⁸ KÁRA, J.; PASTOREK, Z.; PŘIBYL, E. . *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha : VÚZT, v.v.i., 2007. 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8.
- ⁹ DOHANYOS, M. Možnosti intenzifikace metanizačního procesu. *Vodní hospodářství*. 1982, 32, s. 179 - 186.
- ¹⁰ BAUCHOP, T.; ELSDEN, S. R. . The growth of mikroorganismů in relation to their energy supply : Energy and mikroorganismů. In *Energy*. Bonn : GMN, 1960. s. 457 - 969
- ¹¹ GIJZEN, H. J. *Anaerobic Digestion of Cellulosic Waste*. Nijmegen, 1998. 50 s. Dizertační práce. University Nijmegen.
- ¹² BRYANT, M. P. Methane producing bacteria. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*. 1974, 8, s. 10 - 12.
- ¹³ ARCHER, D. B.; KIRSOP, B. H. The microbiology and control of anaerobic digestion. *Anaerobic digestion: A Waste Treatment Technology*. 1990, 31, s. 43 - 92.

-
- ¹⁴ SRIVASTAVA, V. J., et al. *Methanogenic Gasification of Wood*. New Orleans : IGT, 1989. 60 s.
- ¹⁵ KÁRA, J., et al. *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha : VUZT, v.v.i., 2007. 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8.
- ¹⁶ KUŽEL, S.; KOLÁŘ, L.; PETERKA, J. . Jak efektivně využít digestát z bioplynových stanic. *Energie 21*. 2010, III, 3, s. 16 - 17. ISSN 1803-0394.
- ¹⁷ MARADA, P., et al. *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem*. Brno : MZLU, 2008. 30 s.
- ¹⁸ DOHANYOS, M. *Anaerobní čistírenské technologie*. Brno : NOELL, 1998. 26 s.
- ¹⁹ SELDENGLANZ, J. Kam míří vývoj bioplynových stanic. *Zemědělec*. 2011, 6, s. 28. ISSN 1211-3816.
- ²⁰ DOHANYOS, M.; MARTAN, P.; ZÁBRANSKÁ, J. Biofilmové anaerobní reaktory. *Kvasný průmysl*. 1985, 31, s. 170 - 172.
- ²¹ JENÍČEK, P. *Čištění farmaceutických odpadních vod vysokovýkonnými anaerobními reaktory* . Praha, 1989. 45 s. Dizertační práce. VŠCHT.
- ²² ORRICO, Amorim ; CAROLINA, Ana . *Anaerobic biodigestion of manure*. Dourados : Fac, 2011. 40 s.
- ²³ ZHENWEI, Zhu. << Back to results list Previous Record Record 12 of 4 780 Next Record Record from Web of Science® Enhancing biomethanation of municipal waste sludge with grease trap waste as a co-substrate. *Renewable energy*. 2011, 36, s. 1808 - 1807.
- ²⁴ KOLONIČNÝ, Jan. Emise při spalování biomasy. *Biom CZ* [online]. 2010, 5, [cit. 2011-03-23]. Dostupný z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2>>.
- ²⁵ WEIZHANG, Zhong. Comparison of chemical and biological pretreatment of corn straw for biogas production by anaerobic digestion. *Renewable energy*. 2011, 6, s. 1875 - 1879.
- ²⁶ Utilization of semi-natural grassland through integrated generation of solid fuel and biogas from biomass. In WACHENDORF, M., et al. *Grass and forage science*. Kassel : Blackwell Publishing, 2009. s. 132 - 143.

²⁷ HORÁKOVÁ, M.; LISCHKE, P.; GRÜNWALD, A. *Chemické a fyzikální analýzy vod*. Praha : SNTL, 1989. 99 - 111 s.

²⁸ *Biom* [online]. 2009 [cit. 2011-03-21]. Bioplynová stanice Chotýčany. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/produkty-a-sluzby/bioplynovy-stance/bioplynova-stance-chotycany>>.

²⁹ KAZDA, R. Energetické využití bioplynu : Projekt bioplynové stanice. In *Energie z biomasy X. - odborný seminář*. Brno : VUT, 2009. s. 2 - 6.

³⁰ ZÁBRANSKÁ, J. Anaerobní rozložitelnost organických látek a aktivita anaerobní biomasy. *Biom CZ*. 2009, 12, s. 2 - 10.

³¹ *Calla.cz* [online]. 2009 [cit. 2011-02-11]. Bioplynové zdroje - Věžovatá Pláně. Dostupné z WWW: <<http://www.calla.cz/atlas/detail.php?kat=1&id=1588>>.