



Agronomická  
fakulta

Mendelova  
univerzita  
v Brně



**Provozní diagnostika bioplynových stanic**  
Diplomová práce

*Vedoucí práce:*  
Mgr. Milan Geršl, Ph.D.

*Vypracovala:*  
Bc. Tereza Dokulilová

**zadání**

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem práci „Provozní diagnostika bioplynových stanic“ 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 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**

Na tomto místě bych chtěla poděkovat vedoucímu diplomové práce Mgr. Milanu Geršlovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi poskytoval během řešení této práce. Dále bych chtěla poděkovat pracovníkům Ústavu zemědělské, potravinářské a environmentální techniky za ochotu a cenné rady při provádění laboratorních měření.

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu Postdoktorské pozice v technických a ekonomických oborech na MENDELU (CZ.1.07/2.3.00/30.0031).

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce stručně popisuje proces anaerobní fermentace, rozdělení bioplynových stanic a vybrané parametry, které byly sledovány v praktické části. V praktické části byly při laboratorním testování anaerobní fermentace v Celorepublikové referenční laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně sledovány následující parametry: složení a množství vznikajícího bioplynu, konduktivita, oxidačně redukční potenciál, pH, obsah sušiny, celkového organického uhlíku, celkový obsah dusíku v sušině a poměr C:N ve zpracovávaném materiálu. Výsledky analyzovaných parametrů byly vyhodnoceny, interpretovány a na jejich podkladě byly navrženy možnosti jejich použití pro screeningovou diagnostiku provozních stavů bioplynových stanic.

**Klíčová slova:** anaerobní fermentace, bioplyn, konduktivita, oxidačně redukční potenciál, pH, sušina, celkový organický uhlík (TOC), celkový obsah dusíku (TKN), poměr C:N

## **ABSTRACT**

This thesis briefly describes the process of anaerobic digestion, distribution of biogas plants and selected parameters that were monitored in the practical part of thesis. In the practical part the laboratory testing of anaerobic digestion was performed in a Nationwide reference laboratory of biogas transformation at Mendel University in Brno. There were following parameters monitored: the composition and quantity of the biogas, conductivity, redox potential, pH, dry matter, total organic carbon, total nitrogen content in the dry matter and C:N ratio in the processed material. The obtained results were evaluated, interpreted and according to them there were suggested options for their use in screening diagnostic of biogas plants condition.

**Keywords:** anaerobic digestion, biogas, redox potential, pH, dry matter, total organic carbon, total nitrogen content, C:N ratio

## Obsah

|       |                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | ÚVOD .....                                                                    | 8  |
| 2     | CÍL .....                                                                     | 9  |
| 3     | SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ .....                                                  | 10 |
| 3.1   | Rozšíření výroby bioplynu .....                                               | 10 |
| 3.2   | Bioplynové stanice .....                                                      | 11 |
| 3.2.1 | Rozdělení bioplynových stanic podle původu vstupních surovin .....            | 13 |
| 3.2.2 | Rozdělení bioplynových stanic podle dávkování vstupního materiálu .....       | 14 |
| 3.2.3 | Rozdělení bioplynových stanic podle obsahu sušiny ve vstupním materiálu ..... | 15 |
| 3.2.4 | Rozdělení bioplynových stanic podle konstrukčního typu fermentoru .....       | 15 |
| 3.2.5 | Rozdělení bioplynových stanic podle počtu fermentorů zařazených v sérii ..... | 16 |
| 3.2.6 | Rozdělení bioplynových stanic podle teplotního režimu .....                   | 17 |
| 3.3   | Proces anaerobní fermentace .....                                             | 17 |
| 3.4   | Produkty anaerobní fermentace .....                                           | 19 |
| 3.4.1 | Bioplyn .....                                                                 | 19 |
| 3.4.2 | Fermentační zbytek .....                                                      | 20 |
| 3.5   | Základní sledované parametry .....                                            | 21 |
| 3.5.1 | Množství a složení bioplynu .....                                             | 21 |
| 3.5.2 | Konduktivita .....                                                            | 22 |
| 3.5.3 | Oxidačně redukční potenciál (Eh) .....                                        | 23 |
| 3.5.4 | Vodíkový exponent (pH) .....                                                  | 23 |
| 3.5.5 | Sušina .....                                                                  | 24 |
| 3.5.6 | Celkový obsah organického uhlíku (TOC) .....                                  | 24 |
| 3.5.7 | Celkový obsah dusíku v sušině (TKN) .....                                     | 25 |
| 3.5.8 | Poměr C:N .....                                                               | 25 |
| 4     | MATERIÁL A METODIKA .....                                                     | 27 |
| 4.1   | Průběh testu .....                                                            | 27 |
| 4.2   | Vzorkování .....                                                              | 29 |
| 4.3   | Metodika stanovení sledovaných parametrů .....                                | 30 |
| 4.3.1 | Stanovení množství a složení bioplynu .....                                   | 30 |
| 4.3.2 | Stanovení konduktivity .....                                                  | 31 |
| 4.3.3 | Stanovení oxidačně redukčního potenciálu (Eh) .....                           | 31 |
| 4.3.4 | Stanovení vodíkového exponentu (pH) .....                                     | 32 |
| 4.3.5 | Stanovení sušiny .....                                                        | 32 |
| 4.3.6 | Úprava a uchování vzorků .....                                                | 33 |

|       |                                                          |    |
|-------|----------------------------------------------------------|----|
| 4.3.7 | Stanovení celkového obsahu organického uhlíku (TOC)..... | 33 |
| 4.3.8 | Stanovení celkového dusíku v sušině (TKN).....           | 34 |
| 5     | VÝSLEDKY A DISKUZE .....                                 | 37 |
| 5.1   | Průběh testu.....                                        | 37 |
| 5.2   | Množství a složení bioplynu .....                        | 37 |
| 5.3   | Konduktivita.....                                        | 43 |
| 5.4   | Oxidačně redukční potenciál (Eh).....                    | 45 |
| 5.5   | Vodíkový exponent (pH).....                              | 47 |
| 5.6   | Sušina .....                                             | 48 |
| 5.7   | Celkový obsah organického uhlíku (TOC) .....             | 49 |
| 5.8   | Celkový obsah dusíku v sušině (TKN) .....                | 51 |
| 5.9   | Poměr C:N.....                                           | 52 |
| 6     | ZÁVĚR .....                                              | 54 |
| 7     | SEZNAM ZDROJŮ .....                                      | 55 |
| 8     | SEZNAM OBRÁZKŮ .....                                     | 60 |
| 9     | SEZNAM TABULEK.....                                      | 62 |
| 10    | POUŽITÉ ZKRATKY .....                                    | 63 |
| 11    | PŘÍLOHY .....                                            | 64 |

# 1 ÚVOD

Výroba bioplynu a jeho využívání jako zdroje pro výrobu elektrické, ale i tepelné energie je v posledních letech na zřetelném vzestupu.

Bioplyn vzniká při anaerobní fermentaci, což je složitý soubor mikrobiálních procesů, proto není možné provozovat technologii bioplynové stanice bez podrobné analýzy složení vstupního materiálu. Důležité je proces anaerobní fermentace sledovat a řídit také v jeho průběhu, aby byly zajištěny optimální podmínky pro mikrobiální společenstvo a díky tomu byla produkce bioplynu co nejvyšší. Proto se tato práce zabývá charakteristikami zpracovávaného materiálu a jejich změnami v průběhu anaerobní fermentace.

V praktické části byly sledovány vybrané parametry při laboratorním testování anaerobní fermentace v Celorepublikové referenční laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně. Doba zdržení materiálu ve fermentoru byla 26 dní. Během tohoto období bylo jedenkrát denně odečítáno množství produkovaného bioplynu a měřeno jeho složení. V průběžně odebíraných vzorcích zpracovávaného materiálu byla stanovována konduktivita, oxidačně redukční potenciál, pH, obsah sušiny, obsah celkového organického uhlíku. Na počátku (po přidání testovaného materiálu) a konci testu byl také stanoven celkový obsah dusíku v sušině.

Výsledky analyzovaných parametrů byly vyhodnoceny, interpretovány a na jejich podkladě byly navrženy možnosti jejich použití pro screeningovou diagnostiku provozních stavů bioplynových stanic.

## 2 CÍL

Cílem této diplomové práce je zhodnotit současný stav řešené problematiky, popsat technologie bioplynových stanic a parametry vhodné pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. Dále popsat metodiku testování a měření zvolených parametrů, tedy množství a složení produkovaného bioplynu, konduktivity, oxidačně redukčního potenciálu, pH, obsahu sušiny, obsahu celkového organického uhlíku a celkového obsahu dusíku v sušině v průběžně odebíraných vzorcích zpracovávaného materiálu. Provést měření těchto parametrů, vyhodnotit dosažené výsledky a na jejich podkladě vyvodit závěry a doporučení, uplatnitelná nejen v laboratorních podmínkách, ale i v komerčně provozovaných bioplynových stanicích.

### 3 SOUČASNÝ STAV POZNATKŮ

#### 3.1 Rozšíření výroby bioplynu

Energeticky využitelný bioplyn je vyráběn v bioplynových stanicích a čistírnách odpadních vod s anaerobní stabilizací kalu. Bioplyn vzniká také v tělesech komunálních skládek. Vstupní suroviny pro výrobu bioplynu jsou poměrně rozmanité, jedná se především o materiály, které je z ekonomického i technického hlediska nevhodné spalovat. Vhodné suroviny vznikají hlavně v zemědělství, jedná se o odpadní či cíleně pěstovanou biomasu a exkrementy hospodářských zvířat (Čermáková, Tenkrát, 2011).

Právě zemědělské bioplynové stanice jsou nejen v ČR, ale i jinde v Evropě, zejména v Německu, Rakousku či Itálii, na předních místech v počtu i instalovaném výkonu. Výstavba nových zemědělských bioplynových stanic je v souladu se zdravou ekonomikou provozovatele a využitím potenciálu vstupních materiálů. Zemědělské bioplynové stanice zvyšují úroveň využití místních zemědělských produktů, resp. odpadů, bez nutnosti dopravovat je na dlouhé vzdálenosti a také přispívají k rozvoji venkova, především při využití tepelné energie, kterou produkují kogenerační jednotky. Teplo je nejčastěji využíváno k vytápění zemědělských objektů, skladů, dílen, garáží, méně často i škol, sportovních zařízení nebo celých vesnic. Teplo se také často využívá k sušení různých materiálů, krmiv i potravin. Existují i specializované provozy, které teplo využívají v průmyslových technologiích nebo v návaznosti na zemědělství ve zpracovatelském průmyslu od masokombinátů, mlékáren, palíren po koželužny. Vedle bioplynových stanic tak často vyrůstají nové stáje pro hospodářská zvířata, chovy ryb, třídící a hygienizační linky na zpracování odpadů, sklady s řízenou atmosférou, výroby krmiv a potravin, pěstírny zeleniny, hub, květin nebo bylinek. Budováním přidružených výroby zemědělské bioplynové stanice přispívají k nárůstu počtu pracovních míst nejen v přímé souvislosti s vlastním provozem (Vítěz et al., 2013; Moravec, 2015).

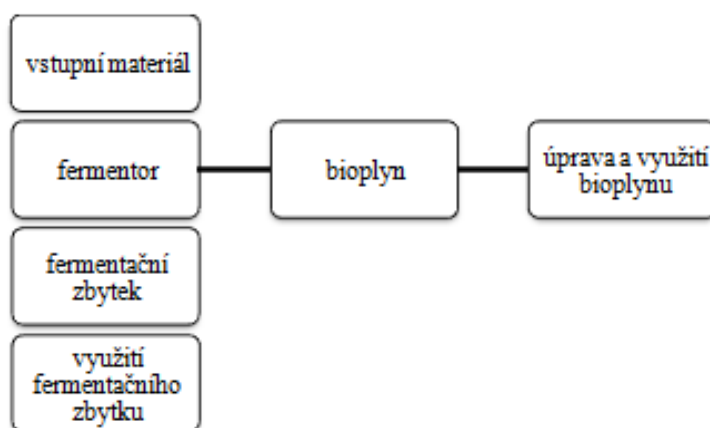
Druhotný produkt bioplynových stanic, fermentační zbytek, je opět vhodné zpracovat přímo na místě, bez zbytečných logistických operací.

Podle České bioplynové asociace je v současné době (k 1.1 2014) v ČR v provozu 500 bioplynových stanic o instalovaném výkonu 392,35 MW, z nichž je 330 zemědělských, 97 čistírenských, 11 průmyslových, 7 komunálních a 55 zařízení využívajících skládkový plyn.

### 3.2 Bioplynové stanice

Linka pro anaerobní fermentaci organických materiálů může mít mnoho variant podle toho, jaký materiál a jakým způsobem zpracovává.

Bioplynová stanice se většinou skládá z částí zajišťujících následující funkce (viz obr. č. 1) – dodávka a skladování vstupního materiálu, úprava vstupního materiálu (v případě zpracování vedlejších živočišných produktů, s výjimkou kejdy a hnoje, je součástí bioplynové stanice i přijímací hala s hygienizační jednotkou, tříděním a mletím), fermentace, úprava plynu, skladování plynu, využití plynu, využití fermentačního zbytku.



Obr. č. 1: Obecné schéma bioplynové stanice (Dokulilová)

Prvním stavebním prvkem bioplynové stanice je předávací stanice, kde jsou zvlášť přijímány suroviny pevné a tekuté. V tomto místě dochází k případnému vybalení či drcení vstupních surovin. Další stavbou v bioplynové lince může být přípravná jáma (jímka), kde dochází k homogenizaci, přehřevu či úpravě sušiny vstupního materiálu (Libra, 2005).

Základním technologickým zařízením celé linky je fermentor. Typickými fermentory jsou nádrže válcového tvaru, železobetonové či ocelové konstrukce. Pro udržení teploty fermentačního procesu je plášť fermentoru na vnější straně opatřen intenzivní tepelnou izolací chráněnou proti povětrnostním vlivům oplechováním. Ohřev substrátu je řešen pomocí tepelných výměníků. Fermentory jsou vybaveny stabilním míchacím zařízením, které zajišťuje homogenizaci materiálu a zabraňuje tvorbě usazenin. K tomuto účelu se využívají vrtulová nebo lopatková míchadla (viz obr. č. 2), kalová čerpadla nebo plynové kompresory dopravující část vyrobeného bioplynu zpět do spodní části fermentoru (Libra, 2005).



Obr. č. 2: *Míchadlo uvnitř fermentoru*

(<http://www.weltec-biopower.cz/infocentrum/obrazova-galerie>)

Plynojemy slouží k akumulaci bioplynu v místě výroby. Akumulací bioplynu je zajištěno vyrovnávání rozdílů produkce a spotřeby způsobovaných rozdílnou kvalitou bioplynu a bezpečnost při poruše spotřebičů. Současný úsporný trend kumulace více funkcí do jednoho objektu reprezentuje v oblasti anaerobní fermentace konstrukce fermentační nádrže s akumulacním prostorem pro jímání bioplynu, kdy je vrchní část fermentoru zakryta neprodyšnou technickou textilií. Při tomto konstrukčním řešení je možné bioplyn odsířit přímo v plynojemu. Jedná se o biotechnickou metodu odsíření cíleným vháněním vzduchu do plynojemů umístěného bezprostředně nad fermentorem. Působením aerobních sírných bakterií dochází za přívodu vzduchu k přeměně sirovodíku na elementární síru, kyselinu sírovou a vodu. Síra se usazuje na dřevěné konstrukci stropu, následně opadáva, je smíšena se zpracovávaným materiálem a při hnojení daným fermentačním zbytkem slouží k výživě rostlin (Schulz, Eder, 2004; Libra, 2005).

Na plynojem navazuje objekt určený pro úpravu a využití bioplynu. Prvním krokem úpravy bioplynu je odstranění vodní páry, ke kterému dochází ochlazením bioplynu v odlučovači kondenzátu, a případné odloučení mechanických nečistot vedením bioplynu přes lapač nečistot. Pro spalování bioplynu za účelem tepelného využití, lze použít každý plynový kotel s vhodně upraveným hořákem. Pro kogeneraci tepla a elektrické energie mohou sloužit různé typy spalovacích motorů spojené s generátorem elektrického proudu a s možností využívat teplo spalin. Pro malé výkony jsou běžně adaptovány automobilové zážehové motory spojené s generátorem elektrického proudu. Při stlačování bioplynu, např. pro pohon motorových vozidel je

nutno odstranit přes 95 % oxidu uhličitého a nadměrné množství sirovodíku, k čemuž se běžně používají tzv. mokré pračky plynu (Schulz, Eder, 2004; Libra, 2005).

Skladovací nádrže, nazývané také koncový sklad, slouží k jímání fermentačního zbytku z kontinuálně plněných fermentorů. U většiny bioplynových stanic je skladovací nádrž kryta pevným stropem nebo fóliovým poklopem, aby se zabránilo ztrátám amoniakálního dusíku, a aby bylo možné jímat bioplyn vznikající při dobíhajících anaerobních procesech (Schulz, Eder, 2004).

Na koncový sklad mohou navazovat další zařízení sloužící k separaci tuhé a tekuté frakce fermentačního zbytku lisováním (kalolis), sedimentací či odstředováním (odstředivka) za účelem následného využití této tuhé frakce (Mužik, Slejška, 2003).

### **3.2.1 Rozdělení bioplynových stanic podle původu vstupních surovin**

Bioplynové stanice lze rozdělit podle původu vstupních surovin a v souladu s „Metodickým pokynem ke schvalování provozu bioplynových stanic a stanovování závazných podmínek z hlediska ochrany životního prostředí“, který v roce 2014 vydalo MŽP, na zemědělské, čistírenské a ostatní.

Zemědělské bioplynové stanice zpracovávají materiály rostlinného charakteru a statkových hnojiv, resp. podestýlky. Na těchto bioplynových stanicích není možné zpracovávat odpady podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ve znění pozdějších předpisů, ani jiné materiály spadající pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o vedlejších živočišných produktech, ve znění pozdějších předpisů. Zemědělské bioplynové stanice jsou v Evropě nejčastější. Zpracovávají převážně tekuté substráty, nejčastěji při využití vícestupňových systémů s mezofilním teplotním režimem. Vstupními surovinami jsou materiály rostlinného a živočišného původu. Nejčastěji se jedná o kukuřičnou siláž a kejdu hospodářských zvířat. Fermentační zbytek z těchto bioplynových stanic se využívá jako hnojivo na obhospodařovaných zemědělských pozemcích. Získaný bioplyn se využívá jako palivo v kogeneračních jednotkách. Vyrobená elektrická a tepelná energie je dodávána do sítě, příp. slouží k pokrytí vlastních potřeb (MŽP, 2008; Tvrzník et al., 2013).

Čistírenské bioplynové stanice zpracovávají pouze kaly z ČOV, žump a septiků. Tyto technologie nejsou určeny ke zpracovávání bioodpadů ani k nakládání s odpady, ale slouží pouze jako součást kalového hospodářství ČOV. Primární zde tedy není zisk energie, ale anaerobní stabilizace čistírenského kalu. V současnosti jsou čistírenské

bioplynové stanice v ČR hojně rozšířeny, a přestože výnosy bioplynu nedosahují výnosů zemědělských bioplynových stanic, je i zde bioplyn využíván ke kogeneraci a získaná elektrická a tepelná energie slouží k pokrytí potřeb provozu ČOV (MŽP, 2008; Tvrzník et al., 2013).

Do kategorie ostatní spadají průmyslové a komunální bioplynové stanice. Vstupní materiály u průmyslových bioplynových stanic mohou být živočišného původu (z jatek či mlékáren) i rostlinného původu (např. cukrovarnické a lihovarnické řízky, výpalky, výlisky, ovoce a zelenina). Komunální bioplynové stanice zpracovávají především biologicky rozložitelnou odděleně sbíranou složku komunálního odpadu. Pokud tyto bioplynové stanice zpracovávají vedlejší živočišné produkty, spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009, ve znění pozdějších předpisů, a musí plnit podmínky v něm stanovené, jako je např. hygienizace surovin, resp. odpadů (MŽP, 2008; Tvrzník et al., 2013).

### **3.2.2 Rozdělení bioplynových stanic podle dávkování vstupního materiálu**

Podle dávkování vstupního materiálu lze rozlišit v zásadě 2 postupy, a to dávkový (diskontinuální) a průběžný (kontinuální).

U dávkového postupu je fermentor naplněn najednou. Materiál zůstává ve fermentoru bez přidávání i odnímání dalšího substrátu do konce doby efektivní produkce bioplynu. Produkce bioplynu po naplnění pomalu roste, dosahuje maxima a následně klesá. Po skončení stanovené doby je fermentor najednou vyprázdněn. Ve fermentoru se ponechá asi 5 až 10 % zfermentovaného materiálu, aby se nová dávka naočkovala bakteriemi. V praxi je tento způsob využíván u bioplynových stanic pracujících se vstupními materiály o vyšší sušině (nad 30 %). Dávkový systém se v praxi pro tekutou fermentaci příliš nevyužívá, protože jej značně prodražuje nutnost mít vedle fermentoru také přípravnou a skladovací nádrž o stejné velikosti. Dalším negativem dávkového způsobu je nerovnoměrná produkce bioplynu, kterou lze vyrovnat použitím 2 menších fermentorů, které se střídavě plní a vyprazdňují po uplynutí poloviny stanovené doby, což proces opět prodražuje. Další nevýhodou jsou ztráty na dusíku a metanu, ke kterým dochází během procesu rozkladu, který probíhá již v přípravné nádrži. Naproti tomu při laboratorních pokusech se s tímto systémem pracuje ve většině případů, neboť je požadováno, aby nedošlo ke smíchání substrátů z jednotlivých zkoušek (Schulz, Eder, 2004; Vítěz et al., 2013).

Většina bioplynových stanic pracujících se vstupními materiály o nižším obsahu sušiny, do 15 %, pracuje průběžným způsobem. Fermentor je neustále naplněn a vyprazdňuje se pouze kvůli opravám nebo odstranění usazenin. Z malé přípravné nádrže je čerstvý substrát do fermentoru dávkován v pravidelných intervalech, v nižších dávkách, v průběhu celého dne, přičemž je odebíráno odpovídající množství již zpracovaného materiálu. Při kontinuálním plnění organickou hmotou probíhají všechny fáze anaerobní přeměny vedle sebe a nejsou odděleny místně ani časově. Výhodou je rovnoměrná výroba bioplynu, dobré využití prostoru fermentoru a také cenově příznivá kompaktní konstrukce s nízkými tepelnými ztrátami. Tento proces lze také snadno automatizovat. Nevýhodou je možnost smíchání čerstvého a zfermentovaného substrátu, čímž se znehodnotí hygienizační efekt (Schulz, Eder, 2004; Vítěz et al., 2013).

### **3.2.3 Rozdělení bioplynových stanic podle obsahu sušiny ve vstupním materiálu**

Anaerobně jsou zpracovávány především dostatečně vlhké materiály. Podle obsahu sušiny ve vstupním materiálu lze rozlišit fermentaci tekutou a netekutou.

Tekutou fermentací je nazýván proces zpracovávající vstupní materiály s obsahem sušiny 15 % a méně. Tato technologie využívá disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Je pro ni typická účinná metanogeneze, tj. vyšší produkce metanu. Tekutou fermentaci v současnosti využívá 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v ČR (Tesařová et al., 2010; Vítěz et al., 2013).

O netekuté fermentaci lze hovořit při obsahu sušiny vyšším než 15 %, obvykle 30 až 45 %. Při tomto typu fermentace probíhají efektivněji acidogeneze a acetogeneze, kdy se tvoří větší množství organických kyselin. Tato technologie představuje pouze 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic na území ČR (Tesařová et al., 2010; Vítěz et al., 2013).

### **3.2.4 Rozdělení bioplynových stanic podle konstrukčního typu fermentoru**

Fermentor může být konstruován jako stojící (vertikální), nebo jako ležící (horizontální).

Horizontální fermentory jsou většinou konstruovány jako nadzemní cylindrické ocelové nádrže. Výhodou horizontální konstrukce je možnost instalace výkonného, funkčně bezpečného a energeticky úsporného mechanického míchadla. Tím lze

dosáhnout dobrého promíchání napříč směrem průtoku, aniž by docházelo k přílišnému promíchávání v podélném směru. Jelikož je délka horizontálního fermentoru oproti její výšce několikanásobná, dochází v něm k velmi žádoucímu pístovému proudění. Jedná se o jev, kdy je jedna dávka zpracovávaného materiálu posunována fermentorem jako píst, takže se čerstvý materiál z plnicí zóny nesmíchá s již zfermentovaným na druhém konci fermentoru, což podporuje hygienizaci. Nevýhodou je prostorová náročnost, nadměrná velikost povrchu v poměru k objemu fermentoru, což způsobuje velké tepelné ztráty, a nemožnost očkování čerstvého materiálu bakteriálním společenstvem z materiálu, který již prošel anaerobní fermentací (Schulz, Eder, 2004).

Vertikální fermentory bývají ze statických důvodů konstruovány z betonu a mívají kruhový průřez. Jejich výhodou je lepší poměr mezi povrchem a objemem, čímž se oproti horizontálním fermentorům sníží materiálové náklady a tepelné ztráty. Nevýhodou však je absence pístového proudění (Schulz, Eder, 2004) .

### **3.2.5 Rozdělení bioplynových stanic podle počtu fermentorů zařazených v sérii**

Z hlediska počtu fermentorů zařazených v sérii lze bioplynové stanice rozdělit na jednostupňové a vícestupňové.

U jednostupňových bioplynových stanic probíhá celý proces anaerobního rozkladu v jednom fermentoru, neboli v jednom stupni. A to u plně promíchávaných zařízení souběžně ve stejném čase i prostoru a u zařízení nepromíchávaných ve směru toku v různých prostorech jedna za druhou. Veškerý získaný plyn je pak smíšený (Schulz, Eder, 2004).

U vícestupňového postupu je snaha prostorově oddělit různé fáze anaerobní fermentace použitím většího počtu fermentorů nebo oddělením uvnitř fermentoru. V praxi se kvůli nákladům využívá pouze dvoustupňový postup. V prvním stupni nejčastěji probíhá v termofilních podmínkách fáze hydrolýzy a acidogeneze při optimálním pH 5,5 až 6,5, ve druhém stupni pak v mezofilních podmínkách acetogeneze a metanogeneze při optimální hodnotě pH 6,5 až 8,2. Bioplyn pocházející z prvního stupně obsahuje vysoký podíl oxidu uhličitého a dalších plynů, které nejsou energeticky využitelné, a proto se již v této fázi odvádějí. Plyn z druhého stupně pak obsahuje vysoký podíl metanu, který může činit i více než 80 % (Kim J. et al., 2003; Schulz, Eder, 2004; Lee et al., 2009; Mao et al., 2015) .

### **3.2.6 Rozdělení bioplynových stanic podle teplotního režimu**

Anaerobní přeměny biologicky rozložitelných materiálů probíhají v přírodě v širokém teplotním rozmezí, od 4 do 70 °C. Rychlost anaerobní fermentace je na teplotě silně závislá. Platí, že čím vyšší je teplota, tím rychleji nastává rozklad, produkce bioplynu je vyšší, doba vyhnívání kratší a podíl metanu v bioplynu nižší. Pro intenzivní a efektivní anaerobní zpracování biologicky rozložitelných materiálů ve fermentorech se využívají 2 teplotní režimy, a to teploty vhodné pro činnost mezofilních nebo termofilních mikroorganismů (Schulz, Eder, 2004; Tesařová et al., 2010).

Mezofilní proces fermentace funguje při teplotách 30 až 40 °C. Tento teplotní režim je využíván kvůli menší ekonomické náročnosti provozu a lepším kvalitativním parametrům produkovaného bioplynu, tj. vhodnějšímu poměru mezi metanem a oxidem uhličitým. Bakterie účastníci se přeměn organických materiálů mají odlišná teplotní optima. Teplotní optimum mezofilních bakterií acidogenní a acetogenní fáze se nachází kolem 30 °C, ale intenzivní činnost metanogenních Archea v mezofilní oblasti vyžaduje teploty od 35 do 40 °C. Přestože se mezofilní systémy vyznačují lepší stabilitou a bohatším mikrobiálním společenstvem, jejich nevýhodami jsou horší rozklad materiálu a možnost horšího využití živin (Tesařová et al., 2010, Bowen et al., 2014).

Termofilní proces fermentace probíhá při teplotách 50 až 60 °C. Termofilní podmínky přispívají k efektivnějšímu rozkladu organické hmoty a k redukci množství patogenů, jako jsou bakterie a viry, a také semen plevelů nebo vajíček hmyzu. Termofilní proces tedy umožní lepší hygienizaci vstupního materiálu. Termofilní bakterie také produkují více bioplynu. Tento teplotní režim je ale ekonomicky náročnější, protože udržování vysokých teplot vyžaduje vyšší spotřebu energie. Další nevýhodou je, že čím vyšší je teplota v reaktoru, tím jsou bakterie citlivější na teplotní výkyvy, hlavně pokud jsou výkyvy krátkodobé a teplota klesne. Termofilní fermentace je rovněž citlivější na změny pH než mezofilní fermentace (Cooney, Wise, 1975; Kim M. et al., 2003; Schulz, Eder, 2004; Ferrer, 2008; Tesařová et al., 2010).

### **3.3 Proces anaerobní fermentace**

Technologie pro zpracování biologických materiálů za nepřístupu vzduchu vycházejí z anaerobního rozkladu organických látek v přírodě, který je označován jako hnití

nebo kvašení (fermentace) a probíhá například v silně zamokřených půdách, rašeliništích nebo v bachoru přežvýkavců (Straka et al., 2010).

Hlavním cílem anaerobního zpracování organických materiálů je zisk energeticky bohatého bioplynu. Pokud je zpracováván biologicky rozložitelný odpad, je také cílem snížení celkového obsahu organických snadno rozložitelných látek a zmenšení objemu odpadu. Pro anaerobní zpracování jsou vhodné hlavně vlhké a nestrukturní odpady pocházející ze zemědělství, zahradnictví, ČOV, výroby potravin, stravovacích zařízení a domácností (Tesařová et al., 2010).

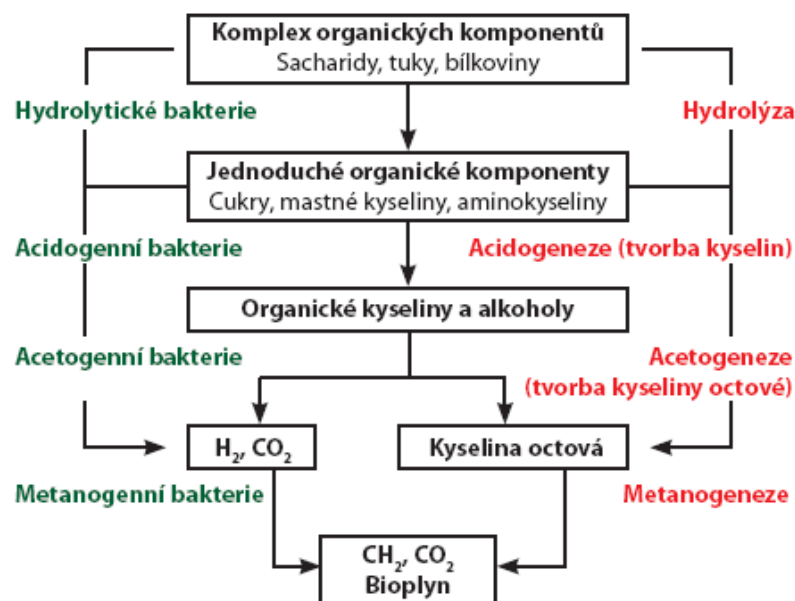
Anaerobní přeměny organických materiálů probíhají ve 4 na sebe navazujících fázích (viz obr. č. 3). Jde o soubor mikrobiálních procesů, které uskutečňují fyziologicky odlišné skupiny bakterií. Pro zajištění efektivního a stabilního provozu bioplynové stanice je nejdůležitější rovnováha mezi mikroorganismy, které produkují a spotřebovávají vodík, tedy mezi acetogenními a metanogenními mikroorganismy (Deubein, Steinhauser, 2008; Tesařová et al., 2010; Carballa et al., 2015).

V prvním kroku dochází k hydrolytickému štěpení dlouhých řetězců makromolekulárních látek, jako jsou polysacharidy, proteiny a tuky. Proces katalyzují extracelulární enzymy, které jsou uvolňovány hydrolytickými bakteriemi. Tyto bakterie jsou termofilní a fakultativně anaerobní, proto tato fáze může probíhat i za přítomnosti kyslíku. Rychlost hydrolýzy ovlivňuje celkovou rychlost následujících anaerobních přeměn. Výstupem této fáze jsou nízkomolekulární látky, jako jsou cukry, aminokyseliny, mastné kyseliny apod. (Deubein, Steinhauser, 2008; Tesařová et al., 2010; Abbasi et al., 2012).

Druhou fází je acidogeneze, označovaná podle organických kyselin, které jsou jejím hlavním produktem. Acidogenní bakterie přeměňují ve svém vnitrobuněčném metabolismu nízkomolekulární látky na mastné kyseliny, především kyselinu mléčnou, propionovou, máselnou a octovou, a také na etanol, oxid uhličitý a vodík. Poměr produktů acidogeneze závisí na složení produktů hydrolýzy, na aktivitě jednotlivých intracelulárních enzymů a na podmínkách prostředí. Hydrolytické a acidogenní bakterie nejsou příliš citlivé na změny vnějších podmínek, poměrně rychle rostou a množí se. Proces acidogeneze a následné acetogeneze je výrazně regulován koncentrací vodíku v prostředí, jeho vyšší koncentrace oba procesy brzdí (Al Seadi et al., 2008; Tesařová et al., 2010; Abbasi et al., 2012).

Třetí fází, acetogenezi, uskutečňují anaerobní bakterie, které přeměňují organické kyseliny a etanol na kyselinu octovou, oxid uhličitý a vodík (Abbasi et al., 2012).

Čtvrtou, poslední a nejpomalejší fází je metanogeneze. Striktně anaerobní metanogenní Archea v této fázi přeměňují kyselinu octovou na metan, oxid uhličitý a další plyny, např. vodík, dusík a sulfan (Al Seadi et al., 2008; Tesařová et al., 2010).



Obr. č. 3: Průběh anaerobní fermentace

(<http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/vznik-bioplynu/>)

### 3.4 Produkty anaerobní fermentace

#### 3.4.1 Bioplyn

Primárním produktem anaerobní fermentace je bioplyn. Bioplyn je vysoce kvalitní zdroj obnovitelné energie, který má mnoho možností energetického využití. Bioplyn obsahuje 40 až 70 % obj. metanu, zbytek představuje oxid uhličitý a malé množství dalších příměsí. Výhřevnost bioplynu je prakticky výlučně dána obsahem metanu a pohybuje se přibližně v rozmezí 18 až 26 MJ/m<sup>3</sup>. Obsah metanu je závislý především na složení zpracovávaného materiálu a technologických parametrech bioplynové stanice. Problémovou složkou bioplynu je sirovodík, který při spalování bioplynu reaguje s vodou za vzniku kyseliny sírové, která při kondenzaci spalin způsobuje korozi. Proto je nutné sirovodík při vyšší koncentraci z bioplynu odstraňovat. K tomuto účelu je nejčastěji využívána chemická sorpce sirovodíku na pevné látky nebo biologická metoda využívající sírných bakterií, které v aerobním prostředí oxidují

sírovodík na elementární síru a sírany v závislosti na teplotě a pH (Mužík, Slejška, 2003; Straka et al., 2010; Abbasi et al., 2012).

Nejjednodušším způsobem využití bioplynu je přímé spalování a ohřev teplotnosného média (např. topení, sušení, chlazení, vaření). V současné době je nejrozšířenějším způsobem využití bioplynu kogenerace. Kogenerační jednotky využívají bioplyn pro kombinovanou výrobu elektrické energie (asi 35 % z celkové energie) a tepla. Spalovací motor na bioplyn pohání generátor elektrické energie a zároveň je využíváno teplo z chladicího média motoru, popř. teplo ze spalin. Perspektivním způsobem využití bioplynu je trigenerace, tedy výroba elektrické energie, tepla a chladu, kdy je kogenerační jednotka doplněna absorpčním tepelným konvertorem pro výrobu chladu. Dále lze bioplyn po odsíření a energetickém zhodnocení nad úroveň 90 % metanu využít pro pohon mobilních energetických prostředků, čehož se v současnosti hojně využívá např. ve Švédsku, Německu či Švýcarsku. Bioplyn lze také využít k neenergetickým účelům, což je např. chemická výroba sekundárních produktů (Mužík, Slejška, 2003; Al Seadi et al., 2008).

### **3.4.2 Fermentační zbytek**

Vlastnosti fermentačního zbytku závisí především na druhu zpracovávaných materiálů, méně už na technologickém procesu. Nejjednodušším způsobem jeho využití je přímá aplikace na zemědělskou půdu, samozřejmě při splnění platných právních požadavků, mezi které patří např. zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, ve znění pozdějších předpisů. Ve srovnání s přímou aplikací surového materiálu (např. prasečí kejdy) má fermentační zbytek několik výhod. Jedná o materiál biologicky stabilizovaný a homogenizovaný, s vyšší využitelností živin, se sníženým obsahem patogenů a semen plevelů, s nižšími emisemi zápachu a skleníkových plynů. Pro další využití může být z fermentačního zbytku separována tuhá frakce lisováním, sedimentací či odstředováním. Tuhá frakce pak může být zkompostována, čímž dojde ke zlepšení kvality konečného produktu (vzniká kvalitní statkové hnojivo), nebo může být dalším dosušováním a lisováním s přídavným materiálem (dřevní štěrka, sláma) do briket či pelet přeměněna v biopalivo. Následný prodej kompostu či paliva ale musí pokrýt alespoň náklady nutné pro tuto úpravu fermentačního zbytku. Kapalná frakce bohatá na živiny jako je dusík a draslík se pak používá k hnojení obhospodařovaných pozemků. (Mužík, Slejška, 2003; Liedl, Shaffelf, 2006; Bustamante et al., 2013; Provenzano et al., 2013).

### 3.5 Základní sledované parametry

#### 3.5.1 Množství a složení bioplynu

Bioplyn je plynná směs metanu a oxidu uhličitého s výraznou převahou obsahu metanu (50 až 85 % obj.) produkovaná metanogenními mikroorganismy. Bioplyn může v minoritním množství obsahovat širokou škálu dalších plynů, např. zbytky vzdušných plynů (dusík, kyslík, argon), neúplně spotřebované zbytky acidogeneze (vodík) a další stopové příměsi z předcházejících nebo simultánních reakcí organické hmoty (sulfan, oxid dusný, kyanovodík, uhlovodíky a jejich kyslíkaté či sirné deriváty). Zastoupení všech složek v bioplynu závisí nejen na složení vstupního materiálu, ale také na způsobu jeho zpracování (Straka et al., 2010; Čermáková, Tenkrát, 2011).

Kvalita bioplynu je určována především poměrem hořlavého metanu k oxidu uhličitému, který bioplyn zředňuje. Z toho plyne, že čím je vyšší obsah metanu v bioplynu, tím vyšší je jeho energetická hodnota, která se pohybuje přibližně v rozmezí 18 až 26 MJ/m<sup>3</sup> (Mužík, Slejška, 2003; Schulz, Eder, 2004).

Obsah metanu v bioplynu závisí především na průběhu procesu, skladbě živin ve vstupním materiálu a teplotě ve fermentoru. Průběhem procesu je myšlen počet fermentorů zařazených v sérii. Zatímco u jednostupňových bioplynových stanic probíhá celý anaerobní rozklad v jednom fermentoru a veškerý získaný bioplyn je proto smíšený, u dvoustupňových zařízení probíhá výroba plynu ve dvou stupních. Bioplyn pocházející z prvního stupně obsahuje vysoký podíl oxidu uhličitého a jiných plynů, které nejsou energeticky využitelné. Bioplyn z druhého stupně pak obsahuje vysoký podíl metanu, který může činit i více než 80 %. Složení vstupního materiálu ovlivní množství i kvalitu vyrobeného bioplynu. Z vstupních materiálů bohatých na bílkoviny a uhlovodíky se vyrobí mnohem méně bioplynu než z látek obsahujících tuky. Proteiny a tuky způsobují vyšší podíl metanu. Naopak u vstupních materiálů bohatých na sloučeniny uhlíku, např. hovězí kejdy či kukuřice, je kvalita plynu horší. Také lze říci, že při termofilní fermentaci je obsah metanu v bioplynu nižší než při mezofilním procesu (Shulz, Eder, 2004).

Obsah vodíku v bioplynu vždy upozorňuje na narušení rovnováhy mezi acidogenními a metanogenními procesy, které je obvykle provázeno poklesem pH. Tato nerovnováha může mít četné příčiny dané např. přetížením reaktoru, nevhodnou skladbou zpracovávaného materiálu anebo inhibicí činnosti hydrogenotrofních bakterií,

protože za příznivých podmínek hydrogenotrofní bakterie velmi rychle mění vodík a oxid uhličitý z předchozí fáze na metan (Straka et al., 2010).

Výtěžky bioplynu z anaerobní fermentace závisí na chemickém složení vstupního materiálu (viz tab. č. 1) a podmínkách pro činnost bakterií. Z 1 kg sušiny biologicky rozložitelných odpadů lze získat asi 0,50 m<sup>3</sup> bioplynu. U rostlinných materiálů je výnos tím vyšší, čím méně obsahují ligninu a čím vyšší je obsah tuků, celulózy a proteinů (Tesařová et al., 2010).

Tab. č. 1: *Teoretická produkce bioplynu*

| Látka     | Produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ]<br>na kg org. sušiny | Poměr CH <sub>4</sub> :CO <sub>2</sub><br>v bioplynu |
|-----------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Tuky      | 1,10 – 1,60                                              | 80:20                                                |
| Sacharidy | 0,75 – 0,90                                              | 54:46                                                |
| Proteiny  | 0,60 – 0,80                                              | 60:40                                                |

(upraveno podle Hobson et al., 1981)

### 3.5.2 Konduktivita

Konduktivita neboli měrná vodivost je veličina charakterizující schopnost látky vést elektrický proud. Umožňuje vzájemné porovnávání elektrické vodivosti různých látek za stejných podmínek, protože závisí na jejich fyzikálním stavu, hlavně na teplotě. Číselně vyjadřuje konduktivita elektrickou vodivost tělesa ve tvaru krychle o hraně délky 1 m. Jednotkou je tedy siemens na metr. Konduktivita roztoků elektrolytů závisí na jejich koncentraci, protože čím je vyšší koncentrace elektrolytů, tím více iontů schopných přenášet elektrický náboj obsahují (Pflegerová et al., 2003).

Konduktivita zpracovávaného materiálu je funkcí mnoha parametrů, jako jsou salinita, viskozita, pH, oxidačně redukční potenciál a elektrický náboj všech iontů. Jedná se o schopnost materiálu vést elektrický proud, která je závislá na všech iontech obsažených ve zpracovávaném materiálu. Vzhledem k rozmanitosti těchto iontů a případných z ní vyplývajících iontových interakcí, může být relativní rychlost změn konduktivity spojována se specifickou mírou změn v metabolických aktivitách (produkce bioplynu). Podle Kana et al. (2013) však bude spolehlivá aplikace konduktometrického sledování anaerobní fermentace v reálném čase vyžadovat další hluboké poznání všech zdrojů změn konduktivity v těchto bioprocesech (dále také Owens, 1983; Colombié et al., 2007).

### 3.5.3 Oxidačně redukční potenciál (Eh)

Oxidačně redukční potenciál vyjadřuje množství dostupného kyslíku v prostředí. V podstatě se jedná o poměr mezi oxidačními a redukčními procesy. Má široké rozpětí hodnot. Kladné hodnoty Eh ukazují na oxidační prostředí. Záporné hodnoty Eh představují prostředí redukční. Pro aerobní (oxické) prostředí dobře zásobené kyslíkem jsou charakteristické hodnoty Eh vyšší než +100 mV. Hodnoty Eh mezi -50 mV a +50 mV ohraničují anoxickou oblast, tedy prostředí bez přítomnosti vzdušného kyslíku, ale s kyslíkem obsaženým v anorganických sloučeninách (např. nitrity, nitráty, uhličitany, sírany). V anoxickém prostředí mikroorganismy využívají kyslík z anorganických sloučenin k anaerobní respiraci v procesech denitrifikace, desulfurikace apod. V prostředí s hodnotami Eh nižšími než -100 mV se nevyskytuje žádný zdroj kyslíku, jedná se tedy o prostředí anaerobní. V tomto prostředí mikroorganismy fermentují organické substráty na organické kyseliny a plyny (Tesařová et al., 2010).

### 3.5.4 Vodíkový exponent (pH)

Vodíkový exponent představuje kvantitativní míru kyselosti nebo zásaditosti, vodných roztoků. Jedná se o záporný dekadický logaritmus aktivity oxoniových kationtů v roztoku. Podle hodnoty pH se pak roztoky dělí na kyselé ( $\text{pH} < 7$ ), neutrální ( $\text{pH} \approx 7$ ) a zásadité ( $\text{pH} > 7$ ).

Hodnota pH má významný vliv na růst a aktivitu všech mikroorganismů. Ovlivňuje tedy i celý průběh anaerobního zpracování organických materiálů. Hodnota pH zpracovávaného materiálu je po produkci bioplynu nejlepším indikátorem stability procesu. Jednotlivé fáze anaerobní fermentace vyžadují různé optimální hodnoty pH. Hydrolytické a metanogenní bakterie jsou nejaktivnější při neutrálním pH. Na hodnotu pH jsou zvláště citlivé metanogenní Archea, prostředí s nižší hodnotou pH na ně působí inhibičně, čímž dojde k negativnímu ovlivnění produkce bioplynu. Pro acidogenní a acetogenní bakterie se naopak optimální pH pohybuje mezi hodnotami 5 a 6 (Tesařová et al., 2010; Vítěz et al., 2013).

Hodnota pH je stěžejní faktor, který ovlivňuje účinnost produkce metanu. Typickým rysem probíhající metanogeneze je nárůst pH. V kulturách, kde jsou aktivní pouze acidogenní bakterie, může být pH relativně nízké, v rozmezí 4 až 5,8. Následný rozvoj metanogenů vyvolá vzestup pH na hodnotu 6 až 7 i výše, přičemž některé druhy

metanogenů mohou být aktivní i v biologicky silně alkalických prostředích s pH 8 až 9. Studie Deublein, Steinhauser (2008) ukázaly, že při anaerobní fermentaci je pro tvorbu metanu optimální hodnota pH 6,5 až 7,5. Tento rozsah je však poměrně široký a optimální hodnota pH je odlišná pro jednotlivé vstupní materiály a technologie anaerobní fermentace. Počáteční hodnota pH není ve většině studií kontrolována, i když odpovídající počáteční hodnota pH je důležitá pro hydrolytickou fázi anaerobní fermentace, a to především u vstupních surovin jako je kuchyňský odpad, u kterých může na počátku fermentace snadno dojít k výraznému okyselení (Cho et al., 1995; Kim M. et al., 2003; Deublein, Steinhauser, 2008; Liu et al., 2008, Jiang et al., 2010; Straka et al., 2010).

### **3.5.5 Sušina**

Sušina je pevná část vzorku, která zbude po odstranění vody vysušením do konstantní hmotnosti při 105 °C. Sušina se udává v % nebo v  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Součet obsahu sušiny a vody ve vzorku musí tvořit 100 % nebo  $1000 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Obsah sušiny vstupních materiálů je významným parametrem anaerobní fermentace, protože obsah vody může mít vliv na degradaci zpracovávaných materiálů a mikrobiální aktivitu (García-Bernet et al., 2011).

Je vhodné použít vstupní materiály, které neobsahují příliš mnoho vody, resp. příliš málo sušiny, protože v případě, že je zpracovávaný materiál příliš zředěný a obsahuje příliš málo organických látek, je riziko, že budou mikroorganismy z kontinuálního procesu vyplaveny. Tento problém může nastat, pokud je doba potřebná k růstu mikroorganismů kratší než doba zdržení materiálu ve fermentoru. Velmi zředěný materiál pak může být zpracováván např. za použití nosného materiálů nebo vrácením biomasy zpět do procesu. Vhodný obsah vody samozřejmě závisí na typu použitého procesu, tedy zda je využívána tekutá nebo netekutá fermentace. Obsah sušiny se u tekuté fermentace pohybuje v rozmezí 2,7 až 9,3 % (Fannin, Biljetina, 1987; Barber, Stuckey, 1999; Mahmoud et al., 2003; Liao et al., 2006; Vítěz et al., 2013).

### **3.5.6 Celkový obsah organického uhlíku (TOC)**

Parametr TOC představuje množství uhlíku vázané v organické sloučenině. Ve vzorku se stanovuje buď přímo, pokud se nepředpokládá přítomnost anorganického uhlíku, nebo z rozdílu celkového a anorganického uhlíku, který se stanoví po okyselení.

Uhlík tvoří 50 % mikrobiální biomasy a je tak nejdůležitějším stavebním prvkem mikrobiálních buněk. Během biologických procesů je uhlík dodáván ve zpracovávaném materiálu a slouží k syntéze biomasy mikrobiálních buněk (Schnürer, Jarvis, 2010; Mao et al., 2015).

Mikroorganismy během anaerobní fermentace využijí cukry, bílkoviny, aminokyseliny a mastné kyseliny jako zdroj uhlíku, což vede ke snížení obsahu TOC ve zpracovávaném materiálu (Tambone et al., 2013).

Důležité je složení substrátu, tj. jaké sloučeniny ve skutečnosti představují TOC. Sloučeniny s dlouhým uhlíkovým řetězcem, jako např. celulóza, jsou rozkládány pomalu, a riziko okyselení procesu je podstatně nižší, než když je většina uhlíku obsažena v glukóze. Uhlík může být také obsažen v ligninu, který se v podstatě během celého procesu nerozkládá (Gunaseelan, 2007).

### **3.5.7 Celkový obsah dusíku v sušině (TKN)**

Parametr TKN představuje sumu anorganicky a organicky vázaného dusíku obsaženého ve vzorku vysušeném při 105 °C.

Dusík je nezbytný pro stavbu buněčné struktury a je proto velmi důležitou živinou. Když jsou materiály obsahující dusík rozkládány, dusík přechází na amoniak. Amoniak se ve vodě disociuje za tvorby amonného kationtu. Vysoká koncentrace amoniaku ve zpracovávaném materiálu má inhibiční efekt na metanogeny. Stále však neexistuje jednotný názor na to, jakým mechanismem dochází k této inhibici, ale je zřejmé, že bakterie jsou schopné se adaptovat na vyšší koncentrace amoniaku. Proto je obtížné jasně stanovit hraniční hodnoty, kdy se již jedná o zvýšený obsah amoniaku. (Liebetrau et al., 2012).

Rostlinné zbytky a siláže nejsou příliš bohaté na dusík, proto fermentační zbytky pocházející ze zemědělských bioplynových stanic obsahují jen 1 až 4 % celkového dusíku v sušině (Kolář et al., 2010).

### **3.5.8 Poměr C:N**

Poměr C:N odráží obsah živin ve zpracovávaném materiálu, a proto je anaerobní fermentace citlivá na poměr C:N. Metanogenní mikroorganismy mohou rozkládat tuky, bílkoviny, uhlovodíky (cukry) a celulózu pouze současně s dusíkatými sloučeninami,

minerálními látkami a spotovými prvky, které potřebují pro svou buněčnou stavbu (Punal et al., 2000; Schulz, Eder, 2004; Yen, Brune, 2007; Zhang et al., 2013).

Optimální poměr C:N pro anaerobní fermentaci je mezi 20 a 35:1. Nejběžněji využívané jsou poměry nižší než 25:1. Využití vstupních materiálů s příliš nízkým poměrem C:N vede ke zvýšené produkci amoniaku, který je toxický pro metanogeny a tak může inhibovat anaerobní procesy, což způsobuje nedostatečné využívání zdrojů uhlíku. Naopak vyšší poměr C:N vede k rychlé imobilizaci dusíku, to omezuje především činnost metanogenních Archea a vede k nízké produkci bioplynu (Punal et al., 2000; Yen, Brune, 2007; Tesařová et al., 2010; Zhang et al., 2013).

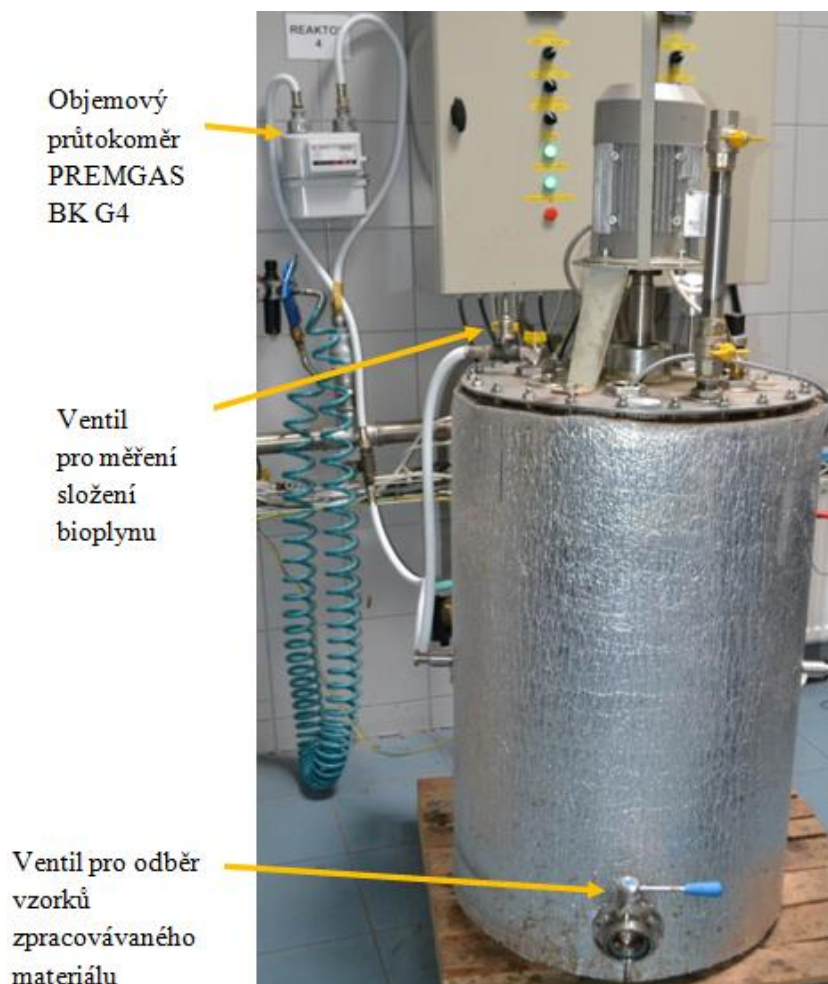
Nedostatečné množství uhlíku nebo dusíku může omezit výkon anaerobní fermentace v jednostupňovém procesu zpracování exkrementů hospodářských zvířat nebo slámy. Bylo zjištěno, že sacharidy mohou zmírnit problémy spojené s nedostatečnými zdroji substrátu, protože přidavek sacharidů znatelně zvyšuje odbourávání bílkovin. Poměr C:N lze při fermentaci prasečí kejdy upravit přidáním močoviny nebo glukózy, což dovoluje dosáhnout maximální produkce metanu. Přestože je aplikace těchto látek poměrně jednoduchá, otázkou zůstává, zda je zvýšení produkce metanu touto metodou ekonomicky udržitelné. Optimální poměr C:N lze zajistit také kofermentací různých vstupních materiálů, např. kejdy s rostlinnými materiály. Kofermentace zemědělských odpadů rostlinného původu s exkrementy hospodářských zvířat poskytuje pozitivní synergický efekt a může potenciálně zmírnit vliv toxických sloučenin (Sievers, Brune, 1978; Hills, 1979; Yen et al., 2007; Wu et al., 2010; Vítěz et al., 2013; Wang et al., 2014).

Metanizací ve fermentoru dochází ve zpracovávaných materiálech k významným změnám. Organická sušina se redukuje o 45 až 65 %, poměr C:N se mění z původních asi 18 až 12:1 na 8:1, asi 90 % amoniakálního dusíku přechází do kapalně fáze (Kolář et al., 2010).

## 4 MATERIÁL A METODIKA

### 4.1 Průběh testu

Testy anaerobního zpracování biologicky rozložitelných materiálů prováděné v rámci této diplomové práce byly uskutečněny v Celorepublikové referenční laboratoři bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně podle metodiky, kterou uvádí Geršl et al. (2014). Referenční laboratoř provádí nezávislá měření týkající se problematiky zpracování biologicky rozložitelných materiálů anaerobním způsobem. K tomuto účelu je laboratoř vybavena unikátními fermentory o objemu 0,12 m<sup>3</sup> (viz obr. č. 4), které umožňují pomocí automatických řídicích prvků simulovat provozní podmínky bioplynových stanic.



Obr. č. 4: Laboratorní fermentor (Foto: Dokulilová)

Každý z fermentorů je vybaven teplovodním okruhem pro ohřev zpracovávaného materiálu přes mezistěnu; objemovým průtokoměrem pro měření množství vznikajícího bioplynu; sondou pro aplikaci přídatných látek; sondou na měření pH; měřidlem teplot zpracovávaného materiálu; prostupy pro odběr vzorků zpracovávaného materiálu a vznikajícího bioplynu. Homogenitu zkoušených materiálů v průběhu testu zajišťují automatická míchací zařízení. Všechna jmenovaná zařízení jsou na fermentorech instalována tak, aby bylo zabráněno vniknutí vzduchu. Pro testování bylo k dispozici 6 těchto fermentorů.

Do každého laboratorního fermentoru bylo první den testu nadávkováno 100 kg (asi 0,1 m<sup>3</sup>) inokulačního materiálu, který sloužil k dodání potřebných mikroorganismů. Velmi důležitý je výběr vhodného inokulačního materiálu. Mělo by se jednat o materiál bez přísadk bioenzymatických přípravků, tedy pouze s přirozenými kulturami mikroorganismů a jimi produkováných enzymů. Dalším důležitým faktorem je obsah sušiny, protože čím vyšší je obsah sušiny v inokulu, tím je náročnější zabezpečit homogenitu materiálu při dávkování do fermentoru, a může tak být významně ovlivněna výsledná produkce bioplynu a jeho složení. Z těchto důvodů je dlouholetou praxí osvědčen inokulační materiál z druhého stupně fermentace zemědělské bioplynové stanice v Čejči, která zpracovává kukuřičnou siláž a vepřovou kejdu.

Při každém testu byl vždy použit čerstvý inokulační materiál, jehož složení se při jednotlivých testech výrazně nelišilo.

Po naplnění inokulačním materiálem byly fermentory uzavřeny a byl zapsán aktuální stav objemových průtokoměrů. Po dobu 24 hodin byly ve fermentorech udržovány podmínky stanovené pro daný test, tedy teplota a intenzita míchání. Po té bylo provedeno měření složení bioplynu a zaznamenáno jeho vyprodukované množství. Pokud by došlo u některého z fermentorů k významné odchylce naměřených údajů, mohl by bioplyn z reaktoru unikat. V takovém případě by se provedla kontrola těsnosti fermentoru, popř. jeho servis a tento fermentor by byl vyřazen z aktuálního testu.

Po kontrole fermentorů došlo k zahájení vlastního testování. Při každém testu byl jeden fermentor vybrán jako kontrolní, tedy obsahující pouze inokulační materiál. Znalost produkce a složení bioplynu z čistého inokulačního materiálu byla nezbytná pro následnou korekci výsledků získaných z ostatních fermentorů obsahujících přísadk testovaných materiálů. Do ostatních fermentorů byl přidán testovaný materiál v množství stanoveném podle optimálního látkového zatížení fermentoru, které vychází ze změřených hodnot sušiny inokula a testovaného materiálu. Kvůli zvýšení vypovídací

hodnoty testu bylo zvoleno co nejvyšší látkové zatížení, které bylo postupným testováním určeno pro běžné zemědělské plodiny v rozmezí 0,35 až 0,45 kg·kg<sup>-1</sup>, což odpovídá asi 1,5 kg sušiny testovaného materiálu (viz tab. č. 2).

Tab. č. 2: *Testované materiály*

|           | Testovaný materiál    | Dávka sušiny [kg] |          | Látkové zatížení [kg·kg <sup>-1</sup> ] |
|-----------|-----------------------|-------------------|----------|-----------------------------------------|
|           |                       | Test. materiál    | Inokulum |                                         |
| TEST č. 1 | Cukr                  | 1,512             | 3,627    | 0,417                                   |
|           | Slunečnicový olej     | 1,525             | 3,627    | 0,420                                   |
|           | Řepkový olej 1        | 1,183             | 3,627    | 0,336                                   |
|           | Kontrola              | -                 | 3,627    | -                                       |
|           | Řepkový olej 2        | 1,520             | 3,627    | 0,419                                   |
|           | Motorový olej         | 1,521             | 3,627    | 0,419                                   |
| TEST č. 2 | Gastroodpad (Thajsko) | 1,560             | 3,768    | 0,414                                   |
|           | Gastroodpad (ČR)      | 1,572             | 3,768    | 0,417                                   |
|           | Gastroodpad (Thajsko) | 1,555             | 3,768    | 0,413                                   |
|           | Kontrola              | -                 | 3,768    | -                                       |
|           | FOG + gastroodpad     | 1,325             | 3,768    | 0,352                                   |
|           | FOG                   | 1,152             | 3,768    | 0,306                                   |

(Pozn.: FOG – z anglického fats, oils and grease, tzn. tuky, oleje a další mastnoty)

Po přidání testovaného materiálu byl obsah fermentoru důkladně promíchán a fermentor byl uzavřen. Procesní podmínky byly při všech testech nastaveny stejně, a to na teplotu 41,9 ± 0,5 °C s mícháním po dobu 60 sekund v intervalu 15 minut.

Doba zdržení materiálu ve fermentoru byla 26 dní. Během tohoto období bylo jedenkrát denně odečítáno množství produkovaného bioplynu a měřeno jeho složení. V průběžně odebíraných vzorcích zpracovávaného materiálu byla stanovována konduktivita, Eh, pH, obsah sušiny, TOC. Dále byl na počátku (po přidání testovaného materiálu) a konci testu stanoven také TKN.

## 4.2 Vzorkování

Vzorky zpracovávaného materiálu byly odebírány v průběhu jednotlivých testů probíhajících po dobu 26 dnů, vždy z 6 fermentorů. Vzorky byly odebírány ventilem umístěným ve stěně u dna fermentoru. Při každém odběru byl z fermentoru do plastové kádinky odebrán čerstvý vzorek o objemu asi 150 ml. Odběry probíhaly první den z inokulačního materiálu, druhý den z inokulačního materiálu s přidavkem testovaného materiálu a následně jednou za 3 dny, vždy ve stejnou dobu (viz tab. č. 3).

Tab. č. 3: *Přehled dnů, ve kterých byly odebrány vzorky (modře)*

|         |         |         |         |         |         |         |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1. den  | 2. den  | 3. den  | 4. den  | 5. den  | 6. den  | 7. den  |
| 8. den  | 9. den  | 10. den | 11. den | 12. den | 13. den | 14. den |
| 15. den | 16. den | 17. den | 18. den | 19. den | 20. den | 21. den |
| 22. den | 23. den | 24. den | 25. den | 26. den |         |         |

(Pozn.: Červeně přidání testovaného materiálu)

## 4.3 Metodika stanovení sledovaných parametrů

### 4.3.1 Stanovení množství a složení bioplynu

Denní objem vyrobeného bioplynu je nejdůležitějším měřítkem funkce a výkonu bioplynové stanice. Měřil se suchými objemovými průtokoměry PREMGAS BK G4 (viz obr. č. 4) s přesností  $0,001 \text{ m}^3$ , které se odečítaly denně ve stejnou dobu. Hodnoty se zapisovaly do provozního deníku, do kterého se zaznamenávalo také složení bioplynu.

Objemové zastoupení vybraných plynů (metan, oxid uhličitý, vodík) v bioplynu se zjišťovalo denně ve stejnou dobu pomocí přístroje COMBIMASS GA-m (viz obr. č. 5). Tento přístroj měří obsah metanu a oxidu uhličitého pomocí optického infračerveného analyzátoru v rozsahu 0 až 100 % s přesností 0,1 % a vodíku senzorem na elektrochemickém principu stanovení v rozsahu 0 až 2000 ppm s přesností 1 ppm. Měření probíhalo po připojení přístroje k prostupu určenému k měření kvality vznikajícího bioplynu v horní části fermentoru analyzační hadičkou po dobu 1 minuty. Odečtené hodnoty byly zaznamenány do provozního deníku.



Obr. č. 5: *Měření složení bioplynu pomocí přístroje COMBIMASS GA-m*

(Foto: Dokulilová)

#### 4.3.2 Stanovení konduktivity

Měrná elektrická vodivost byla měřena u čerstvě odebraných vzorků při teplotě  $30 \pm 1$  °C laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720 (viz obr. č. 6) s využitím čtyřelektrodové vodivostní grafitové cely TetraCon 325 s vestavěným čidlem teploty v rozsahu 0 až  $500 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$  s přesností  $0,01 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Do provozního deníku byla zaznamenána konduktivita po ustálení měřené hodnoty.



Obr. č. 6: Měření konduktivity laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720  
(Foto: Dokulilová)

#### 4.3.3 Stanovení oxidačně redukčního potenciálu (Eh)

Oxidačně redukční potenciál byl měřen u čerstvě odebraných vzorků při teplotě  $30 \pm 1$  °C laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720 (viz obr. č. 7) s využitím plastové pH-kombinované elektrody SenTix 41 s diafragmou z keramické frity, gelovým elektrolytem a vestavěným čidlem teploty, která je uchovávána v 3 M roztoku chloridu draselného, v rozsahu  $-199,9$  až  $+199,9$  mV s přesností 0,1 mV. Do provozního deníku bylo zaznamenáno Eh po ustálení měřené hodnoty.



Obr. č. 7: Měření Eh laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720  
(Foto: Dokulilová)

#### 4.3.4 Stanovení vodíkového exponentu (pH)

Vodíkový exponent byl měřen u čerstvě odebraných vzorků při teplotě  $30 \pm 1^\circ\text{C}$  laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720 (viz obr. č. 8) s využitím plastové pH-kombinované elektrody SenTix 41 s diafragmou z keramické frity, gelovým elektrolytem a vestavěným čidlem teploty, která je uchovávána v 3 M roztoku chloridu draselného, v rozsahu 0 až 14 s přesností 0,01. Do provozního deníku bylo zaznamenáno pH po ustálení měřené hodnoty.



Obr. č. 8: Měření pH laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720  
(Foto: Dokulilová)

#### 4.3.5 Stanovení sušiny

Stanovení sušiny bylo provedeno podle normy ČSN EN 15934 sušením při  $105^\circ\text{C}$ .

Vzorek byl navážen na laboratorních vahách OHAUS Pioneer PA214 vážících v rozsahu 0,01 až 210 g s přesností 0,0001 g do odpařovacího kelímku, který byl nejprve vysušen v laboratorní elektrické sušárně KBS G 100 při  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , zchladnul v exsikátoru na laboratorní teplotu a byl zvážen na týchž laboratorních vahách.

Odpařovací kelímek se vzorkem se sušil v téže laboratorní elektrické sušárně při teplotě  $105^\circ\text{C}$  po dobu 24 hodin. Po ochlazení v exsikátoru byl kelímek s obsahem (viz obr. č. 9) opět zvážen na výše zmíněných laboratorních vahách.



Obr. č. 9: Vzorky v odpařovacích kelímcích po sušení (Foto: Dokulilová)

Následně byl vypočítán obsah sušiny ve vzorku podle následujícího vztahu:

$$w_{dr} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot f$$

kde je

$w_{dr}$  sušina [%] nebo  $[g \cdot kg^{-1}]$

$m_1$  hmotnost prázdného odpařovacího kelímku [g]

$m_2$  hmotnost odpařovacího kelímku se vzorkem před sušením [g]

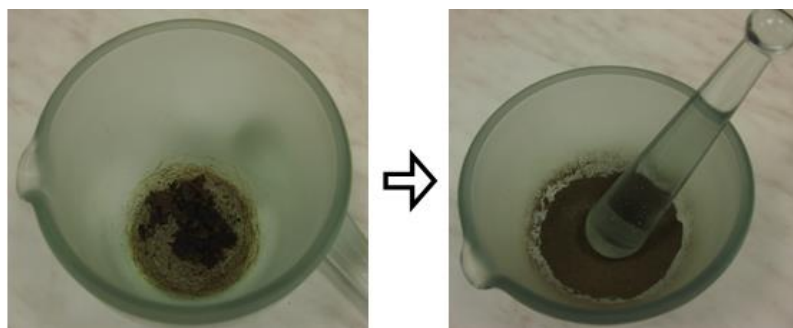
$m_3$  hmotnost odpařovacího kelímku s vysušeným vzorkem [g]

$f$  přepočítávací faktor,  $f = 100$  pro vyjádření sušiny v % nebo  $f = 1000$  pro vyjádření sušiny v  $g \cdot kg^{-1}$

V této práci bude dále sušina vyjádřena jako hmotnostní zlomek v %.

#### 4.3.6 Úprava a uchování vzorků

Suché vzorky byly za pomoci skleněného tloučku podrceny ve skleněné třecí misce (viz obr. č. 10) a uchovány v rychlozavíracích polyetylenových sáčcích opatřených čísly jednotlivých vzorků.



Obr. č. 10: *Drcení suchých vzorků* (Foto: Dokulilová)

#### 4.3.7 Stanovení celkového obsahu organického uhlíku (TOC)

Celkový organický uhlík byl stanoven jako celkový uhlík podle normy ČSN EN 15936. Protože se nepředpokládala přítomnost anorganického uhlíku, nebylo třeba stanovovat jeho množství ve vzorku po okyselení.

Na laboratorních vahách OHAUS Adventurer Pro AV264 vážících v rozsahu 0,01 až 260 g s přesností 0,0001 g bylo do laboratorní lodičky naváženo asi 0,06 g suchého vzorku. Přesná hmotnost byla zaznamenána do laboratorního deníku a prostřednictvím počítače do softwaru multiWin analyzátoru multi N/C 2100S měřícího v rozsahu 0 až

100 % s přesností 0,01 %. Vzorek byl spálen v peci HT 1300 (viz obr. č. 11) při teplotě 1250 °C v proudu plynného kyslíku. Celkový uhlík obsažený ve vzorku se přeměnil na oxid uhličitý a ten byl stanoven infračervenou spektrometrií NDIR detektorem (NonDispersive InfraRed absorption detector). Analyzátor na základě zadané navážky vypočítal obsah celkového uhlíku obsaženého ve vzorku v %.

Před zahájením vlastního měření proběhla kalibrace analyzátoru stanovením celkového uhlíku v uhličitanu vápenatém (uchovávaném v exsikátoru) výše popsaným způsobem.



Obr. č. 11: Analyzátor multi N/C 2100S s pecí HT 1300 (Foto: Dokulilová)

#### 4.3.8 Stanovení celkového dusíku v sušině (TKN)

Podle normy ČSN EN 25663 představuje celkový dusík podle Kjeldahla koncentraci organického a amoniakálního dusíku ve vzorku stanovenou po mineralizaci. Stanovení nezahrnuje dusičnanový a dusitanový dusík, jejichž přítomnost ve vzorcích se nepředpokládala. Stanovení v suchém vzorku také nepostihne amoniakální dusík, protože ten během sušení ze vzorku vytékal.

Stanovení celkového dusíku v sušině proběhlo mineralizací vzorku mokrou cestou a následným kolorimetrickým stanovením dusíku.

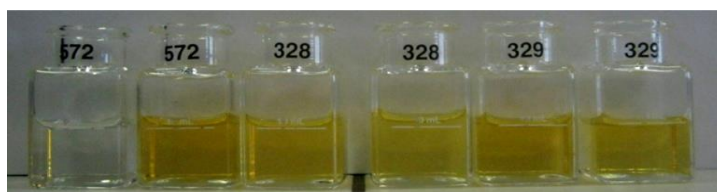
Na laboratorních vahách OHAUS Adventurer Pro AV264 vážících v rozsahu 0,01 až 260 g s přesností 0,0001 g bylo do 100ml mineralizační baňky naváženo asi 0,2 g suchého vzorku. Přesná hmotnost byla zaznamenána do laboratorního deníku. Poté byl vzorek zvlhčen 4 ml koncentrované kyseliny sírové. Mineralizační baňka byla umístěna do mineralizátoru Hach Digesdahl 23130-18 (viz obr. č. 12), byl k ní připojen chladič a teplota ohřevu nastavena na  $440 \pm 5$  °C. Po 4 minutách varu bylo pro vyčištění přidáno přes nálevku na frakční koloně 25 ml 30% peroxidu vodíku. Nadbytek peroxidu se

odstranil varem po dobu 1 minuty po ukončení jeho přidavku. Baňka s mineralizátem se nechala samovolně vychladnout.



Obr. č. 12: Mineralizátor Hach Digesdahl 23130-18 (Foto: Dokulilová)

Zchladlý mineralizát byl rozředěn deionizovanou vodou na objem asi 70 ml. Během přidávání vody se baňka zahřívala. Po zchladnutí byla doplněna deionizovanou vodou po značku na 100 ml. Do 25ml odměrného válce se zábrusem byl napipetován 1 ml zředěného mineralizátu. K němu byla přidána 1 kapka TKN indikátoru, za stálého míchání asi 3 kapky hydroxidu draselného do modrého zbarvení, deionizovaná voda do objemu 20 ml, 3 kapky mineralizačního stabilizátoru a 3 kapky polyvinylalkoholu. Následovalo doplnění deionizovanou vodou do 25 ml a přidavek 1 ml Nesslerova činidla. Obsah odměrného válce byl protřepán a po 2 minutách proměřen v 10ml pravoúhlé kyvetě (viz obr. č. 13) na spektrofotometru Hach Lange DR 2800 (viz obr. č. 14) měřícího s přesností  $1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  TKN při absorbanci 460 nm proti kontrole.



Obr. č. 13: Kyvety se vzorky pro spektrofotometrické stanovení TKN (Foto: Dokulilová)



Obr. č. 14: Spektrofotometr Hach Lange DR 2800 (Foto: Dokulilová)

Výsledek byl odečten v  $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$  TKN a byl přepočítán na % podle následujícího vztahu:

$$TKN = \frac{A \cdot 75}{B} \cdot 10^{-4}$$

kde je

A      naměřená hodnota na spektrofotometru [ $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ]

B      hmotnost vzorku [g]

## 5 VÝSLEDKY A DISKUZE

Všechny analýzy byly provedeny ve trojím opakování a ke zhodnocení výsledků byl použit aritmetický průměr získaných hodnot.

Výsledky byly shrnuty do tabulek (viz příloha č. 1), na jejichž základě byly pro větší názornost vypracovány grafy obsažené v následujících kapitolách.

### 5.1 Průběh testu

Při testu č. 1 došlo k předávkování a selhání procesu anaerobní fermentace u fermentorů, ve kterých byly testovány různé druhy olejů (slunečnicový, řepkový 1 se zatížením  $0,336 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , řepkový 2 se zatížením  $0,419 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$  a motorový). U kontrolního fermentoru došlo desátý den k přehřátí na  $63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , a to kvůli závadě na teplotním čidlu, teplota se další 2 dny pohybovala v rozmezí  $70$  až  $71 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , třináctý den se teplotu podařilo snížit zpět na nastavenou hodnotu  $41,9 \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vliv tohoto přehřátí lze jasně pozorovat na grafech všech sledovaných parametrů. Hodnoty sledovaných parametrů během testu č. 1 byly u jednotlivých fermentorů značně odlišné a to nejen díky již zmíněnému předávkování a následnému selhání procesu anaerobní fermentace, příp. přehřátí kontrolního fermentoru, ale také díky odlišnosti testovaných materiálů.

Test č. 2 již měl standardní průběh. Hodnoty sledovaných parametrů se díky tomu pohybovaly v užším rozsahu. To je také způsobeno v podstatě shodným testovaným materiálem, kterým byl ve 3 fermentorech gastroodpad, v jednom z fermentorů měl původ v ČR a v ostatních 2 v Thajsku. V dalším fermentoru byl testován gastroodpad společně s FOG a v posledním fermentoru pouze FOG. Sledované parametry u těchto 2 fermentorů se od ostatních lišily v hodnotách, ale vykazovaly shodný trend, vyjma parametru absolutní produkce bioplynu.

### 5.2 Množství a složení bioplynu

Množství vznikajícího bioplynu bylo vzhledem k problémům během testu č. 1. zjišťováno jako absolutní denní produkce bioplynu, z níž byla součtem všech denních hodnot stanovena celková produkce bioplynu (viz tab. č. 4). Produkce bioplynu nebyla přepočítána na měrnou produkci vztaženou k hmotnosti testovaného materiálu, protože celková produkce bioplynu byla u slunečnicového a motorového oleje nižší než celková

produkce bioplynu u kontrolního reaktoru a vzhledem k přehřátí kontrolního fermentoru nebyla ani tato hodnota vhodná ke korelaci výsledků na měrnou produkci bioplynu. Látkové zatížení všech fermentorů obsahujících testovaný materiál však bylo relativně shodné, nižší bylo pouze u řepkového oleje 1 (viz tab. č. 2), proto lze vzájemně porovnat i celkové produkce bioplynu u jednotlivých testovaných materiálů.

Při testu č. 2 bylo množství bioplynu stanoveno stejně, jako absolutní denní a celková produkce, aby mohly být výsledky vzájemně porovnány. Látkové zatížení při testování gastroodpadu bylo též shodné. Při dávkování gastroodpadu s FOG a samotného FOG však bylo látkové zatížení vzhledem ke zkušenostem z testu č. 1 sníženo (viz tab. č. 2).

Při testu č. 1. bylo dosaženo největší celkové produkce bioplynu u cukru, protože se v podstatě jednalo o jediný standardně fungující fermentor. Hobson et al. (1981) uvádí nejvyšší produkci bioplynu u tuků, což nemůže být při tomto testu posouzeno vzhledem k nadměrnému látkovému zatížení procesu při testování olejů. Toto přetížení lze také pozorovat na rozdílu celkové produkce bioplynu při testování řepkového oleje ve 2 hodnotách látkového zatížení, kdy bylo při nižším látkovém zatížení dosaženo vyšší celkové produkce bioplynu než při vyšším látkovém zatížení.

Při testu č. 2 dosáhl nejvyšší celkové produkce bioplynu fermentor obsahující pouze FOG a to i přes nejnižší látkové zatížení, což potvrzuje výše zmíněné tvrzení, které uvádí Hobson et al. (1981).

Tab. č. 4: Celková produkce bioplynu

|           | Testovaný materiál    | Celková produkce bioplynu [m <sup>3</sup> ] |
|-----------|-----------------------|---------------------------------------------|
| TEST č. 1 | Cukr                  | 1,007                                       |
|           | Slunečnicový olej     | 0,289                                       |
|           | Řepkový olej 1        | 0,670                                       |
|           | Kontrola              | 0,405                                       |
|           | Řepkový olej 2        | 0,581                                       |
|           | Motorový olej         | 0,247                                       |
| TEST č. 2 | Gastroodpad (Thajsko) | 0,565                                       |
|           | Gastroodpad (ČR)      | 0,612                                       |
|           | Gastroodpad (Thajsko) | 0,571                                       |
|           | Kontrola              | 0,252                                       |
|           | FOG + gastroodpad     | 0,590                                       |
|           | FOG                   | 0,752                                       |

U správně fungujících fermentorů během obou testů měla absolutní denní produkce bioplynu klesající charakter (viz obr. č. 15), což bylo způsobeno dávkovým způsobem

plnění fermentorů. U cukru a všech 3 vzorků gastroodpadu dosáhla absolutní denní produkce bioplynu maxima ihned druhý den, tedy po přidání testovaného materiálu. U cukru je možné sledovat významnější hodnoty absolutní denní produkce bioplynu do dvanáctého dne. U gastroodpadů pouze do šestého dne. Což přibližně odpovídá výsledkům, kterých dosáhl Zhang et al. (2014) při kofermentaci kukuřičné siláže a vepřového hnoje, tedy významné produkce bioplynu během prvních 10 dnů, přičemž vrcholu dosáhla denní produkce během třetího až čtvrtého dne. Podle Zhang et al. (2014) pak produkce bioplynu klesla, až dosáhla nevýznamné hodnoty po asi 13 dnech.

U slunečnicového oleje a řepkového oleje 1 lze pozorovat maximální absolutní denní produkci bioplynu třetí den a dosažení druhého lokálního maxima kolem dvanáctého dne. Při dosažení prvního maxima se může jednat pouze o fyzikální vynesení bublinek plynu ze zpracovávaného materiálu. Klasická produkce bioplynu pak nastala až po čtrnáctém dni při rozkladu řetězců.

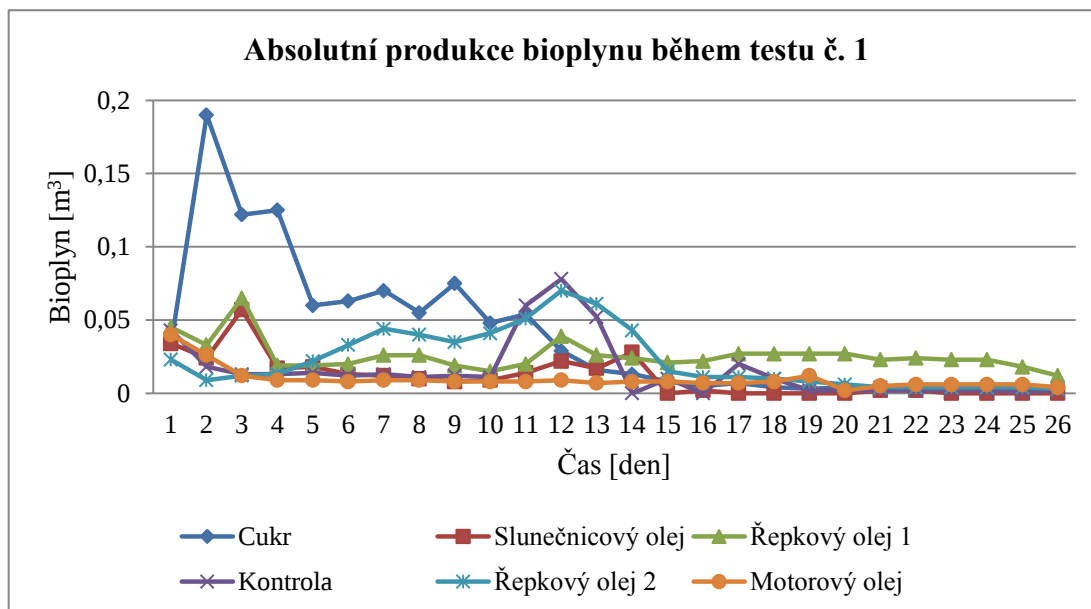
Při testování motorového oleje, došlo druhý den, tedy po přidání testovaného materiálu, ke snížení absolutní denní produkce bioplynu, která po celou dobu procesu nenabývala významnějších hodnot. Tento výsledek odpovídá předpokladu, že minerální motorový olej způsobí inhibici procesu anaerobní fermentace.

Řepkový olej 2 dosáhl maximální denní produkce dvanáctý den. Tato skutečnost navazuje i na další ukazatele. Od jedenáctého dne se začal zvyšovat obsah TOC ve zpracovávaném materiálu. Třináctý den dosáhl maxima obsah vodíku ve vznikajícím bioplynu. Čtrnáctý den došlo ke skokovému poklesu obsahu metanu ve vznikajícím bioplynu, došlo ke skokovému poklesu Eh, také pH dosáhlo maximální hodnoty a následně klesalo, naopak se skokově zvýšila sušina. Lze tedy konstatovat, že mezi jedenáctým a čtrnáctým dnem došlo k selhání procesu anaerobní fermentace.

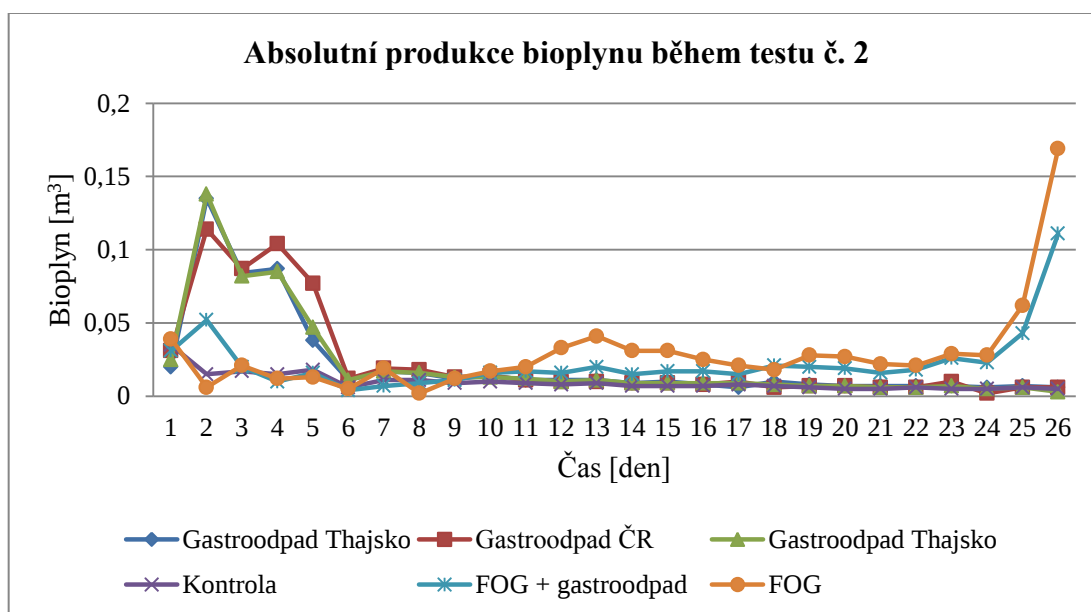
Na příkladu přehřátého kontrolního fermentoru při testu č. 1 lze demonstrovat zvýšenou produkci bioplynu při vyšší teplotě, tedy v termofilním režimu. Což se také odráží ve snížení obsahu metanu v bioplynu v období, během kterého byla ve fermentoru zvýšená teplota.

Při testu č. 2 se projevil odlišný trend produkce bioplynu při anaerobním zpracování FOG, kdy se produkce bioplynu začala významně zvyšovat až po 25 dnech (viz obr. č. 16). Chyba měření je vyloučena shodným vývojem u obou fermentorů obsahujících FOG, přičemž u FOG s gastroodpadem došlo k nižšímu nárůstu denní produkce metanu. Během dlouholeté praxe se pracovníci laboratoře s takovýmto vývojem absolutní denní produkce bioplynu nesetkali. Bylo by tedy vhodné provést testy anaerobní fermentace

FOG s delší reakční dobou. Martín-González et al. (2010) při anaerobní fermentaci tuků také pozoroval tuto skutečnost, a vysvětluje ji obsahem snadno rozložitelných látek v inokulačním materiálu, během jejichž rozkladu nedochází k příliš vysoké produkci bioplynu (jak také u testu č. 2 ukazuje kontrola). Po vyčerpání těchto snadno rozložitelných látek dochází k rozkladu energeticky bohatých tuků.



Obr. č. 15: Graf zobrazující absolutní produkci bioplynu během testu č. 1



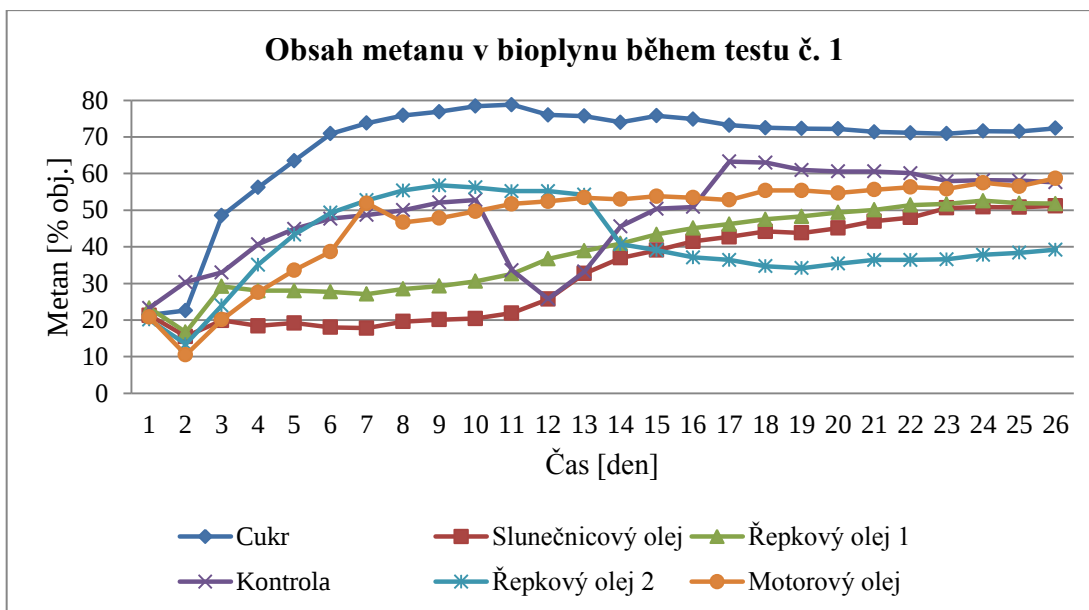
Obr. č. 16: Graf zobrazující absolutní produkce bioplynu během testu č. 2

Podle Deublein, Steinhauser (2008) ovlivňuje obsah metanu ve vznikajícím bioplynu několik faktorů, jako např. přidání sloučenin obsahujících dlouhé

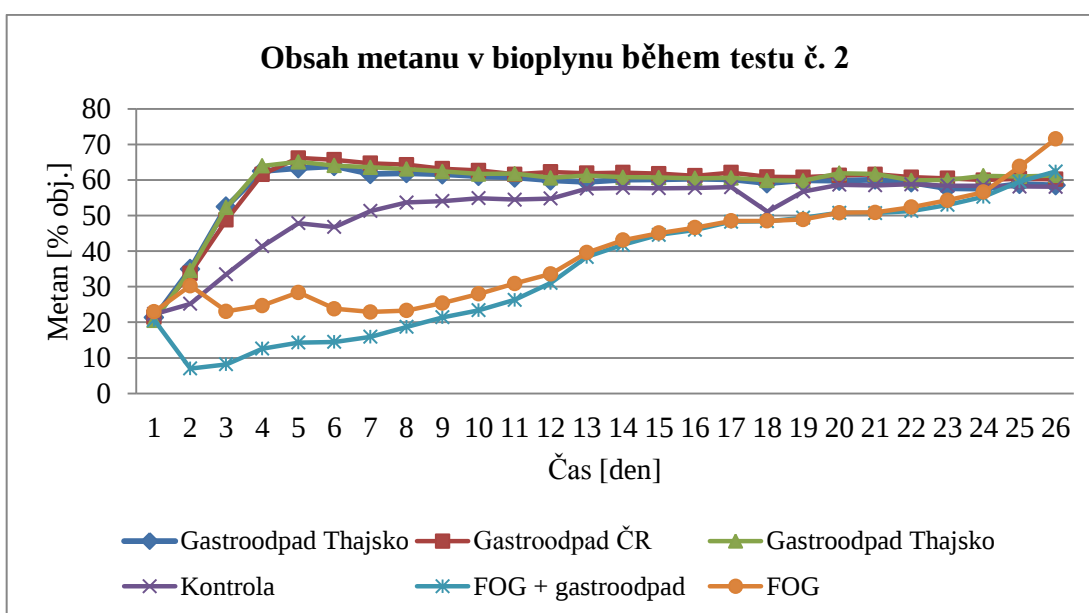
uhlovodíkové řetězce, což mohou být materiály bohaté na tuky, může přispět ke zlepšení kvality bioplynu, ovšem za předpokladu, že je množství těchto látek přiměřené, aby se předešlo přetížení procesu. Friehe et al. (2012) uvádí, že tuky mají vyšší výtěžnost metanu než sacharidy. Tvrzík et al. (2013) uvádí nejvyšší podíl metanu v bioplynu při anaerobním zpracování tuků (72 % obj.), u sacharidů méně (asi 50 % obj.). Při testování olejů, došlo k přetížení procesu, proto není možno potvrdit výše uvedené předpoklady. Během obou testů bylo dosaženo nejvyššího podílu metanu v bioplynu u reaktoru obsahujícího cukr (až 80 % obj., viz obr. č. 17 a 18).

Deublein, Steinhauser (2008) dále uvádějí, že se anaerobní rozklad biomasy zlepšuje s delší dobou zdržení, ke konci reakční doby se obsah metanu zvyšuje nepřiměřeně, zejména jakmile se začne deaktivovat proces hydrolýzy, při kterém se vyvíjí oxid uhličitý. Tomuto tvrzení odpovídá vývoj podílu metanu ve vznikajícím bioplynu u slunečnicového a řepkového oleje 1 a u fermentorů obsahujících FOG. Při anaerobním zpracování tuků je tedy nástup metanogenní fáze pozvolnější a tvar křivky neodpovídá charakteristické produkci metanu při vsázkovém způsobu dávkování reaktorů, jak jej uvádějí Schnürer, Jarvis (2010). Tedy, že při dávkovém způsobu plnění fermentoru produkce metanu zpočátku narůstá, rychle dosahuje maxima a dále se v průběhu času snižuje. Tomuto modelu odpovídá produkce metanu u cukru a všech gastroodpadů. Tento vývoj nastal zpočátku i u řepkového oleje 2, třináctý den však došlo ke zlomu a výraznému poklesu podílu metanu v bioplynu.

Friehe et al. (2012) uvádí, že prodloužení doby zdržení zlepšuje stupeň rozkladu zpracovávaného materiálu, v důsledku čehož roste produkce bioplynu. Čím delší je doba zdržení, tím více metanu se uvolní, což zvyšuje výhřevnost výsledné směsi plynů. Tento předpoklad může být aplikován na anaerobní zpracování tuků, protože jak bylo uvedeno výše u testovaného slunečnicového a řepkového oleje 1 a u fermentorů obsahujících FOG je nárůst podílu metanu pozvolný a při prodloužení reakční doby by se dal předpokládat jeho další růst.

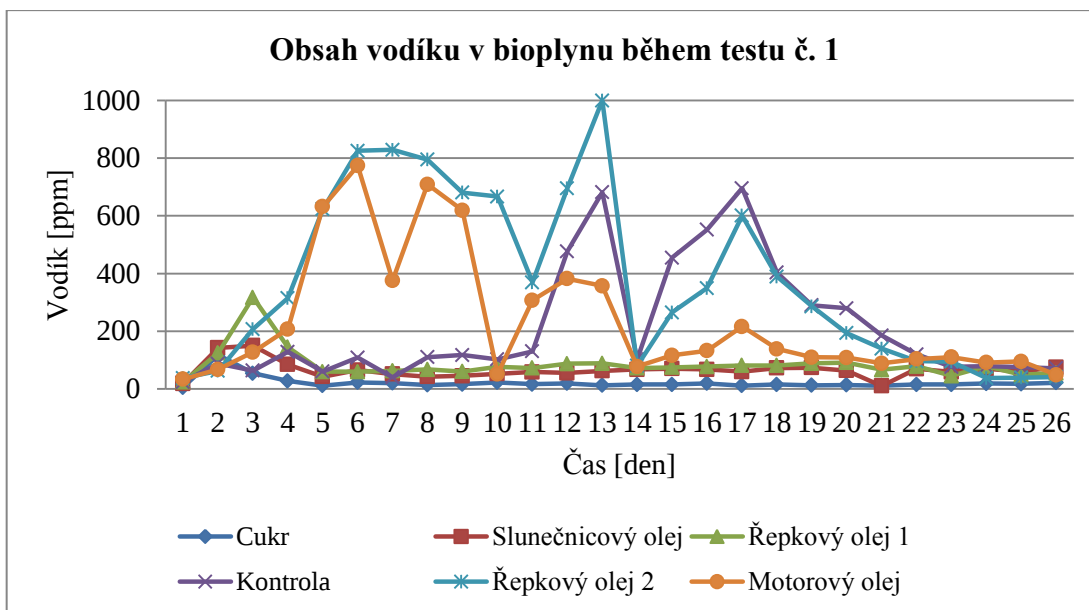


Obr. č. 17: Graf zobrazující obsah metanu v bioplynu vznikajícím během testu č. 1

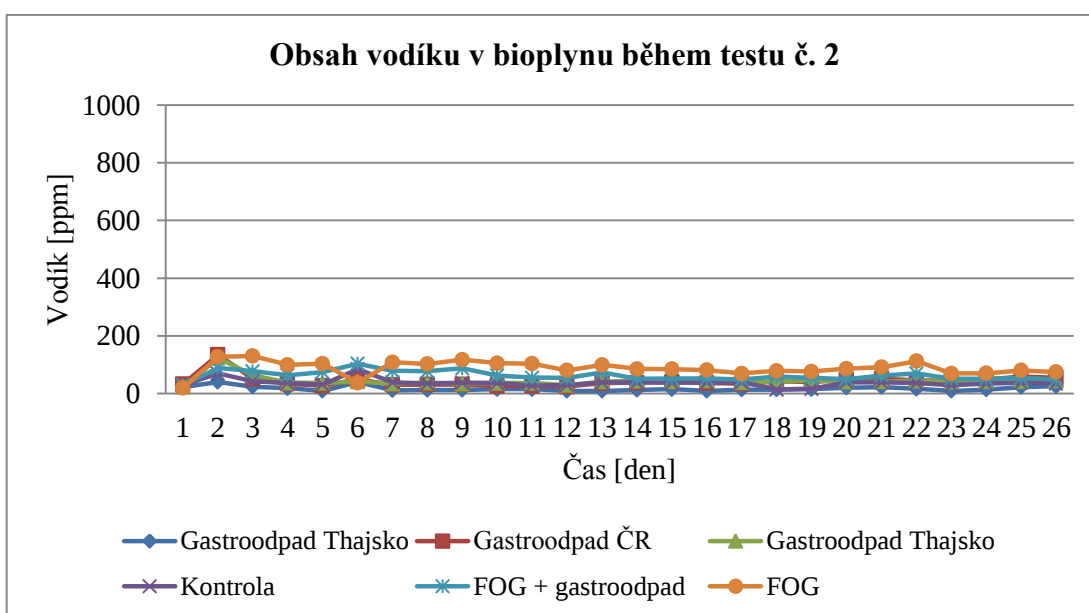


Obr. č. 18: Graf zobrazující obsah metanu v bioplynu vznikajícím během testu č. 2

V literatuře (např. Straka et al., 2010; Tvrzík et al., 2013) bývá zvýšený obsah vodíku v bioplynu spojován s poruchami procesu anaerobní fermentace. Podle Liebertau et al. (2012) je však vhodnost tohoto parametru sporná, protože ne vždy je možné dokázat vztah mezi koncentrací vodíku ve vznikajícím bioplynu a narušením procesu anaerobní fermentace. Na obr. č. 19 a 20 je však jasně vidět, že přetížené fermentory a přehřátý kontrolní fermentor při testu č. 1 vykazují výrazně vyšší obsah vodíku ve vznikajícím bioplynu, který se u správně fungujících fermentorů pohybuje do 200 ppm.



Obr. č. 19: Graf zobrazující obsah vodíku v bioplynu vznikajícím během testu č. 1



Obr. č. 20: Graf zobrazující obsah vodíku v bioplynu vznikajícím během testu č. 2

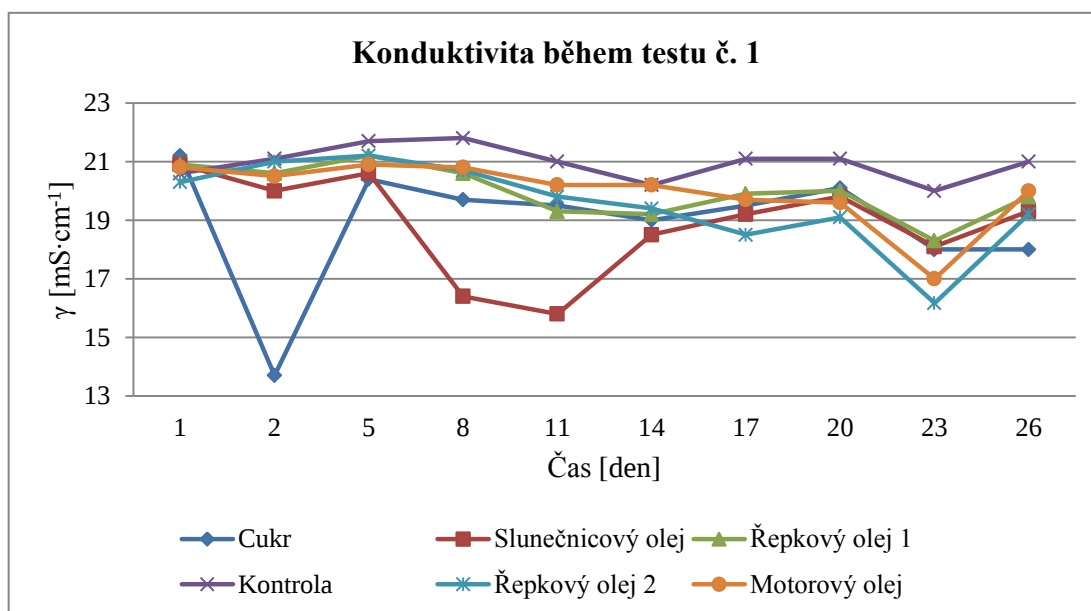
### 5.3 Konduktivita

Při testu č. 1 měla konduktivita ve všech reaktorech klesající trend (viz obr. č. 21). Významně se odlišuje fermentor obsahující cukr, u něhož došlo po přidání testovaného materiálu (tedy druhý den) k prudkému poklesu konduktivity, která se však již pátý den vrátila na úroveň ostatních hodnot, což bylo pravděpodobně způsobeno rychlým rozkladem snadno rozložitelných cukrů. U přehřátého kontrolního fermentoru lze vidět jedenáctý den výkyv v hodnotě konduktivity související s přehřátím reaktoru.

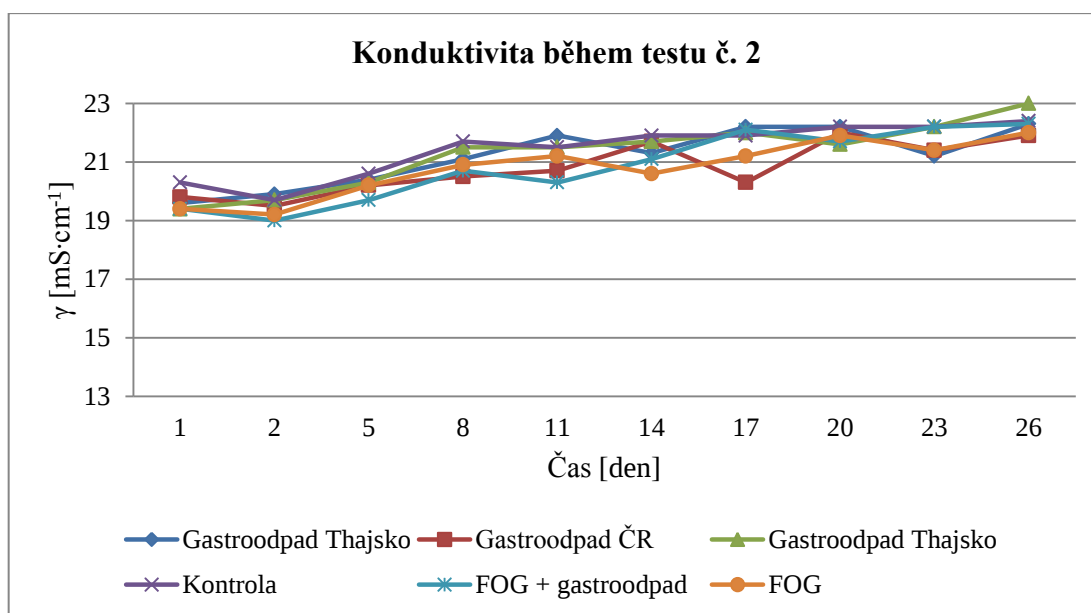
Při testu č. 1 byly pro stanovování konduktivity testovány nevhodné materiály. Měření konduktivity je vypovídající u vodných roztoků, nikoli u olejů, protože ty se nerozkládají až na ionty, ale na kratší nevodivé uhlovodíkové řetězce.

Během testu č. 2 nabývala konduktivita předpokládaných hodnot. Které vykazovaly u všech fermentorů shodný vzrůstající trend (viz obr. č. 22).

Kana et al. (2013) uvádí při svých pokusech založených na fermentaci glukózy na počátku anaerobní fermentace klesající hodnoty vodivosti, které předcházely nárůstu koncentrace oxidu uhličitého a vodíku ve vyvíjejícím se bioplynu. Dále uvádí, že se konduktivita postupně zvedala, přičemž pH klesalo. Což lze pozorovat také při testování z tohoto pohledu vhodných materiálů při testu č. 2. Kana et al. (2013) a Colombié et al. (2007) uvádějí, že pravděpodobnou příčinou nízké vodivosti, která byla pozorována v korelaci s vrcholy produkce bioplynu, může být rychlé ubývání množství iontů v materiálu způsobené metabolismem aktivních buněk mikroorganismů. Tuto skutečnost lze u testovaných materiálů sledovat pouze u cukru. Bryant et al. (2011) pozoroval silnou korelaci mezi změnou vodivosti a enzymovou hydrolýzou biomasy, resp. sacharidů. Což lze též názorně pozorovat na vývoji hodnot konduktivity při testování cukru.



Obr. č. 21: Graf zobrazující konduktivitu zpracovávaného materiálu během testu č. 1



Obr. č. 22: Graf zobrazující konduktivitu zpracovávaného materiálu během testu č. 2

## 5.4 Oxidačně redukční potenciál (Eh)

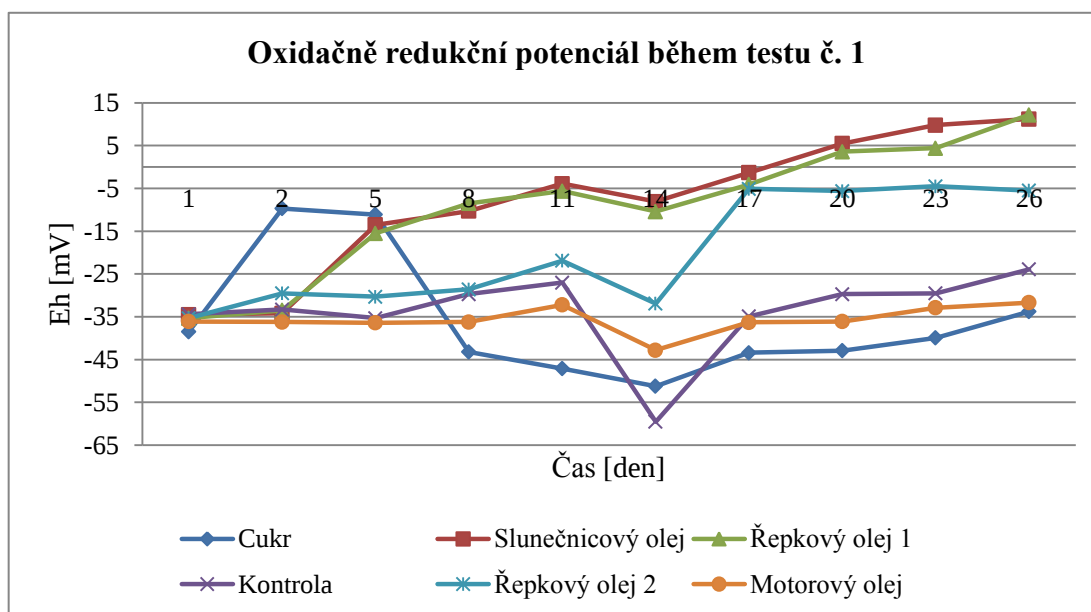
Deublein, Steinhäuser (2008) uvádějí, že ve fermentorech je nutná nízká hodnota Eh, pro monokultury metanogenů je pak optimální hodnota mezi -300 a -330 mV. Ve fermentoru však může hodnota Eh vzrůst k 0 mV. Při obou testech minimální hodnota Eh klesla na -60 mV, častěji se pohybovala ve vyšších hodnotách a několikrát přesáhla i hodnotu 0 mV (viz obr. č. 23 a 24). U standardně fungujících reaktorů se však hodnoty Eh nacházely níže než u přetížených fermentorů.

Při testu č. 1 lze pozorovat shodný trend ve vývoji Eh u slunečnicového a řepkového oleje 1, který koreluje s obdobným vývojem obsahu metanu ve vznikajícím bioplynu u těchto testovaných materiálů. U řepkového oleje 2 se trend hodnot Eh láme čtrnáctý den, což odpovídá maximální produkci bioplynu třináctý den a nepřímě úměrně i současnému zlomu v obsahu metanu ve vznikajícím bioplynu. Čtrnáctý den došlo také k prudkému výkyvu hodnoty Eh u kontrolního fermentoru v důsledku jeho přehřátí. Tato skutečnost je v přímé úměře k vývoji obsahu metanu v bioplynu.

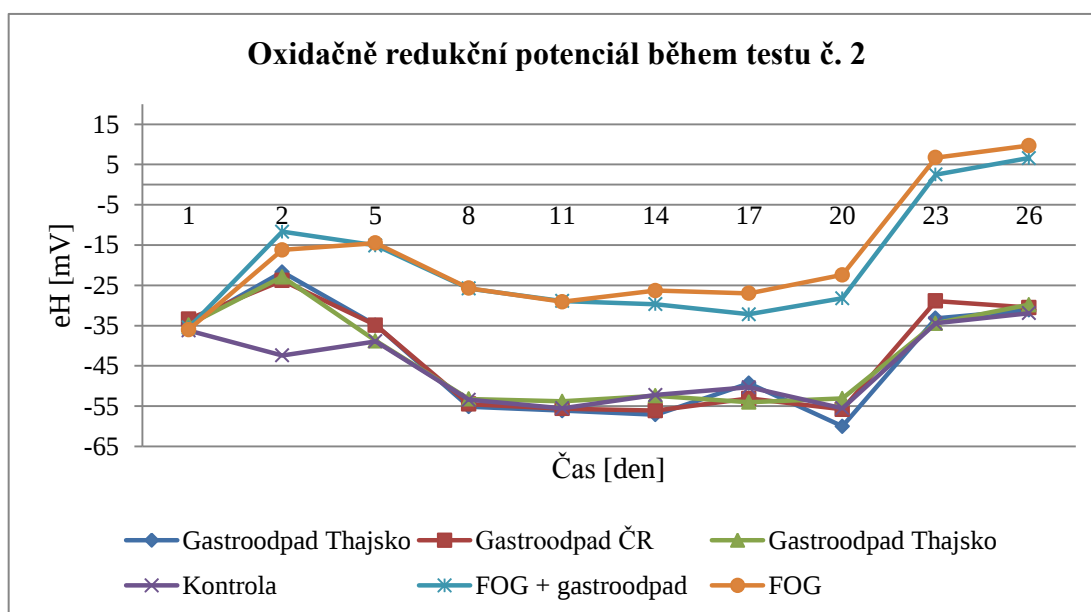
Vývoj Eh u testovaného cukru má téměř konvexní charakter. Stejně je tomu i u ostatních správně fungujících fermentorů při testu č. 2.

Také při testu č. 2 lze pozorovat souvislost Eh a obsahu metanu v bioplynu. Gastroodpady a kontrolní fermentor mající velice podobný trend vývoje obsahu metanu v bioplynu jsou také téměř shodné ve vývoji Eh. Pátý den dosahuje obsah metanu v bioplynu maxima a zároveň začíná klesat Eh zpracovávaného materiálu. Ke konci

testu, když už je produkce bioplynu zanedbatelná, hodnota Eh opět roste. U fermentorů obsahujících FOG pak dosahuje Eh během celého procesu hodnot vyšších o zhruba 20 mV a jeho změna přímo koreluje s obsahem metanu ve vznikajícím bioplynu. U těchto fermentorů nabývá Eh ke konci testu kladných hodnot, což má pravděpodobně souvislost s prudkým nárůstem absolutní denní produkce bioplynu a obsahu metanu v bioplynu, který je u těchto fermentorů možno pozorovat od dvacátého čtvrtého dne.



Obr. č. 23: Graf zobrazující Eh zpracovávaného materiálu během testu č. 1

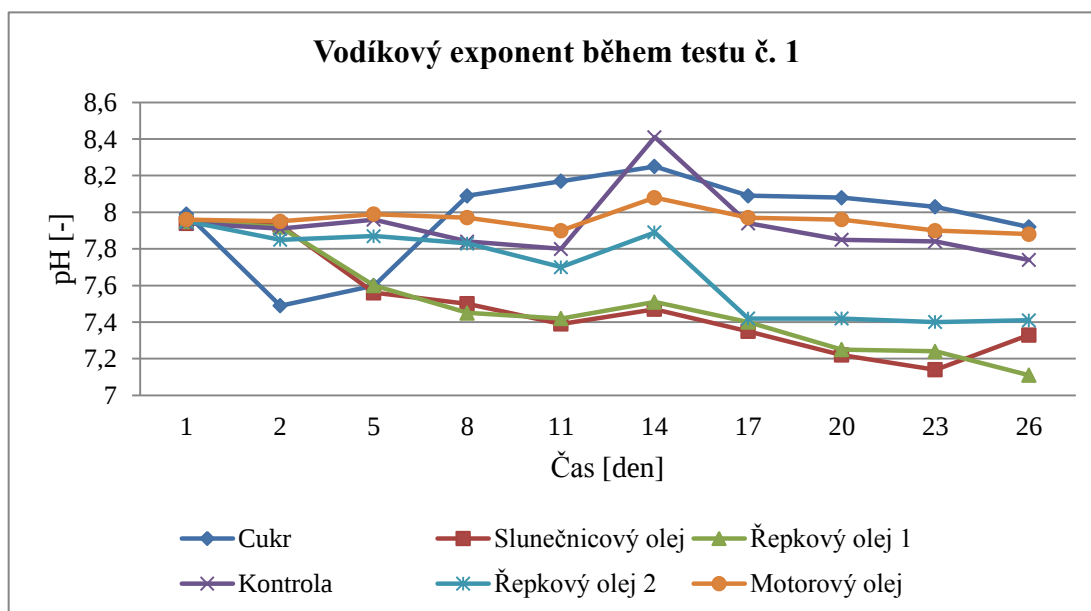


Obr. č. 24: Graf zobrazující Eh zpracovávaného materiálu během testu č. 2

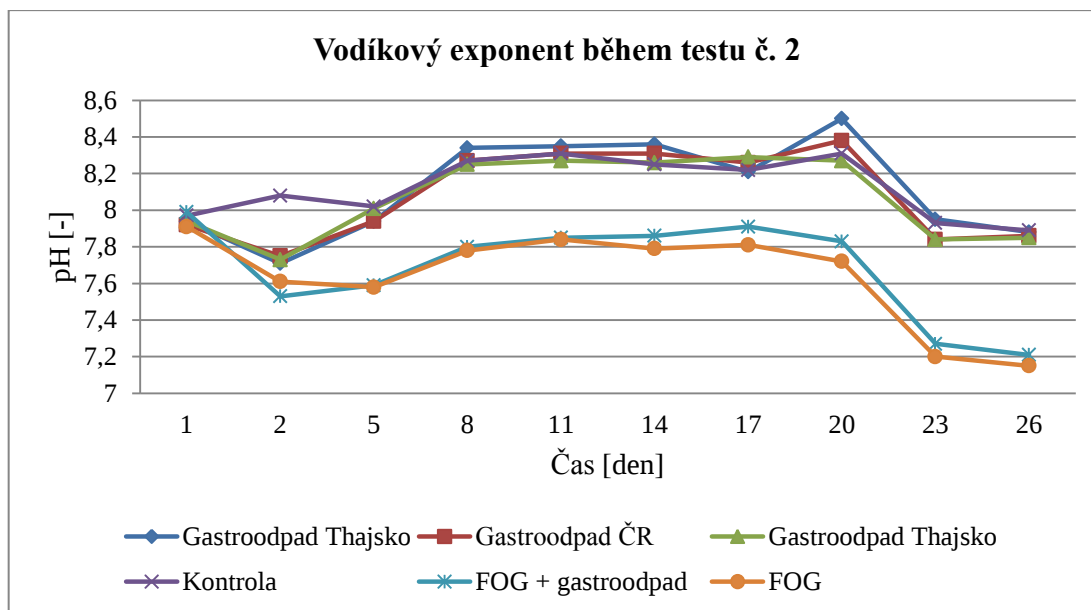
## 5.5 Vodíkový exponent (pH)

Deublein, Steinhauser (2008) uvádějí jako nejvhodnější pH vstupního materiálu 6,5 až 7,5. Při obou testech se hodnota pH inokulačního materiálu pohybovala mezi 7,9 a 8,0. Po přidání testovaných materiálů pH mírně kleslo. U cukru na 7,5, u ostatních materiálů při testu č. 1 zůstala hodnota pH přibližně stejná, při testu č. 2 došlo k poklesu na 7,8. Mao et al. (2015) uvádí pro proces anaerobní fermentace optimální pH mezi 6,8 až 7,4. Při obou testech se hodnoty pH pohybovaly nad hranicí 7,4. Pod tuto hodnotu kleslo pH pouze u slunečnicového a řepkového oleje 1 a ve fermentorech obsahujících FOG vždy ke konci testu (viz obr. č. 25 a 26).

Liebertau et al. (2012) uvádí, že v jednostupňové anaerobní fermentaci se hodnota pH ustálí na optimální hodnotě sama, protože mikrobiální společenstvo vytvoří autoregulační systém. Stabilní hodnotu pH pak také zajišťuje pufrací kapacita samotného zpracovávaného materiálu, kterou uskutečňují především hydrogenuhličitánové a amonné ionty. Tuto skutečnost lze pozorovat u správně fungujících fermentorů, kde má změna pH téměř konkávní průběh, který je v těchto fermentorech v nepřímé úměře ke konvexnímu vývoji Eh. Zrcadlový průběh hodnot pH a Eh lze sledovat i u přehřátého a přetížených fermentorů.



Obr. č. 25: Graf zobrazující pH zpracovávaného materiálu během testu č. 1



Obr. č. 26: Graf zobrazující pH zpracovávaného materiálu během testu č. 2

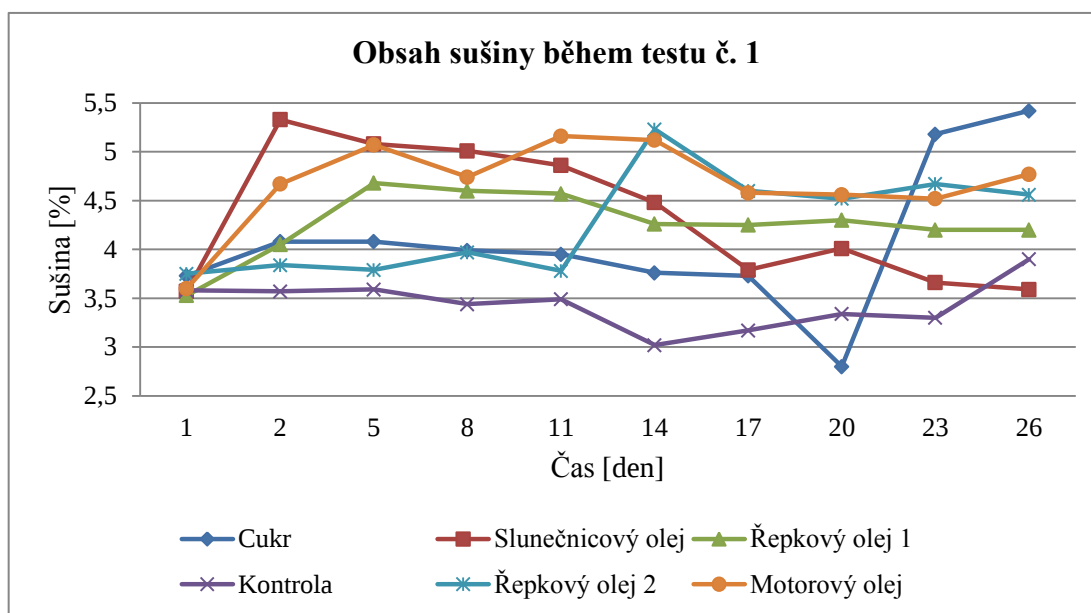
## 5.6 Sušina

Při testu č. 1 došlo ke zvýšení obsahu sušiny na konci testu v porovnání s hodnotami z druhého dne u všech fermentorů. Výjimkou byl fermentor obsahující slunečnicový olej, u kterého došlo k vypěnění (viz obr. č. 27). Tento výsledek se shoduje s tvrzením Provenzano et al. (2013), podle něhož obsahoval fermentační zbytek na konci testu nepatrně více sušiny (6 %) než surový vstupní materiál (4,9 %), což naznačuje, že anaerobní zpracování prasečí kejdy nevede k výraznému snížení obsahu vody.

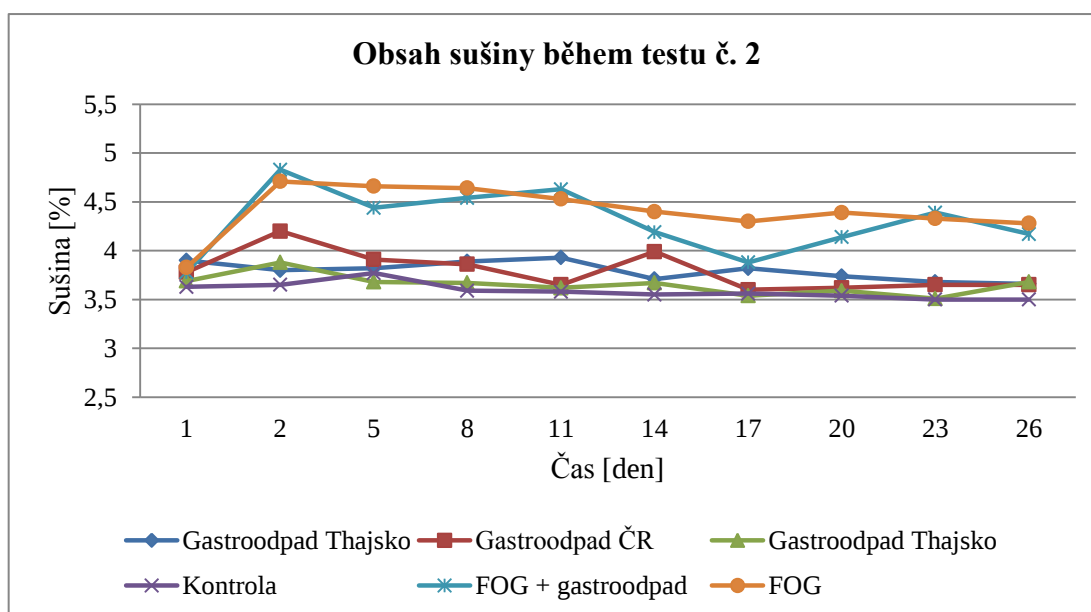
Během standardně probíhajícího testu č. 2 došlo ve všech fermentorech k mírnému snížení obsahu sušiny (o 0,14 až 0,66 %, viz obr č. 28), což odpovídá předpokladu pracovníků laboratoře, že během procesu anaerobní fermentace dojde ke snížení obsahu sušiny v důsledku rozkladu organických látek. Ale pokud uvažíme směrodatnou odchylku povolenou normou pro stanovení sušiny, tedy 0,5 %, jsou tyto hodnoty nevypovídající.

Stanovení sušiny se ukázalo jako nevhodný parametr pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. Obsah sušiny se v průběžně odebíraných vzorcích značně mění. To může být způsobeno současným rozkladem organických látek, díky kterému by měla sušina klesat, a odvodem vodní páry v bioplynu, který sušinu zvyšuje. Vzorkování je komplikované. Fermentor nelze otevřít, aby nedošlo k vniknutí vzduchu a narušení anaerobních podmínek. Ventil určený pro odběr vzorků zpracovávaného materiálu

ve stěně u dna fermentoru má dlouhý nátrubek, ve kterém může docházet i přes pravidelné promíchávání k usazování zpracovávaného materiálu.



Obr. č. 27: Graf zobrazující obsah sušiny ve zpracovávaném materiálu během testu č. 1



Obr. č. 28: Graf zobrazující obsah sušiny ve zpracovávaném materiálu během testu č. 2

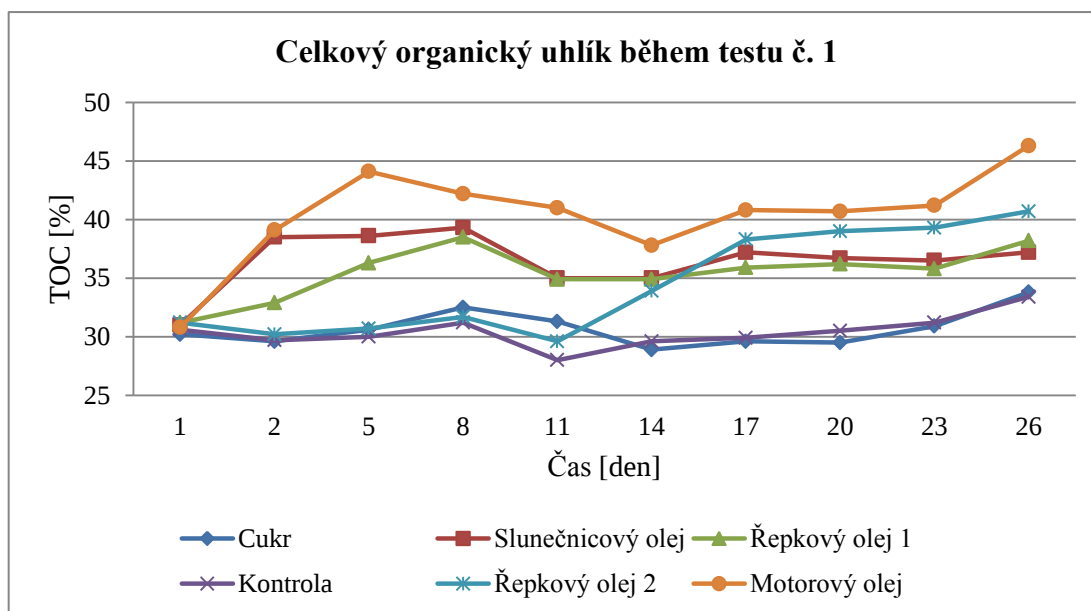
## 5.7 Celkový obsah organického uhlíku (TOC)

Při porovnání hodnot z druhého a dvacátého šestého dne při testu č. 1 dochází k nárůstu TOC ve zpracovávaném materiálu (viz obr. č. 29). Protože při tomto testu neprobíhal proces anaerobní fermentace standardním způsobem, došlo pravděpodobně k rozkladu

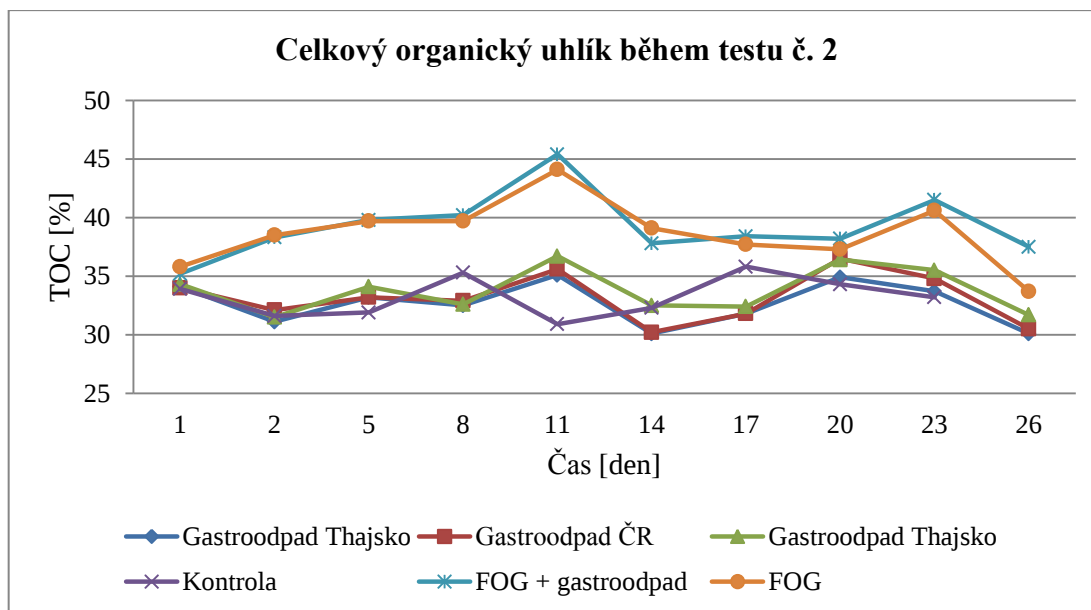
jiných než uhlíkatých látek, proto došlo ke zvýšení obsahu uhlíku ve zfermentovaném materiálu.

Při standardně probíhajícím testu č. 2 lze pozorovat malý pokles obsahu TOC (o 0,2 až 4,8 %, viz obr. č. 30). Podle Tambone et al. (2013) však obsah TOC ve zpracovávaném materiálu během anaerobní fermentace klesá výrazněji (o 12,5 %), protože mikroorganismy využívají cukry, bílkoviny, aminokyseliny a mastné kyseliny jako zdroj uhlíku. Tento rozdíl lze vysvětlit poměrně malou celkovou produkcí bioplynu během testu č. 2 (max. 0,752 m<sup>3</sup> u FOG), která může být způsobena nízkým poměrem C:N ve vstupním materiálu, jenž zvyšuje riziko inhibice anaerobního procesu amoniakem, který je toxický pro metanogeny a způsobuje nedostatečné využití zdrojů uhlíku.

Stanovení TOC se ukázalo jako nevhodný parametr pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. TOC během obou testů nabývá nepravděpodobných hodnot (roste, klesá, roste). Tato skutečnost je stejně jako při stanovení sušiny způsobena komplikovaným vzorkováním. Navíc při stanovování TOC může dojít k chybě způsobené malým množstvím spalovaného vzorku (0,06 g), který nebude při každém stanovení obsahovat stejný poměr kejdy a siláže, příp. zrn a stonků kukuřice, obsažené v inokulačním materiálu, a to i přes maximální snahu o homogenitu vzorků.



Obr. č. 29: Graf zobrazující obsah TOC ve zpracovávaném materiálu během testu č. 1



Obr. č. 30: Graf zobrazující obsah TOC ve zpracovávaném materiálu během testu č. 2

## 5.8 Celkový obsah dusíku v sušině (TKN)

Hodnoty obsahu TKN se u obou testů výrazně neměnily (nejvíce o 0,9 %, viz tab. č. 5 a 6). Což odpovídá výsledkům, které uvádí Prevenzano et al. (2013), tedy že se TKN během anaerobní fermentace výrazně neměnil (ze 4,4 na 4,2 %, tedy o 0,2 %).

Stanovení TKN se ukázalo jako nevhodný parametr pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. Tato skutečnost je stejně jako při stanovení sušiny a TOC způsobena komplikovaným vzorkováním. Při stanovování TKN může dojít, stejně jako u TOC, k chybě způsobené malým množstvím analyzovaného vzorku (0,2 g), který nebude při každém stanovení obsahovat stejný poměr kejdy a siláže, příp. zrn a stonků kukuřice, obsažené v inokulačním materiálu, a to i přes maximální snahu o homogenitu vzorků. Navíc stanovení TKN nepostihne amoniakální dusík, který ze vzorku vytěká během sušení.

Tab. č. 5: Celkový obsah dusíku v sušině při testu č. 1

|                   | TKN [%]                          |                |
|-------------------|----------------------------------|----------------|
|                   | Po přidání testovaného materiálu | Na konci testu |
| Cukr              | 2,7                              | 2,6            |
| Slunečnicový olej | 3,3                              | 3,0            |
| Řepkový olej 1    | 2,9                              | 3,0            |
| Kontrola          | 2,8                              | 2,6            |
| Řepkový olej 2    | 2,7                              | 2,5            |
| Motorový olej     | 2,1                              | 2,2            |

Tab. č. 6: Celkový obsah dusíku v sušině při testu č. 2

|                     | TKN [%]                          |                |
|---------------------|----------------------------------|----------------|
|                     | Po přidání testovaného materiálu | Na konci testu |
| Gastroodpad Thajsko | 2,6                              | 2,7            |
| Gastroodpad ČR      | 2,8                              | 2,7            |
| Gastroodpad Thajsko | 2,7                              | 2,7            |
| Kontrola            | 2,1                              | 2,6            |
| FOG + gastroodpad   | 2,2                              | 2,2            |
| FOG                 | 2,9                              | 2,0            |

## 5.9 Poměr C:N

Poměr C:N byl na počátku obou testů poměrně nízký (10,6 až 18,6:1). Friehe et al. (2012) uvádí jako dostačující poměr C:N 10 až 30:1. Mao et al. (2015) však uvádí, že substráty s příliš nízkým poměrem C:N zvyšují riziko inhibice anaerobního procesu amoniakem, který je toxický pro metanogeny a způsobuje nedostatečné využití zdrojů uhlíku, jako optimální uvádí poměr C:N 20 až 35:1. Mao et al. (2015) také uvádí, že při poměru C:N 25 až 30:1 je nejvyšší kumulativní produkce bioplynu, přibližně třikrát vyšší ve srovnání s poměrem C:N 15:1. Nízká celková produkce bioplynu při obou testech může být tedy způsobena nízkým poměrem C:N ve vstupním materiálu.

Během testu č. 1 došlo ke zvýšení poměru C:N (viz tab. č. 7), což bylo pravděpodobně způsobeno zvýšením obsahu uhlíku ve zfermentovaném materiálu v důsledku rozkladu jiných než uhlíkatých látek a jejich uvolnění do bioplynu. Prevenzano et al. (2013) uvádí, že během procesu anaerobní fermentace dochází k snížení poměru C:N (ze 7,8 na 5,2:1), které je způsobeno rozkladem organické hmoty, tedy úbytkem uhlíku ve zpracovávaném materiálu. Toto snížení poměru C:N lze pozorovat při testu č. 2 (viz tab. č. 8), i když i během tohoto testu došlo ke zvýšení poměru C:N u fermentoru obsahujícího FOG, ve kterém probíhal proces anaerobní fermentace standardně. Tuto skutečnost lze vysvětlit stejně jako u parametrů TOC a TKN, ze kterých byl poměr C:N odvozen. Stanovení poměru C:N se tedy také ukázalo jako nevhodný parametr pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. Poměr C:N je vhodné sledovat ve vstupním materiálu, aby nedocházelo k inhibici procesu anaerobní fermentace kvůli nedostatku nebo naopak nadbytku dusíku.

Tab. č. 7: *Poměr C:N při testu č. 1*

|                   | Poměr C:N                        |                |
|-------------------|----------------------------------|----------------|
|                   | Po přidání testovaného materiálu | Na konci testu |
| Cukr              | 11,4:1                           | 13,0:1         |
| Slunečnicový olej | 11,7:1                           | 12,4:1         |
| Řepkový olej 1    | 11,3:1                           | 12,7:1         |
| Kontrola          | 10,6:1                           | 12,8:1         |
| Řepkový olej 2    | 11,2:1                           | 16,3:1         |
| Motorový olej     | 18,6:1                           | 21,0:1         |

Tab. č. 8: *Poměr C:N při testu č. 2*

|                     | Poměr C:N                        |                |
|---------------------|----------------------------------|----------------|
|                     | Po přidání testovaného materiálu | Na konci testu |
| Gastroodpad Thajsko | 12,0:1                           | 11,1:1         |
| Gastroodpad ČR      | 11,5:1                           | 11,3:1         |
| Gastroodpad Thajsko | 11,7:1                           | 11,7:1         |
| Kontrola            | 14,5:1                           | 12,8:1         |
| FOG + gastroodpad   | 17,4:1                           | 17,0:1         |
| FOG                 | 13,3:1                           | 16,8:1         |

## 6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce v teoretické části popisuje současný stav řešené problematiky týkající se diagnostiky bioplynových stanic. Věnuje se používaným technologiím v bioplynových stanicích, resp. jejich rozdělení podle vybraných hledisek.

Dále tato práce popisuje vhodnou metodiku testování v průběhu anaerobní fermentace společně se vzorkováním u sledovaných parametrů.

V rámci praktické části této diplomové práce byly v laboratorních podmínkách Celorepublikové referenční laboratoře bioplynových transformací na Mendelově univerzitě v Brně sledovány následující parametry: složení a množství vznikajícího bioplynu, konduktivita, Eh, pH, obsah sušiny, TOC, TKN a poměr C:N ve zpracovávaném materiálu.

Byly provedeny 2 testy po 6 fermentorech. Při testu č. 1 došlo k předávkování a selhání procesu anaerobní fermentace u fermentorů, ve kterých byly testovány různé druhy olejů a k přehřátí kontrolního fermentoru. Test č. 2 již probíhal standardně, což umožnilo porovnat vývoj sledovaných parametrů u správně a špatně fungujících fermentorů.

Závěrem lze říci, že pro provozní diagnostiku bioplynových stanic je vhodné sledovat množství vznikajícího bioplynu, obsah metanu a vodíku ve vznikajícím bioplynu, konduktivitu, Eh a pH zpracovávaného materiálu.

Jako nevhodné pro sledování procesu anaerobní fermentace se ukázaly parametry sušina, TOC a TKN, protože vzorkování je značně komplikované. Fermentor nelze otevřít, aby nedošlo k vniknutí vzduchu a narušení anaerobních podmínek. Ventil určený pro odběr vzorků zpracovávaného materiálu ve stěně u dna fermentoru má dlouhý nátrubek, ve kterém může docházet i přes pravidelné promíchávání k usazování zpracovávaného materiálu. Při stanovování TOC a TKN může dojít k chybě způsobené malým množstvím analyzovaného vzorku, který při každém stanovení nebude obsahovat stejný poměr kejdy a siláže, příp. zrn a stonků kukuřice, obsažené v inokulačním materiálu, a to i přes maximální snahu o homogenitu vzorků.

Stanovení poměru C:N se tedy také ukázalo jako nevhodný parametr pro provozní diagnostiku bioplynových stanic. Poměr C:N je ale vhodné sledovat ve vstupním materiálu, aby nedocházelo k inhibici procesu anaerobní fermentace kvůli nedostatku nebo naopak nadbytku dusíku.

## 7 SEZNAM ZDROJŮ

- ABBASI, T., TAUSEEF, S. M., ABBASI, S. A., 2012: *Biogas Energy*. Springer, London, 169 s. ISBN 978-1-4614-1039-3.
- AL SEADI, T., et al., 2008: *Biogas handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg, Esbjerg, 125 s. ISBN 978-87-992962-0-0
- ANALYTIC JENA AG, 2011: *Operating manual – multi N/C 2100S TOC/TN<sub>b</sub> Analyzer*. Analytic Jena AG, Jena, 107 s.
- BARBER, W. P., STUCKEY, D. C., 1999: *The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for waste water treatment: a review*. Water Research, 33: 1559-1578.
- BINDERGROUP, 2011: *Návod k obsluze – Analyzátor plynu COMBIMASS GA-m*. Dokument online. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z WWW: <[http://www.zam.cz/NAVODY\\_DP\\_AN/CZ/COMBIMASS\\_GA-m\\_CZ\\_2012.pdf](http://www.zam.cz/NAVODY_DP_AN/CZ/COMBIMASS_GA-m_CZ_2012.pdf)>
- BOWEN, E. J., et al., 2014: *Low-temperature limitation of bioreaktor sludge in anaerobic treatment of domestic waste-water*. Water Sci Technol, 69: 1004-1013.
- BRYANT, D. N., et al., 2011: *Modelling real-time simultaneous saccharification and fermentation of lignocellulosic biomass and organic acid accumulation using dielectric spectroscopy*. Bioresour Technol, 102: 9675-9682.
- BUSTAMANTE, M. A., et al., 2013: *Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used*. Clean. Prod, 47: 61-69.
- CARBALLA, M., REGUEIRO, L., LEMA, J. M., 2015: *Microbial management of anaerobic digestion: exploiting the microbiome-functionality nexus*. Current Opinion in Biotechnology, 33: 103-111.
- COLOMBIÉ, S., LATRITE, E., SALAYROLLES, J. M., 2007: *Online estimation of assimilable nitrogen by electrical conductivity measurement during alcoholic fermentation in Enological conditions*. Biosci Bioeng, 103: 229-235.
- COONEY, C. L., WISE, D. L., 1975: *Thermophilic anaerobic digestion of solid waste for fuel gas production*. Biotechnol. Bioenergy, 17: 1119-1135.
- ČERMÁKOVÁ, J., TENKRÁT, D., 2011: *Efektivní zhodnocení bioplynu*. Článek online [cit. 2015-02-25]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz-bioplyn/odborne-clanky/efektivni-zhodnoceni-bioplynu>>.
- ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE, 2015: *Počet bioplynových stanic*. Statistika online. [cit. 2015-02-27]. Dostupné z: <WWW: <http://www.czba.cz/>>

- ČSN EN 15934, 2012: *Kaly, upravený bioodpad, půdy a odpady – Výpočet podílu sušiny po stanovení zbytku po sušení nebo obsahu vody*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 20 s.
- ČSN EN 15936, 2013: *Kaly, upravený bioodpad, půdy a odpady – Stanovení celkového organického uhlíku (TOC) suchým spalováním*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha, 24 s.
- ČSN EN 25663, 1995: *Jakost vod – Stanovení dusíku podle Kjeldahla*. Český normalizační institut, Praha, 10 s.
- DEUBLEIN, D., STEINHAUSER, A., 2008: *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Verlag, Dashöfer., 475 s. ISBN 978-3-527-62171-2.
- FANNIN, K. F., BILJETINA, R., 1987: *Reactor design. Anaerobic Digestion of Biomass* (Chynoweth, D.P. and Isaacson, R. eds). Elsevier Applied Science, London. s. 109-128.
- FERRER, I., et al., 2008: *Increasing biogas production by thermal (70 °C) sludge pre-treatment prior to thermophilic anaerobic digestion*. Biochem. Eng. J., 42: 186-192.
- FRIEHE, J., WEILAND, P., SCHATTAUER, A., 2012: Fundamentals of anaerobic digestion, s. 21-31. In: *Guide to Biogas*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow, 229 s.
- GARCÍA-BERNET, D., et al., 2011: *Water distribution in biowastes and digestates of dry anaerobic digestion technology*. Chem. Eng. J., 172: 924-928.
- GERŠL, M., et. al., 2014: *Vlastnosti siriých korozivních produktů z různých technologií produkce bioplynu*. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 42 s.
- GUNASEELAN, V. N., 2007: *Regression models of ultimate methane yields of fruits and vegetable solid wastes, sorghum and napiergrass on chemical composition*. Bioresource Technology, 98: 1270-1277.
- HACH, 1999: *Hach 23130-18 Digesdahl Digestion Apparatus Models 23130-20, -21 – Instrument Manual*. Hach Company, Loveland, 89 s.
- HILLS, D. J., 1979: *Effects of carbon:nitrogen ratio on anaerobic digestion of dairy manure*. Agric Wastes.,1: 267-278.
- HOBSON, P. N., BOUSFIELD, S., SUMMERS, R., 1981: *Methane Production from Agricultural and Domestic Wastes*. Springer Netherlands, 270 s., ISBN. 978-94-009-8104-1.

- CHO, J. K., PARK, S. C., CHANG, H. N., 1995: *Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes*. Bioresour. Technol., 52 (3): 245-253.
- JIANG, J., et al., 2010: *Comparison of atmospheric pressure effects on the anaerobic digestion of municipal solid waste*. Bioresour Technol., 101 (16): 6361-6367.
- KANA, E. B. G., SCHMIDT, S., KENFACK, R. H. A., 2013: *A web-enabled software for real-time biogas fermentation monitoring e Assessment of dark fermentations for correlations between medium conductivity and biohydrogen evolution*. Internadional Journal od Hydrogen Energy, 38: 10235-10244.
- KIM, J., et al., 2003: *Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge*. Biosci. Bioeng., 95: 271-275.
- KIM, M., et al., 2003: *Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion*. Environ. Technol., 24: 1183–1190.
- KOLÁŘ, L., VANĚK, V., KUŽEL, S., 2010: *Využití odpadů z bioplynových stanic*. Článek online [cit. 2015-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-bioplynovych-stanic>>.
- LEE, D. H., et al., 2009: *Methane production potential of leachate generated from Korean food waste recycling facilities: a lab-scale study*. Waste Manag., 29: 876-882.
- LIAO, B. Q., et al., 2006: *Anaerobic membrane bioreactors: application and research directive*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 36: 489-530.
- LIBRA, J. 2005: *Stavby pro odpadové hospodářství*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, Brno, 102 s. ISBN 80-7157-861-4.
- LIEBETRAU, J., et al., 2012: *Operation of biogas plants*, s. 85-114. In: *Guide to Biogas*. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V., Gülzow, 229 s.
- LIEDL, B. E., SHAFFLELF, J. M., 2006: *Fertilizer potential of liquid and solid effluent from thermophilic anaerobic digestion of poultry waste*. Water Sci. Technol., 53 (8): 69-79.
- LIU, C. F., et al., 2008: *Prediction of methane yield at optimum pH for anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste*. Bioresour. Technol., 99 (4): 882-888.
- MAHMOUD, N., et al., 2003: *Solid removal in upflow anaerobic reactors, a review*. Bioresource Technology, 90: 1-9.
- MAO, CH., et al., 2015: *Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45: 540-555.

MARTÍN-GONZÁLEZ, L., et al., 2010: *Anaerobic co-digestion of the organic fraction of municipal solid waste with FOG waste from a sewage treatment plant: Recovering a wasted methane potential and enhancing the biogas yield*. Waste Management, 30 (10):1854-1859.

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2014: *Metodický pokyn ke schvalování provozu bioplynových stanic a stanovování závazných podmínek provozu z hlediska ochrany životního prostředí*. Dokument online. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z WWW: <[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/schvalovani\\_bioplynovych\\_stanic/\\$FILE/000-Metodicky\\_dokument\\_BPS-20150402.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/schvalovani_bioplynovych_stanic/$FILE/000-Metodicky_dokument_BPS-20150402.pdf) >

MORAVEC, A., 2015: *Bioplyn láká zajímavé investice a rozvíjí venkov*. Článek online [cit. 2015-02-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz-bioplyn/odborne-clanky/bioplyn-laka-zajimave-investice-a-rozviji-venkov>>

MUŽÍK, O., SLEJŠKA, A., 2003: *Možnosti využití anaerobní fermentace pro zpracování zbytkové biomasy*. Článek online. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-anaerobni-fermentace-pro-zpracovani-zbytkove-biomasy>>

OWENS, JD, 1983: Formulation of culture media for conductimetric assays: theoretical considerations. Gen Microbiol, 131: 3055-3076.

PFLEGEROVÁ, E., et al., 2003: *Technický slovník naučný (4. svazek)*. Encyklopedický dům, Praha, 420 s. ISBN 80-86044-21-1.

PFLEGEROVÁ, E., et al., 2004: *Technický slovník naučný (6. svazek)*. Encyklopedický dům, Praha, 429 s. ISBN 80-86044-21-1.

PROVENZANO, M. R., et al., 2014: *Chemical and spectroscopic characterization of organic mattes during the anaerobic digestion and successive composting of pig slurry*. Waste Management, 34: 653-660.

PUNAL, A., et al., 2000: *Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors*. Water Res., 34: 2614-2619.

SCHAUMANN, 2015: *Vznik bioplynu*. Obrázek online. [cit. 2015-02-02]. Dostupné z WWW: <<http://bioplyn.schaumann.cz/vyroba/vznik-bioplynu/>>

SCHNÜRER, A., JARVIS, A., 2010: *Microbiological Handbook for Biogas Plants*. Swedish Waste Management, Malmö, 142 s.

SCHULZ, H., EDER, B., 2004: *Bioplyn v praxi*. HEL, Ostrava, 168 s. ISBN 80-86167-21-6.

- SIEVERS, D., BRUNE, D., 1978: *Carbon/nitrogen ratio and anaerobic digestion of swine waste*. American Society of Agricultural Engineers (USA). Trans. ASAE.
- STRAKA, F., et al., 2010: *Bioplyn – příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. GAS, Praha, 305 s. ISBN 978-80-7328-235-6.
- TAMBONE, F., et al., 2013: *Organic matter characterization during the anaerobic digestion of different biomasses by means of CPMAS <sup>13</sup>C NMR spectroscopy*. Biomass Bioenergy, 48: 111-120.
- TESAŘOVÁ, M., et al., 2010: *Biologické zpracování odpadů*. Mendelova univerzita v Brně, Brno, 129 s. ISBN 978-80-7375-420-4.
- TVRZNIČEK, P., ZEMAN, L., HAITL, M., 2013: *Bioplynové stanice z pohledu výživy zvířat*. Dokument online [cit. 2015-02-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.vuzv.cz/sites/File/vybor/Studie\\_Zeman\\_bioplynky\\_na\\_web.pdf](http://www.vuzv.cz/sites/File/vybor/Studie_Zeman_bioplynky_na_web.pdf)>.
- VÍTĚZ, T., et al., 2013: *Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastností půd*. Dokument online [cit. 2015-02-26]. Dostupné z WWW: <[http://eagri.cz/public/web/file/325087/MZE\\_fermentacni\\_zbytek\\_final\\_2013.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/325087/MZE_fermentacni_zbytek_final_2013.pdf)>
- WANG, X., et al., 2014: *Effects of temperature and carbon–nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition*. PLoS One;9: e97265.
- WELTEC BIOPOWER, 2011: *Míchadlo na dlouhé hřídeli uvnitř fermentoru*. Obrázek online [cit. 2015-04-28]. Dostupné z WWW: <<http://www.weltec-biopower.cz/infocentrum/obrazova-galerie>>
- WTW, 2004: *Multi-Parameter Instruments: pH, Oxygen and Conductivity Measurements*. Dokument online. [cit. 2015-03-28]. Dostupné z WWW: <[file:///C:/Users/U%C5%BEivatel/Downloads/wtw\\_lab\\_06\\_multi.pdf](file:///C:/Users/U%C5%BEivatel/Downloads/wtw_lab_06_multi.pdf)>
- WU, X., et al., 2010: *Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with free crop residues as an external carbon source*. Bioresour Technol., 101: 4042-4047.
- YEN, H.-W., BRUNE, D., 2007: *Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane*. Bioresour Technol., 98: 130-134.
- ZHANG, T., et al., 2013: *Biogas production by co-digestion of goat manure with free crop residues*. PLoS One; 8:e66845.
- ZHANG, T., et al., 2014: *Influence of initial pH on thermophilic anaerobic co-digestion of swine manure and maize stalk*. Waste Management, 35: 119-126.

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. č. 1: Obecné schéma bioplynové stanice .....                                           | 11 |
| Obr. č. 2: Míchadlo uvnitř fermentoru .....                                                 | 12 |
| Obr. č. 3: Průběh anaerobní fermentace.....                                                 | 19 |
| Obr. č. 4: Laboratorní fermentor .....                                                      | 27 |
| Obr. č. 5: Měření složení bioplynu pomocí přístroje COMBIMASS GA-m .....                    | 30 |
| Obr. č. 6: Měření konduktivity laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720 .....          | 31 |
| Obr. č. 7: Měření Eh laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720 .....                    | 31 |
| Obr. č. 8: Měření pH laboratorním multimetrem WTW inoLab Multi 720.....                     | 32 |
| Obr. č. 9: Vzorky v odpařovacích kelímcích po sušení .....                                  | 32 |
| Obr. č. 10: Drcení suchých vzorků.....                                                      | 33 |
| Obr. č. 11: Analyzátor multi N/C 2100S s pecí HT 1300 .....                                 | 34 |
| Obr. č. 12: Mineralizátor Hach Digesdahl 23130-18 .....                                     | 35 |
| Obr. č. 13: Kyvety se vzorky pro spektrofotometrické stanovení TKN.....                     | 35 |
| Obr. č. 14: Spektrofotometr Hach Lange DR 2800.....                                         | 36 |
| Obr. č. 15: Graf zobrazující absolutní produkci bioplynu během testu č. 1 .....             | 40 |
| Obr. č. 16: Graf zobrazující absolutní produkce bioplynu během testu č. 2 .....             | 40 |
| Obr. č. 17: Graf zobrazující obsah metanu v bioplynu vznikajícím během testu č. 1 .....     | 42 |
| Obr. č. 18: Graf zobrazující obsah metanu v bioplynu vznikajícím během testu č. 2.....      | 42 |
| Obr. č. 19: Graf zobrazující obsah vodíku v bioplynu vznikajícím během testu č. 1 .....     | 43 |
| Obr. č. 20: Graf zobrazující obsah vodíku v bioplynu vznikajícím během testu č. 2 .....     | 43 |
| Obr. č. 21: Graf zobrazující konduktivitu zpracovávaného materiálu během testu č. 1 .....   | 44 |
| Obr. č. 22: Graf zobrazující konduktivitu zpracovávaného materiálu během testu č. 2 .....   | 45 |
| Obr. č. 23: Graf zobrazující Eh zpracovávaného materiálu během testu č. 1 .....             | 46 |
| Obr. č. 24: Graf zobrazující Eh zpracovávaného materiálu během testu č. 2 .....             | 46 |
| Obr. č. 25: Graf zobrazující pH zpracovávaného materiálu během testu č. 1 .....             | 47 |
| Obr. č. 26: Graf zobrazující pH zpracovávaného materiálu během testu č. 2.....              | 48 |
| Obr. č. 27: Graf zobrazující obsah sušiny ve zpracovávaném materiálu během testu č. 1 ..... | 49 |
| Obr. č. 28: Graf zobrazující obsah sušiny ve zpracovávaném materiálu během testu č. 2 ..... | 49 |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. č. 29: Graf zobrazující obsah TOC ve zpracovávaném materiálu během testu č. 1..... | 50 |
| Obr. č. 30: Graf zobrazující obsah TOC ve zpracovávaném materiálu během testu č. 2..... | 51 |

## 9 SEZNAM TABULEK

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. č. 1: Teoretická produkce bioplynu .....                         | 22 |
| Tab. č. 2: Testované materiály .....                                  | 29 |
| Tab. č. 3: Přehled dnů, ve kterých byly odebírány vzorky (modře)..... | 30 |
| Tab. č. 4: Celková produkce bioplynu .....                            | 38 |
| Tab. č. 5: Celkový obsah dusíku v sušině při testu č. 1 .....         | 51 |
| Tab. č. 6: Celkový obsah dusíku v sušině při testu č. 2 .....         | 52 |
| Tab. č. 7: Poměr C:N při testu č. 1 .....                             | 53 |
| Tab. č. 8: Poměr C:N při testu č. 2.....                              | 53 |

## 10 POUŽITÉ ZKRATKY

|     |                                                                       |
|-----|-----------------------------------------------------------------------|
| ČOV | čistírna odpadních vod                                                |
| ČR  | Česká republika                                                       |
| Eh  | oxidačně redukční potenciál                                           |
| FOG | z anglického fats, oils and grease, tzn. tuky, oleje a další mastnoty |
| MŽP | ministerstvo životního prostředí                                      |
| pH  | vodíkový exponent                                                     |
| TKN | celkový obsah dusíku v sušině                                         |
| TOC | celkový obsah organického uhlíku                                      |

## 11 PŘÍLOHY

Příloha č. 1: Absolutní produkce bioplynu

Příloha č. 2: Obsah metanu v bioplynu

Příloha č. 3: Obsah vodíku v bioplynu

Příloha č. 4: Konduktivita

Příloha č. 5: Oxidačně redukční potenciál

Příloha č. 6: Vodíkový exponent

Příloha č. 7: Obsah sušiny

Příloha č. 8: Celkový obsah organického uhlíku

# **Příloha č. 1**

Tab. č. 9: *Absolutní produkce bioplynu při testu č. 1*

| Den               | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | Bioplyn [m <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Cukr              | 0,034                     | 0,190 | 0,122 | 0,125 | 0,060 | 0,063 | 0,070 | 0,055 | 0,075 | 0,048 | 0,054 | 0,029 | 0,016 |
| Slunečnicový olej | 0,034                     | 0,024 | 0,057 | 0,017 | 0,018 | 0,013 | 0,012 | 0,010 | 0,008 | 0,009 | 0,014 | 0,022 | 0,017 |
| Řepkový olej 1    | 0,045                     | 0,033 | 0,065 | 0,019 | 0,019 | 0,020 | 0,026 | 0,026 | 0,019 | 0,015 | 0,020 | 0,039 | 0,026 |
| Kontrola          | 0,043                     | 0,018 | 0,013 | 0,013 | 0,014 | 0,012 | 0,013 | 0,011 | 0,012 | 0,011 | 0,060 | 0,078 | 0,052 |
| Řepkový olej 2    | 0,023                     | 0,009 | 0,012 | 0,013 | 0,022 | 0,033 | 0,044 | 0,040 | 0,035 | 0,041 | 0,051 | 0,070 | 0,061 |
| Motorový olej     | 0,040                     | 0,026 | 0,012 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,007 |

Tab. č. 10: *Absolutní produkce bioplynu při testu č. 1, pokračování*

| Den               | 14                        | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | Σ     |
|-------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | Bioplyn [m <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Cukr              | 0,013                     | 0,008 | 0,005 | 0,007 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 1,007 |
| Slunečnicový olej | 0,028                     | 0,000 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,289 |
| Řepkový olej 1    | 0,024                     | 0,021 | 0,022 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,027 | 0,023 | 0,024 | 0,023 | 0,023 | 0,018 | 0,012 | 0,670 |
| Kontrola          | 0,000                     | 0,010 | 0,000 | 0,020 | 0,010 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,405 |
| Řepkový olej 2    | 0,043                     | 0,015 | 0,011 | 0,011 | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,581 |
| Motorový olej     | 0,008                     | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,012 | 0,002 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,004 | 0,247 |

# **Příloha č. 1**

Tab. č. 11: *Absolutní produkce bioplynu při testu č. 2*

| Den                 | 1                         | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    |
|---------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | Bioplyn [m <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Gastroodpad Thajsko | 0,02                      | 0,135 | 0,084 | 0,087 | 0,038 | 0,011 | 0,017 | 0,016 | 0,012 | 0,014 | 0,011 | 0,011 | 0,011 |
| Gastroodpad ČR      | 0,031                     | 0,114 | 0,087 | 0,104 | 0,077 | 0,012 | 0,019 | 0,018 | 0,013 | 0,014 | 0,011 | 0,010 | 0,010 |
| Gastroodpad Thajsko | 0,025                     | 0,138 | 0,082 | 0,085 | 0,047 | 0,011 | 0,017 | 0,016 | 0,013 | 0,013 | 0,012 | 0,010 | 0,011 |
| Kontrola            | 0,035                     | 0,015 | 0,017 | 0,015 | 0,018 | 0,006 | 0,011 | 0,011 | 0,009 | 0,010 | 0,009 | 0,008 | 0,009 |
| FOG + gastroodpad   | 0,031                     | 0,052 | 0,020 | 0,010 | 0,016 | 0,004 | 0,007 | 0,009 | 0,011 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,020 |
| FOG                 | 0,039                     | 0,006 | 0,021 | 0,012 | 0,013 | 0,005 | 0,019 | 0,002 | 0,012 | 0,017 | 0,020 | 0,033 | 0,041 |

Tab. č. 12: *Absolutní produkce bioplynu při testu č. 2, pokračování*

| Den              | 14                        | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    | 25    | 26    | Σ     |
|------------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | Bioplyn [m <sup>3</sup> ] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Gastroodp. Thaj. | 0,009                     | 0,010 | 0,008 | 0,006 | 0,010 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,007 | 0,006 | 0,565 |
| Gastroodp. ČR    | 0,009                     | 0,009 | 0,008 | 0,010 | 0,006 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,010 | 0,002 | 0,006 | 0,006 | 0,612 |
| Gastroodp. Thaj. | 0,009                     | 0,009 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,007 | 0,007 | 0,006 | 0,006 | 0,007 | 0,005 | 0,006 | 0,003 | 0,571 |
| Kontrola         | 0,007                     | 0,007 | 0,007 | 0,008 | 0,007 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,252 |
| FOG + gastroodp. | 0,015                     | 0,017 | 0,017 | 0,015 | 0,021 | 0,020 | 0,019 | 0,016 | 0,018 | 0,026 | 0,023 | 0,043 | 0,111 | 0,59  |
| FOG              | 0,031                     | 0,031 | 0,025 | 0,021 | 0,018 | 0,028 | 0,027 | 0,022 | 0,021 | 0,029 | 0,028 | 0,062 | 0,169 | 0,752 |

## Příloha č. 2

Tab. č. 13: *Obsah metanu v bioplynu při testu č. 1*

| Den               | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
|-------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | Metan [% obj.] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 21,4           | 22,6 | 48,5 | 56,2 | 63,5 | 70,9 | 73,8 | 75,9 | 76,9 | 78,4 | 78,8 | 76,0 | 75,7 |
| Slunečnicový olej | 21,3           | 15,5 | 19,9 | 18,4 | 19,2 | 18,0 | 17,8 | 19,6 | 20,1 | 20,4 | 21,9 | 25,7 | 32,7 |
| Řepkový olej 1    | 23,3           | 16,7 | 29,2 | 28,0 | 28,0 | 27,7 | 27,1 | 28,5 | 29,3 | 30,6 | 32,6 | 36,7 | 38,9 |
| Kontrola          | 23,3           | 30,4 | 33,0 | 40,7 | 44,9 | 47,7 | 48,7 | 50,0 | 52,1 | 52,8 | 33,6 | 25,8 | 33,2 |
| Řepkový olej 2    | 20,1           | 13,4 | 24,0 | 35,1 | 43,3 | 49,3 | 52,7 | 55,4 | 56,8 | 56,2 | 55,2 | 55,2 | 54,2 |
| Motorový olej     | 20,8           | 10,5 | 20,1 | 27,6 | 33,6 | 38,7 | 51,9 | 46,7 | 47,8 | 49,7 | 51,7 | 52,4 | 53,4 |

Tab. č. 14: *Obsah metanu v bioplynu při testu č. 1, pokračování*

| Den               | 14             | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   |
|-------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | Metan [% obj.] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 74,0           | 75,8 | 74,9 | 73,2 | 72,5 | 72,3 | 72,2 | 71,4 | 71,1 | 70,9 | 71,6 | 71,5 | 72,4 |
| Slunečnicový olej | 37,0           | 39,1 | 41,5 | 42,7 | 44,2 | 43,8 | 45,1 | 47,0 | 48,0 | 50,6 | 50,9 | 50,8 | 51,2 |
| Řepkový olej 1    | 40,9           | 43,4 | 45,1 | 46,2 | 47,5 | 48,3 | 49,4 | 50,1 | 51,4 | 51,7 | 52,6 | 51,9 | 51,8 |
| Kontrola          | 45,6           | 50,4 | 50,9 | 63,3 | 63,0 | 61,0 | 60,6 | 60,6 | 60,1 | 57,9 | 58,2 | 58,1 | 57,6 |
| Řepkový olej 2    | 40,7           | 39,1 | 37,1 | 36,4 | 34,7 | 34,2 | 35,4 | 36,4 | 36,4 | 36,6 | 37,8 | 38,4 | 39,2 |
| Motorový olej     | 53,0           | 53,8 | 53,4 | 52,8 | 55,4 | 55,4 | 54,7 | 55,6 | 56,3 | 55,8 | 57,5 | 56,5 | 58,7 |

## Příloha č. 2

Tab. č. 15: *Obsah metanu v bioplynu při testu č. 2*

| Den                 | 1              | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   |
|---------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | Metan [% obj.] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad Thajsko | 21,3           | 34,9 | 52,5 | 62,5 | 63,3 | 63,9 | 61,7 | 61,9 | 61,6 | 61,1 | 60,7 | 59,9 | 59,5 |
| Gastroodpad ČR      | 21,4           | 33,8 | 48,8 | 61,6 | 66,2 | 65,7 | 64,7 | 64,3 | 63,2 | 62,7 | 61,6 | 62,3 | 61,9 |
| Gastroodpad Thajsko | 20,5           | 34,6 | 52,3 | 64,0 | 65,1 | 64,1 | 63,6 | 63,1 | 62,4 | 61,7 | 61,8 | 60,6 | 61,3 |
| Kontrola            | 22,3           | 25,2 | 33,5 | 41,4 | 47,9 | 46,8 | 51,3 | 53,7 | 54,1 | 54,9 | 54,5 | 54,8 | 57,6 |
| FOG + gastroodpad   | 20,6           | 7,0  | 8,2  | 12,6 | 14,3 | 14,5 | 15,9 | 18,7 | 21,4 | 23,4 | 26,3 | 31,1 | 38,4 |
| FOG                 | 23,0           | 30,3 | 23,1 | 24,7 | 28,4 | 23,8 | 22,9 | 23,3 | 25,4 | 28,0 | 30,9 | 33,6 | 39,6 |

Tab. č. 16: *Obsah metanu v bioplynu při testu č. 2, pokračování*

| Den                 | 14             | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26   |
|---------------------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | Metan [% obj.] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad Thajsko | 60,1           | 60,2 | 60,4 | 60,2 | 59,1 | 59,9 | 59,8 | 60,1 | 59,3 | 57,7 | 57,6 | 58,9 | 58,5 |
| Gastroodpad ČR      | 62,1           | 61,8 | 61,2 | 62,1 | 60,9 | 60,8 | 61,3 | 61,6 | 60,8 | 60,5 | 60,0 | 60,4 | 60,2 |
| Gastroodpad Thajsko | 60,8           | 60,7 | 60,5 | 60,6 | 59,9 | 59,8 | 61,9 | 61,7 | 59,9 | 60,0 | 61,2 | 61,0 | 61,3 |
| Kontrola            | 57,8           | 57,7 | 57,8 | 58,0 | 51,1 | 56,8 | 58,7 | 58,5 | 58,8 | 58,4 | 58,4 | 58,2 | 58,1 |
| FOG + gastroodpad   | 41,8           | 44,6 | 46,0 | 48,3 | 48,4 | 49,4 | 50,8 | 50,7 | 51,3 | 53,0 | 55,3 | 59,6 | 62,4 |
| FOG                 | 43,1           | 45,1 | 46,6 | 48,5 | 48,5 | 48,9 | 50,8 | 50,9 | 52,4 | 54,3 | 56,6 | 63,8 | 71,6 |

### Příloha č. 3

Tab. č. 17: *Obsah vodíku v bioplynu při testu č. 1*

| Den               | 1           | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13   |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|                   | Vodík [ppm] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| Cukr              | 5           | 117 | 54  | 27  | 11  | 22  | 20  | 13  | 16  | 22  | 16  | 19  | 12   |
| Slunečnicový olej | 18          | 142 | 150 | 84  | 42  | 65  | 51  | 42  | 45  | 52  | 58  | 55  | 62   |
| Řepkový olej 1    | 23          | 124 | 317 | 144 | 59  | 59  | 62  | 67  | 60  | 76  | 72  | 87  | 88   |
| Kontrola          | 24          | 87  | 63  | 128 | 60  | 108 | 40  | 110 | 117 | 102 | 130 | 477 | 682  |
| Řepkový olej 2    | 37          | 62  | 207 | 315 | 623 | 826 | 829 | 795 | 681 | 667 | 369 | 696 | 1001 |
| Motorový olej     | 33          | 67  | 127 | 207 | 632 | 774 | 376 | 709 | 619 | 51  | 307 | 382 | 357  |

Tab. č. 18: *Obsah vodíku v bioplynu při testu č. 1, pokračování*

| Den               | 14          | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  | 21  | 22  | 23  | 24 | 25 | 26 |
|-------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|
|                   | Vodík [ppm] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |    |    |
| Cukr              | 15          | 15  | 19  | 11  | 15  | 12  | 13  | 11  | 15  | 15  | 18 | 17 | 21 |
| Slunečnicový olej | 67          | 70  | 67  | 59  | 72  | 73  | 63  | 10  | 69  | 58  | 69 | 59 | 75 |
| Řepkový olej 1    | 72          | 74  | 77  | 81  | 81  | 88  | 91  | 66  | 78  | 45  | 78 | 48 | 55 |
| Kontrola          | 102         | 455 | 552 | 696 | 403 | 290 | 279 | 185 | 119 | 76  | 78 | 75 | 71 |
| Řepkový olej 2    | 80          | 265 | 349 | 601 | 389 | 286 | 193 | 139 | 96  | 94  | 37 | 39 | 41 |
| Motorový olej     | 77          | 116 | 132 | 216 | 138 | 109 | 108 | 88  | 103 | 110 | 91 | 95 | 48 |

### Příloha č. 3

Tab. č. 19: *Obsah vodíku v bioplynu při testu č. 2*

| Den                 | 1           | 2   | 3   | 4  | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12 | 13 |
|---------------------|-------------|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
|                     | Vodík [ppm] |     |     |    |     |     |     |     |     |     |     |    |    |
| Gastroodpad Thajsko | 22          | 40  | 23  | 18 | 9   | 40  | 11  | 12  | 12  | 15  | 15  | 9  | 9  |
| Gastroodpad ČR      | 32          | 134 | 51  | 33 | 27  | 48  | 30  | 31  | 31  | 26  | 26  | 24 | 36 |
| Gastroodpad Thajsko | 22          | 123 | 63  | 37 | 36  | 41  | 34  | 37  | 34  | 36  | 36  | 29 | 41 |
| Kontrola            | 28          | 69  | 42  | 36 | 31  | 84  | 38  | 34  | 37  | 36  | 27  | 29 | 38 |
| FOG + gastroodpad   | 29          | 88  | 77  | 63 | 74  | 103 | 78  | 77  | 87  | 62  | 55  | 54 | 73 |
| FOG                 | 19          | 127 | 130 | 99 | 103 | 37  | 108 | 102 | 117 | 105 | 103 | 80 | 99 |

Tab. č. 20: *Obsah vodíku v bioplynu při testu č. 2, pokračování*

| Den                 | 14          | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22  | 23 | 24 | 25 | 26 |
|---------------------|-------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|
|                     | Vodík [ppm] |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |
| Gastroodpad Thajsko | 12          | 15 | 9  | 13 | 13 | 15 | 20 | 22 | 16  | 9  | 13 | 22 | 25 |
| Gastroodpad ČR      | 37          | 40 | 36 | 34 | 42 | 40 | 48 | 51 | 45  | 44 | 48 | 59 | 54 |
| Gastroodpad Thajsko | 44          | 41 | 45 | 38 | 40 | 45 | 40 | 41 | 44  | 40 | 41 | 42 | 45 |
| Kontrola            | 38          | 37 | 38 | 38 | 14 | 16 | 39 | 38 | 36  | 29 | 34 | 37 | 35 |
| FOG + gastroodpad   | 51          | 52 | 52 | 49 | 58 | 54 | 50 | 62 | 69  | 51 | 51 | 54 | 48 |
| FOG                 | 85          | 84 | 81 | 69 | 78 | 76 | 86 | 91 | 112 | 69 | 70 | 80 | 74 |

**Příloha č. 4**Tab. č. 21: *Konduktivita při testu č. 1*

| Den               | 1                               | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|-------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | $\gamma$ [mS·cm <sup>-1</sup> ] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 21,2                            | 13,7 | 20,4 | 19,7 | 19,5 | 19,0 | 19,5 | 20,1 | 18,0 | 18,0 |
| Sluneč.<br>olej   | 20,9                            | 20,0 | 20,6 | 16,4 | 15,8 | 18,5 | 19,2 | 19,8 | 18,1 | 19,3 |
| Řepkový<br>olej 1 | 20,9                            | 20,6 | 21,2 | 20,6 | 19,3 | 19,2 | 19,9 | 20,0 | 18,3 | 19,8 |
| Kontrola          | 20,6                            | 21,1 | 21,7 | 21,8 | 21,0 | 20,2 | 21,1 | 21,1 | 20,0 | 21,0 |
| Řepkový<br>olej 2 | 20,3                            | 21,0 | 21,2 | 20,7 | 19,8 | 19,4 | 18,5 | 19,1 | 16,2 | 19,2 |
| Motorový<br>olej  | 20,8                            | 20,5 | 20,9 | 20,8 | 20,2 | 20,2 | 19,7 | 19,6 | 17,0 | 20,0 |

Tab. č. 22: *Konduktivita při testu č. 2*

| Den                    | 1                               | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|------------------------|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                        | $\gamma$ [mS·cm <sup>-1</sup> ] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad<br>Thajsko | 19,6                            | 19,9 | 20,4 | 21,1 | 21,9 | 21,3 | 22,2 | 22,2 | 21,2 | 22,3 |
| Gastroodpad<br>ČR      | 19,8                            | 19,5 | 20,2 | 20,5 | 20,7 | 21,7 | 20,3 | 22,0 | 21,4 | 21,9 |
| Gastroodpad<br>Thajsko | 19,4                            | 19,7 | 20,3 | 21,5 | 21,5 | 21,7 | 22,0 | 21,6 | 22,2 | 23,0 |
| Kontrola               | 20,5                            | 19,7 | 20,6 | 21,7 | 21,5 | 21,9 | 21,9 | 22,2 | 22,2 | 22,4 |
| FOG +<br>gastroodpad   | 18,4                            | 19,0 | 19,7 | 20,7 | 20,3 | 21,1 | 22,1 | 21,7 | 22,2 | 22,3 |
| FOG                    | 19,4                            | 19,2 | 20,2 | 20,9 | 21,2 | 20,6 | 21,2 | 21,9 | 21,4 | 22,0 |

## Příloha č. 5

Tab. č. 23: *Oxidačně redukční potenciál při testu č. 1*

| Den               | 1       | 2     | 5     | 8     | 11    | 14    | 17    | 20    | 23    | 26    |
|-------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | eH [mV] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Cukr              | -38,5   | -9,7  | -11,1 | -43,2 | -47,1 | -51,2 | -43,4 | -42,9 | -39,9 | -33,8 |
| Sluneč.<br>olej   | -34,5   | -34,2 | -13,5 | -10,3 | -3,9  | -8,1  | -1,3  | 5,5   | 9,8   | 11,2  |
| Řepkový<br>olej 1 | -35,3   | -33,5 | -15,5 | -8,5  | -5,6  | -10,4 | -4,1  | 3,6   | 4,4   | 12,2  |
| Kontrola          | -34,4   | -33,3 | -35,3 | -29,7 | -27,0 | -59,5 | -34,9 | -29,7 | -29,5 | -23,9 |
| Řepkový<br>olej 2 | -35,3   | -29,5 | -30,3 | -28,6 | -21,9 | -31,9 | -5,1  | -5,6  | -4,5  | -5,5  |
| Motorový<br>olej  | -36,1   | -36,2 | -36,4 | -36,2 | -32,2 | -42,8 | -36,3 | -36,1 | -32,9 | -31,7 |

Tab. č. 24: *Oxidačně redukční potenciál při testu č. 2*

| Den                   | 1       | 2     | 5     | 8     | 11    | 14    | 17    | 20    | 23    | 26    |
|-----------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                       | eH [mV] |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Gastroodp.<br>Thajsko | -34,9   | -21,7 | -34,9 | -55,1 | -56,1 | -57,1 | -49,3 | -60,0 | -33,2 | -31,1 |
| Gastroodp.<br>ČR      | -33,4   | -23,8 | -34,9 | -54,5 | -55,6 | -56,1 | -53,1 | -55,8 | -28,9 | -30,5 |
| Gastroodp.<br>Thajsko | -34,8   | -22,9 | -38,8 | -53,2 | -53,8 | -52,4 | -54,0 | -53,1 | -34,4 | -29,8 |
| Kontrola              | -36,2   | -42,4 | -38,9 | -53,4 | -55,5 | -52,2 | -50,3 | -55,5 | -34,4 | -31,9 |
| FOG +<br>gastroodp.   | -35,5   | -11,7 | -15,1 | -25,8 | -28,9 | -29,7 | -32,2 | -28,2 | 2,5   | 6,6   |
| FOG                   | -36,0   | -16,2 | -14,5 | -25,7 | -29,1 | -26,3 | -27,0 | -22,4 | 6,7   | 9,7   |

**Příloha č. 6**Tab. č. 25: *Vodíkový exponent při testu č. 1*

| Den               | 1      | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|-------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | pH [-] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 7,99   | 7,49 | 7,60 | 8,09 | 8,17 | 8,25 | 8,09 | 8,08 | 8,03 | 7,92 |
| Slunečnicový olej | 7,94   | 7,93 | 7,56 | 7,5  | 7,39 | 7,47 | 7,35 | 7,22 | 7,14 | 7,33 |
| Řepkový olej 1    | 7,95   | 7,92 | 7,60 | 7,45 | 7,42 | 7,51 | 7,40 | 7,25 | 7,24 | 7,11 |
| Kontrola          | 7,94   | 7,91 | 7,96 | 7,84 | 7,80 | 8,41 | 7,94 | 7,85 | 7,84 | 7,74 |
| Řepkový olej 2    | 7,95   | 7,85 | 7,87 | 7,83 | 7,70 | 7,89 | 7,42 | 7,42 | 7,40 | 7,41 |
| Motorový olej     | 7,96   | 7,95 | 7,99 | 7,97 | 7,90 | 8,08 | 7,97 | 7,96 | 7,90 | 7,88 |

Tab. č. 26: *Vodíkový exponent při testu č. 2*

| Den                 | 1      | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|---------------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | pH [-] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad Thajsko | 7,94   | 7,71 | 7,94 | 8,34 | 8,35 | 8,36 | 8,21 | 8,50 | 7,95 | 7,88 |
| Gastroodpad ČR      | 7,92   | 7,75 | 7,94 | 8,27 | 8,31 | 8,31 | 8,26 | 8,38 | 7,84 | 7,86 |
| Gastroodpad Thajsko | 7,94   | 7,73 | 8,01 | 8,25 | 8,27 | 8,26 | 8,29 | 8,27 | 7,84 | 7,85 |
| Kontrola            | 7,97   | 8,08 | 8,02 | 8,27 | 8,31 | 8,25 | 8,22 | 8,31 | 7,93 | 7,89 |
| FOG + gastroodpad   | 7,99   | 7,53 | 7,59 | 7,8  | 7,85 | 7,86 | 7,91 | 7,83 | 7,27 | 7,21 |
| FOG                 | 7,91   | 7,61 | 7,58 | 7,78 | 7,84 | 7,79 | 7,81 | 7,72 | 7,20 | 7,15 |

**Příloha č. 7**Tab. č. 27: *Obsah sušiny při testu č. 1*

| Den               | 1          | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|-------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | Sušina [%] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 3,73       | 4,08 | 4,08 | 3,99 | 3,95 | 3,76 | 3,73 | 2,8  | 5,18 | 5,42 |
| Slunečnicový olej | 3,57       | 5,33 | 5,08 | 5,01 | 4,86 | 4,48 | 3,79 | 4,01 | 3,66 | 3,59 |
| Řepkový olej 1    | 3,53       | 4,05 | 4,68 | 4,60 | 4,57 | 4,26 | 4,25 | 4,30 | 4,20 | 4,20 |
| Kontrola          | 3,58       | 3,57 | 3,59 | 3,44 | 3,49 | 3,02 | 3,17 | 3,34 | 3,30 | 3,90 |
| Řepkový olej 2    | 3,75       | 3,84 | 3,79 | 3,97 | 3,78 | 5,23 | 4,60 | 4,52 | 4,67 | 4,56 |
| Motorový olej     | 3,60       | 4,67 | 5,07 | 4,74 | 5,16 | 5,12 | 4,58 | 4,56 | 4,52 | 4,77 |

Tab. č. 28: *Obsah sušiny při testu č. 2*

| Den                 | 1          | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|---------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | Sušina [%] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad Thajsko | 3,90       | 3,80 | 3,82 | 3,89 | 3,93 | 3,71 | 3,82 | 3,74 | 3,68 | 3,66 |
| Gastroodpad ČR      | 3,78       | 4,20 | 3,91 | 3,86 | 3,65 | 3,99 | 3,60 | 3,62 | 3,65 | 3,65 |
| Gastroodpad Thajsko | 3,69       | 3,88 | 3,68 | 3,67 | 3,62 | 3,67 | 3,54 | 3,59 | 3,51 | 3,68 |
| Kontrola            | 3,63       | 3,65 | 3,77 | 3,59 | 3,58 | 3,55 | 3,56 | 3,54 | 3,50 | 3,50 |
| FOG + gastroodpad   | 3,78       | 4,83 | 4,44 | 4,54 | 4,63 | 4,19 | 3,88 | 4,14 | 4,39 | 4,17 |
| FOG                 | 3,83       | 4,71 | 4,66 | 4,64 | 4,53 | 4,40 | 4,30 | 4,39 | 4,33 | 4,28 |

## Příloha č. 8

Tab. č. 29: Celkový obsah organického uhlíku při testu č. 1

| Den               | 1       | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|-------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                   | TOC [%] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cukr              | 30,2    | 29,6 | 30,6 | 32,5 | 31,3 | 28,9 | 29,6 | 29,5 | 30,9 | 33,8 |
| Slunečnicový olej | 31,0    | 38,5 | 38,6 | 39,3 | 35,0 | 35,0 | 37,2 | 36,7 | 36,5 | 37,2 |
| Řepkový olej 1    | 31,2    | 32,9 | 36,3 | 38,5 | 34,9 | 34,9 | 35,9 | 36,2 | 35,8 | 38,2 |
| Kontrola          | 30,6    | 29,7 | 30,0 | 31,2 | 28,0 | 29,6 | 29,9 | 30,5 | 31,2 | 33,4 |
| Řepkový olej 2    | 31,2    | 30,2 | 30,7 | 31,7 | 29,6 | 33,9 | 38,3 | 39,0 | 39,3 | 40,7 |
| Motorový olej     | 30,8    | 39,1 | 44,1 | 42,2 | 41,0 | 37,8 | 40,8 | 40,7 | 41,2 | 46,3 |

Tab. č. 30: Celkový obsah organického uhlíku při testu č. 2

| Den                 | 1       | 2    | 5    | 8    | 11   | 14   | 17   | 20   | 23   | 26   |
|---------------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                     | TOC [%] |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Gastroodpad Thajsko | 34,1    | 31,1 | 33,2 | 32,5 | 35,1 | 30,1 | 31,8 | 34,9 | 33,7 | 30,1 |
| Gastroodpad ČR      | 34,0    | 32,1 | 33,2 | 32,9 | 35,6 | 30,2 | 31,8 | 36,5 | 34,8 | 30,5 |
| Gastroodpad Thajsko | 34,3    | 31,5 | 34,1 | 32,6 | 36,7 | 32,5 | 32,4 | 36,4 | 35,5 | 31,7 |
| Kontrola            | 34,8    | 33,9 | 31,6 | 31,9 | 35,3 | 30,9 | 32,3 | 35,8 | 34,3 | 33,2 |
| FOG + gastroodpad   | 35,2    | 38,3 | 39,8 | 40,2 | 45,4 | 37,8 | 38,4 | 38,2 | 41,5 | 37,5 |
| FOG                 | 35,8    | 38,5 | 39,7 | 39,7 | 44,1 | 39,1 | 37,7 | 37,3 | 40,6 | 33,7 |