

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ  
AGRONOMICKÁ FAKULTA**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

**BRNO 2015**

**Ing. Martin Haitl**

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

---



**„Kvanti-kvalitativní analýza energetických odrůd  
kukuřice a čiroku při bioplynových transformacích“**  
Disertační práce

*Vedoucí práce:*  
prof. Ing. Bořivoj Groda, DrSc.

*Vypracoval:*  
Ing. Martin Haitl

---

Brno 2015

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval především svému školiteli prof. Ing. Bořivoji Grodovi DrSc. a mému specialistovi doc. Ing. Tomáši Vitězovi PhD., kteří mě mnohokrát inspirovali svými podněty, myšlenkami a cennými radami, s jejichž pomocí jsem mohl pracovat na svém výzkumném záměru. Zvláštní poděkování patří rovněž všem pracovníkům a kolegům z Ústavu zemědělské, potravinářské a environmentální techniky Mendelovy univerzity v Brně, kteří mně byli nápomocni při každodenní práci na experimentální části mé závěrečné práce.

Závěrečná práce byla podpořena projektem TP 9/2011 – Analýza procesu anaerobní fermentace a využití fermentačního zbytku pro hnojení rostlin a projektem TP 5/2010 – Sledování biotechnických parametrů anaerobní fermentace interní grantové agentury Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně. Práce byla rovněž podpořena z finančních prostředků projektu Fondu rozvoje vysokých škol FRVŠ 3042/G1 – Bioplynové transformace tekutých substrátů.

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma: „**Kvanti-kvalitativní analýza energetických odrůd kukuřice a čiroku při bioplynových transformacích**“ vypracoval/a 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 vědom/a, 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: 30. 6. 2015

.....

podpis

# 1 OBSAH

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 1         | Obsah .....   | 5  |
| 2         | Abstrakt.....   | 8  |
| 3         | Úvod.....   | 10 |
| 4         | Literární přehled .....                               | 12 |
| 4.1       | Bioplyn.....  | 12 |
| 4.1.1     | Metan.....  | 12 |
| 4.1.2     | Oxid uhličitý.....                                    | 12 |
| 4.1.3     | Amonné ionty a amoniak.....                           | 13 |
| 4.1.4     | Sírovodík .....                                       | 13 |
| 4.1.5     | Voda .....  | 14 |
| 4.1.6     | Kyslík .....  | 14 |
| 4.1.7     | Vodík .....   | 14 |
| 4.2       | Proces vzniku bioplynu.....                           | 14 |
| 4.2.1     | Hydrolyza.....  | 15 |
| 4.2.2     | Acidogeneze .....                                     | 15 |
| 4.2.3     | Acetogeneze .....                                     | 16 |
| 4.2.4     | Metanogeneze.....                                     | 16 |
| 4.2.5     | Faktory ovlivňující průběh anaerobní fermentace ..... | 17 |
| 4.2.5.1   | Podmínky prostředí .....                              | 17 |
| 4.2.5.1.1 | Teplota.....  | 18 |
| 4.2.5.1.2 | pH.....   | 19 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2.5.1.3 FOS/TAC .....  | 19 |
| 4.2.5.1.4 Tlak v reaktoru .....  | 20 |
| 4.2.5.1.5 Doba zdržení materiálu, zatížení reaktoru org. látkami ..... | 20 |
| 4.2.5.2 Míchání.....   | 22 |
| 4.2.5.3 Specifický povrch substrátu .....                              | 23 |
| 4.2.5.4 Obsah makro a mikroprvků.....                                  | 23 |
| 4.2.5.5 Nižší mastné kyseliny.....                                     | 25 |
| 4.2.5.6 Inhibitory procesu anaerobní fermentace.....                   | 26 |
| 4.2.5.7 Tvorba pěny.....   | 28 |
| 4.2.6 Substráty pro výrobu bioplynu .....                              | 29 |
| 4.2.6.1 Cíleně pěstované plodiny .....                                 | 32 |
| 4.2.6.1.1 Charakteristika čiroku .....                                 | 32 |
| 4.2.6.1.2 Využití travních porostů pro produkci bioplynu.....          | 34 |
| 4.2.6.1.3 Využití GPS pro produkci bioplynu.....                       | 34 |
| 4.2.6.2 Vedlejší produkty a substráty odpadního charakteru .....       | 35 |
| 4.2.6.3 Úprava substrátů pro výrobu bioplynu.....                      | 36 |
| 4.2.6.3.1 Mechanické úpravy .....                                      | 37 |
| 4.2.6.3.2 Fyzikálně-chemické úpravy .....                              | 37 |
| 4.2.6.3.3 Chemické úpravy.....   | 39 |
| 4.2.6.3.4 Biologické úpravy .....                                      | 40 |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.6.3.5 Silážování.....                                       | 40 |
| 4.2.7 Využití bioplynu.....                                     | 41 |
| 4.2.7.1 Kogenerace, trigenerace.....                            | 41 |
| 4.2.7.2 Využití bioplynu v palivových člancích .....            | 43 |
| 4.2.7.3 Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu.....          | 43 |
| 4.2.7.4 Produkce elektrické energie pomocí plynové turbíny..... | 44 |
| 7.2.7.5 Využití fermentačního zbytku.....                       | 45 |
| 5 bioplynové stanice, rozdělení a technologie.....              | 46 |
| 5.1 Zemědělské BPS .....  | 46 |
| 5.2 Čistírenské BPS.....  | 48 |
| 5.3 Ostatní BPS .....   | 48 |
| 5.4 BPS na netekuté substráty.....                              | 48 |
| 6 Cíl práce.....  | 51 |
| 7 Materiál a Metodika.....                                      | 52 |
| 7.1 Testované substráty.....                                    | 52 |
| 7.2 Použité přístroje a vybavení.....                           | 54 |
| 7.3 Metodika testování.....                                     | 55 |
| 8 Výsledky a diskuse .....                                      | 57 |
| 8.1 Výsledky vstupních analýz substrátů.....                    | 57 |
| 8.2 Výsledky testování ročník 2010.....                         | 59 |
| 8.3 Výsledky testování 2011 .....                               | 62 |
| 8.4 Statistické vyhodnocení ročníků 2010–2011 .....             | 68 |
| 8.5 Stanovení plošných výnosů metanu testovaných hybridů .....  | 72 |
| 9 Závěr .....   | 74 |
| 10 Literatura.....  | 75 |
| 11 Seznam obrázků.....  | 84 |
| 12 Seznam tabulek.....  | 84 |
| 13 Seznam grafů .....   | 85 |
| 14 Přílohy.....   | 86 |

## 2 ABSTRAKT

Při současné vysoké intenzitě výroby bioplynu jsou hledány alternativní vstupní substráty o dostatečně vysoké specifické produkci metanu, které by zároveň mohly být zařazeny do osevních postupů k běžně pěstovaným plodinám. Vzhledem k měnícím se klimatickým podmínkám charakteristických nerovnoměrným rozložením srážek a teplot v průběhu vegetace připadá v úvahu použití čiroku, jako alternativní plodiny částečně nahrazující kukuřici. Cílem této práce byla kvantitativně-kvalitativní analýza hybridů kukuřice a čiroku, vyšlechtěných pro použití jako substrátů k produkci bioplynu. Byly zjišťovány mezihybridové a mezidruhové rozdíly ve specifických produkcích metanu, zároveň byly stanoveny produkce metanu jednotlivých hybridů vztažených na jednotku pěstební plochy. V laboratorních fermentačních testech za použití vsázkových fermentorů byla zjištěna nejvyšší specifická i plošná produkce metanu u hybridu kukuřice Atletico  $0,3645 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ org. suš.}$  resp.  $6\,425 \text{ Nm}^3 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ , z hybridů čiroku dosáhl nejlepších výsledků hybrid Freya a to  $0,3476 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ org. suš.}$ , resp.  $4\,252 \text{ Nm}^3 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ . Statisticky významné mezihybridové rozdíly byly zjištěny na hladině spolehlivosti alfa 0,05 mezi hybridy Zerbeus, Cassilas a Fernandez.

Klíčová slova: bioplyn, čirok, kukuřice



## ABSTRACT

Currently by high intensive biogas production is a demand to find an alternative materials with high specific methane production, that can be also added to commonly planted agricultural crops. There is a chance to use sorghum hybrids as an alternative to maize, due to rising climate change and its characteristic of uneven temperatures and rainfall in vegetation period. The aim of the work was to make an quantitative-qualitative analyse of maize and sorghum hybrids breded for biogas production. The focus was to find specific methane production and statistical differences between tested hybrids and species. Obtained results of specific methane production were related to hybrids area dry matter yield. In batch lab fermentation tests achieved highest specific, area methane production maize hybrid Atletico,  $0.3645 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ VS}$  respectively  $6\,425 \text{ Nm}^3 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ , from tested sorghum hybrids best results achieved hybrid Freya  $0.3476 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ VS}$ , respectively  $4\,252 \text{ Nm}^3 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ . There were found statistical significant differences on the significance level alfa 0.05 between hybrids Zerbeus, Cassilas and Fernandez.

Key words: biogas, maize, sorghum

### 3 ÚVOD

S rozvojem lidské společnosti rostou rovněž její energetické požadavky, které jsou v současnosti uspokojovány z velké části energií z fosilních paliv. Omezené zásoby fosilních paliv, jejich vzrůstající cena a poškozování životního prostředí při jejich získávání a zpracování jsou důvody, proč jsou stále více využívány alternativní zdroje energie.

Evropská unie se dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28 jako celek zavázala v roce 2020 pokrýt 20 % své hrubé energetické spotřeby z obnovitelných zdrojů energie (OZE). Ve článku 3 výše uvedeného nařízení je pro ČR stanoven podíl energie z obnovitelných zdrojů v uvedeném roce na 13 %. Omezení energetické závislosti a vznik lokálních zdrojů energie je dalším důvodem rozvoje využívání OZE.

Geografická poloha ČR omezuje využívání energie z větru a slunce, avšak využití sluneční energie formou fotovoltaických článků zaznamenalo v předchozích letech silný rozvoj díky vysoké finanční podpoře státu. Aktuálně k 31. 12. 2014 je v České republice v provozu celkem 554 bioplynových stanic, z čehož je 382 zemědělských, 7 komunálních, 11 průmyslových, 56 skládkových a 98 bioplynových stanic je provozováno v rámci čistíren odpadních vod ([www.czba.cz](http://www.czba.cz)). Podíl bioplynu na obnovitelných zdrojích energie byl v roce 2014 24,6 %, podíl bioplynu na celkové výrobě byl v uvedeném roce 2,8 % ([www.czba.cz](http://www.czba.cz)).

Bioplyn vzniká anaerobní fermentací organických materiálů. Vzniklý bioplyn má řadu využití, nejčastěji je spalován v kogenerační jednotce (KJ), kdy energie v něm obsažená je přeměna na energii elektrickou a tepelnou. Dalšími možnostmi využití bioplynu je jeho vyčištění na kvalitu zemního plynu tzv. biometan, či využití jeho kapalné formy k pohonu dopravních prostředků (Mrůzek 2011). Výroba bioplynu je ve srovnání s fotovoltaickými a větrnými elektrárnami stabilní, BPS pracují v takřka nepřetržitém celoročním provozu. Nemalou roli hraje i návaznost na zemědělskou rostlinnou a živočišnou prvovýrobu, její stabilizaci a zaměstnanost obyvatel venkova.

K dosažení stabilní produkce bioplynu na BPS je potřeba zajistit dostatečné množství kvalitních vstupních substrátů. Nejvíce využívanými substráty jsou kejda a hnůj hospodářských zvířat v kofermentaci se silážní kukuřicí. Pro výrobu kvalitního bioplynu o vysokém obsahu metanu jsou požadovány jiné kvalitativní požadavky na

siláž než při jejím krmivářském využití, prioritní je zde zejména obsah sušiny. Proto je věnováno úsilí na šlechtění nových energetických hybridů nejen kukuřice pro jejich následné energetické využití. Energetické hybridy kukuřice dnes běžně dosahují výnosů sušiny 20 t z hektaru a při jejich vysokých specifických produkcích metanu lze získat přibližně 6 000 m<sup>3</sup> metanu z hektaru. Mezi další perspektivní plodiny pro výrobu bioplynu patří čirok. Čirok vzhledem ke svým vlastnostem může v některých oblastech nahradit kukuřici. Ve srovnání s kukuřicí má čirok větší toleranci k nedostatku vláhy (Habyarimana et al. 2004) a zároveň díky jeho rozvinutějšímu kořenovému systému dochází k nižšímu eroznímu ohrožení půd, při zachování vysokých hektarových výnosů sušiny.

Tato práce je věnována ověření kvalitativních vlastností nových energetických hybridů kukuřice a čiroku, vyšlechtěných k výrobě bioplynu. Laboratorními testy, byly stanoveny specifické produkce bioplynu respektive metanu jednotlivých hybridů.

## 4 LITERÁRNÍ PŘEHLED

### 4.1 Bioplyn

Bioplyn je směsný plyn, jehož majoritními složkami jsou  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ , dále je v něm minoritní obsah  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$  a vodní páry. Podíl zastoupení jednotlivých složek v bioplynu je odvislý od složení vstupního materiálu (Tab. 1).

Tab. 1: Složení bioplynu (Kaltschmitt a Hartmann, 2001)

| Složka                         | Obsah                  |
|--------------------------------|------------------------|
| Metan $\text{CH}_4$            | 45–75 %                |
| Oxid uhličitý $\text{CO}_2$    | 25–55 %                |
| Voda $\text{H}_2\text{O}$      | 2 (20 °C) až 7 (40 °C) |
| Sírovodík $\text{H}_2\text{S}$ | 20 až 20 000 ppm (2 %) |
| Dusík $\text{N}_2$             | < 5 %                  |
| Kyslík $\text{O}_2$            | < 3 %                  |
| Vodík $\text{H}_2$             | < 1 %                  |

#### 4.1.1 Metan

Metan je výhřevnou složkou bioplynu o výhřevnosti  $36 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ . Metan je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Výše jeho obsahu odráží kvalitu vzniklého bioplynu a proto je snaha dosahovat vysokých obsahů a produkci metanu. Metan je skleníkovým plynem, má 58krát vyšší skleníkový efekt ve srovnání s oxidem uhličitým. Zpracováním organických materiálů v bioplynových stanicích a následným spalováním metanu má za následek snižování jeho emisí (Krieg et al. 1995).

#### 4.1.2 Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je ve vodě rozpustný plyn, podílí se na vzniku hydrogenuhličitanového pufracího systému významného pro stabilitu fermentačního procesu (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2010). Vysoké produkce oxidu uhličitého v počátečních fázích anaerobní fermentace a jeho následný zvýšený obsah v substrátu často způsobují pění (Gerardi 2003).

### 4.1.3 Amonné ionty a amoniak

Vznikají rozkladem dusíkatých látek, zejména bílkovin. Jejich obsah je v přibližné rovnováze při pH 7,2. S rostoucím pH roste obsah amoniaku a klesá obsah amonných iontů (Gerardi 2003). Amonné ionty jsou využívány anaerobními mikroorganismy pro získání dusíku jako stavební složky buněčných těl, amoniak je toxický. Zvýšené koncentrace amoniaku jsou toxické, brání odbourávání nižších mastných kyselin, zejména kyseliny propionové a máselné, jež se následně hromadí v systému. Zvýšené koncentrace mastných kyselin způsobují pokles produkce metanu. Při volbě vstupních surovin je tedy nutné regulovat přísun na dusík bohatých látek a dodržovat optimální poměr C:N.

### 4.1.4 Sirovodík

Jedním z dalších nežádoucích plynů obsažených v bioplynu je sirovodík. Sirovodík zapáchá po zkažených vejcích, má silně korozivní účinky. Při jeho zvýšených koncentracích dochází ke značným škodám na technologických částech bioplynové stanice, zejména na KJ, u které dochází ke zkracování intervalů výměny motorového oleje. Hrozí ovšem nebezpečí vážnějšího poškození KJ, kdy může dojít až k zadření motoru. V současnosti jsou již k dispozici řešení pro odstranění sirovodíku z bioplynu. První způsob je vhánění vzduchu do plynového prostoru reaktoru (biologické odsíření), kdy množství vzduchu je dáno dle stechiometrické rovnice (1):



Následně dojde k vysrážení síry na sítích v prostoru reaktoru a obsah sirovodíku v bioplynu je snížen (Bischofsberger et al. 2005). Použití filtrů tvořených zejména aktivním uhlím, vápennými solemi je často druhým stupněm odstranění sirovodíku z bioplynu, jejich provoz je ovšem finančně náročnější z důvodu jejich stárnutí a potřeby výměny. Zvýšené obsahy sirovodíku ve vzduchu jsou zdraví škodlivé a koncentrace vyšší než 1000 ppm mohou být smrtelné (Kaltschmitt a Hartmann 2001). Sirovodík má rovněž inhibiční vliv na metanogenní mikroorganismy. Při zvýšených obsazích síry ve fermentované směsi dochází k nepřístupnosti významných mikroprvků, které jsou vázány v sulfidech.

#### 4.1.5 Voda

Voda je minoritní složkou bioplynu, vyskytující se v bioplynu ve formě par. Obsah vodních par je přímo úměrně závislý na teplotě. Při následném ochlazení vzniká kondenzát, s korozivními účinky na technologické části BPS, množství kondenzátu roste s tlakem (Kaltschmitt a Hartmann 2001). Je nutné odstranit kondenzát z plynového vedení, aby se předešlo poškození plynového vedení a KJ.

#### 4.1.6 Kyslík

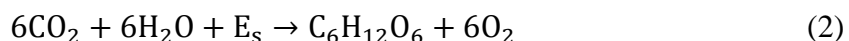
Zvýšený obsah kyslíku v bioplynu je přípustný pouze v počátečních fázích procesu anaerobní fermentace. V těchto fázích se uplatňují fakultativně anaerobní bakterie a výskyt kyslíku v prostředí není pro ně inhibující. Metanogenní archae jsou však striktně anaerobní a inhibiční účinek se u nich projevuje od koncentrací  $0,1 \text{ mg O}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ , malé množství vzduchu, které se dostane do prostoru reaktoru odsiřováním, nemá na metanogeny inhibiční účinek (Deublein a Steinhauser 2008).

#### 4.1.7 Vodík

Obsah elementárního vodíku v bioplynu je prekursorem stability fermentačního procesu. Zvýšené koncentrace odráží jeho hromadění v systému, namísto spotřeby pro vznik metanu, což ukazuje na nestabilitu fermentačního procesu. Tento jev může nastat v důsledku předávkování organickými látkami nebo náhlými změnami procesních podmínek. Koncentrace volného vodíku by měly být na co nejnižší úrovni.

### 4.2 Proces vzniku bioplynu

Bioplyn je produktem anaerobního fermentačního procesu. Anaerobní fermentace je samovolný přírodní proces, během něhož jsou rozkládány organické látky za nepřístupu vzduchu. Rostlinná biomasa vzniká přeměnou sluneční energie procesem fotosyntézy, dle níže zjednodušená rovnice (2):



Produkty fotosyntézy jsou dále metabolismem rostlin přeměněny na sekundární produkty:

Sacharidy            škrob, insulin, celulóza, cukr, pektin

|           |  |
|-----------|--|
| Tuky      | tuk, mastné kyseliny, olej, fosfáty, vosky, karoten              |
| Bílkoviny | nukleotidy, fosfolipidy  |
| Ostatní   | vitamíny, enzymy, toxiny, pryskyřice, esenciální mastné kyseliny |

Anaerobní fermentační proces tvoří čtyři fáze:

- Hydrolýza
- Acidogeneze
- Acetogeneze
- Metanogeneze

#### 4.2.1 Hydrolýza

V této první fázi dochází k rozkladu polymerních materiálů (polysacharidy, tuky, bílkoviny na mono- nebo oligomery). Rozkladem složitých cukrů dochází převážně ke vzniku jednoduchých cukrů například glukózy, z bílkovin vznikají převážně peptidy a aminokyseliny a z tuků převážně vysokomolekulární mastné kyseliny jako je glycerin (Bischofsberger et al. 2005). Na rozkladu polymerních látek se podílejí extracelulární enzymy celulóza, celobiáza, xylanáza, amyláza, lipáza a proteáza (Weiland 2010).

Rychlost a stupeň hydrolýzy materiálů je různý. Z cukrů jsou dobře hydrolyzovatelné hemicelulóza a celulóza, hůře pektiny a škrob vyžadující delší časové období, lignin je téměř nehydrolyzovatelný. Stupeň hydrolýzy bílkovin je nižší než u cukrů a často nižší ve srovnání s tuky, u kterých je nutné zajistit jejich emulgaci tak, aby mohl působit enzym lipáza. Tuky jsou plně, ale pomalu hydrolyzovatelné při teplotách vyšších než 20 °C (Bischofsberger et al. 2005). Hydrolýza se stává limitujícím faktorem anaerobní fermentace v případě, pokud do ní vstupují těžko rozložitelné materiály (Gerardi 2003).

#### 4.2.2 Acidogeneze

Acidogeneze navazuje na hydrolýzu, účastní se jí fakultativně anaerobní a obligátně anaerobní kyselinotvorné bakterie a jsou v ní dále rozkládány meziprodukty hydrolýzy na nižší mastné kyseliny, oxid uhličitý a vodík. Dále dochází ke vzniku alkoholů a kyseliny mléčné (Institut für Energetik und Umwelt gGmbH Leipzig 2004). Bakterie podílející se na acidogenezi jsou charakterizovány značnou tolerancí k nízkým hodnotám pH.

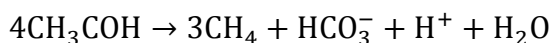
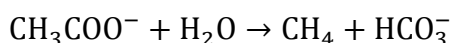
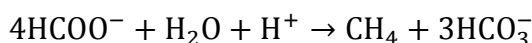
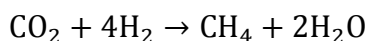
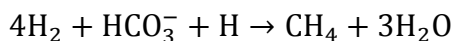
### 4.2.3 Acetogeneze

V této fázi jak její název napovídá, vzniká ve velké míře kyselina octová, dále elementární vodík a oxid uhličitý. Bakterie podílející se na acetogenezi musí být v symbióze s metanogenními bakteriemi odebírajících vodík z prostředí. K tomu aby mohla efektivně probíhat acetogeneze, je nutný nízký parciální tlak vodíku v prostředí,  $< 10^{-4}$  atm. Při vysokém parciálním tlaku vodíku je inhibována oxidace kyseliny máselné, kapronové, propionové, valerové a klesá produkce kyseliny octové, oxidu uhličitého a vodíku.

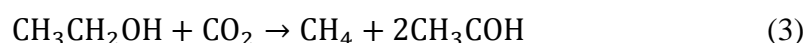
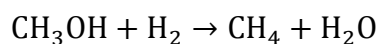
Acetogenní mikroorganismy mají dlouhou generační dobu. Tato fáze velmi často silně ovlivňuje rychlost fermentačního procesu a finální stupeň rozkladu materiálu. Acetogenní mikroorganismy dosahují 2–4krát nižší míry přeměny substrátu, při současně výrazně delší generační době ve srovnání s hydrogenotrofními metanogeny (Bischofsberger et al. 2005). Množství a kvalita vzniklého bioplynu vypovídá o aktivitě acetogenních bakterií (Deublein a Steinhauser 2008). Typickými zástupci acetogenních bakterií jsou *Acetobacterium woodii* a *Clostridium aceticum*.

### 4.2.4 Metanogeneze

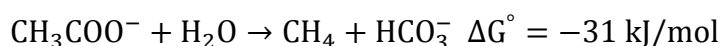
Je poslední fází anaerobní fermentace, produktem je bioplyn, jehož majoritními složkami jsou metan a oxid uhličitý. Striktně anaerobní metanogenní mikroorganismy podílející se na metanogenezi náleží do říše *Archae* a patří k nejstarším organismům na Zemi. Jedná se o početnou skupinu, je známo více než 50 druhů metanogenů. Na rozdíl od *Eubacterií* nemají buněčnou stěnu tvořenou mureinem, mají rovněž jinou skladbu cytoplasmatické membrány. Obsahují specifické koenzymy M a nikl obsahující koenzymy F<sub>420</sub> a F<sub>430</sub>. Koenzym M slouží k redukci oxidu uhličitého na metan a nikl obsahující koenzymy jsou významné přenašeče vodíku (Gerardi 2003). Metan může vznikat z kyseliny octové, kyseliny mravenčí, methanolu, methyleny nebo oxidu uhličitého a vodíku (3):







Téměř všechny druhy metanogenů jsou schopny přeměnit vodík a oxid uhličitý na metan, ovšem velmi omezené množství dokáže přeměnit metanol a kyselinu octovou na metan (Bischofsberger et al. 2005). Z celkového množství vzniklého metanu pochází 1/3 z činnosti hydrogenotrofních a 2/3 acetotrofních metanogenů, ačkoli energetická bilance vzniku metanu z vodíku je příznivější než z kyseliny octové, rovnice (4):



Tento nepoměr je zapříčiněn nedostatkem volného vodíku ve fermentovaném materiálu (Gerardi 2003).

Majoritně se vyskytující acetotrofové jsou *Methanosarcina*, *Methanothrix*, dále zde patří: *Metanococcus mazei*, *Methanobacterium soehngeni*, *Methanobacterium thermoautrophicum*, *Methanobacterium formicium* a *Methanobrevibacter arboriphilus* jsou nejčastěji se vyskytující metanogeny v anaerobních reaktorech (Gerardi 2003).

## 4.2.5 Faktory ovlivňující průběh anaerobní fermentace

### 4.2.5.1 Podmínky prostředí

Optimální průběh anaerobní fermentace vyžaduje stabilní podmínky. Při náhlých změnách teploty, množství a kvality vstupních materiálů dochází k poklesu produkce bioplynu a systém se na nové podmínky stabilizuje minimálně tři týdny (Deublein a Steinhauser 2008)

Obecně je nutné splnit následující požadavky pro průběh anaerobní fermentace:

- Vlhkost materiálu vyšší než 50 %
- Zamezení přístupu světla
- Zamezení přístupu vzduchu
- pH 6–8 v závislosti na fázi fermentačního procesu
- Stálá teplota

V jednotlivých fázích anaerobní fermentace jsou zastoupeny různorodé mikroorganismy s odlišnými požadavky pro svůj růst a metabolickou činnost. Hydrolyzující a acidogenní mikroorganismy mají jiné požadavky, než acetogenní a

metanogenní mikroorganismy (Tab. 2). V praxi se proto velmi často uplatňují vícestupňové fermentační technologie, za účelem co nejefektivnějšího využití vstupních materiálů a produkce bioplynu. Zároveň je potřeba zajistit, aby všechny fáze probíhaly vyrovnaně. Při rychlém průběhu hydrolýzy a acidogeneze dochází k hromadění nižších mastných kyselin (NMK) v systému, poklesu pH, spojených s inhibicí metanogeneze. Při rychlé acetogenezi a metanogenezi je naopak limitujícím faktorem přísun hydrolyzovatelných materiálů.

Tab. 2: Požadavky na procesní podmínky jednotlivých fází anaerobní fermentace (Bischofsberger et al. 2005)

| Parametr        | Hydrolýza/acidogeneze | Acetogeneze/metanogeneze                  |
|-----------------|-----------------------|---|
| Teplota         | 25–35 °C              | Mezofilní 32–42 °C<br>Termofilní 45–58 °C |
| pH              | 5,2–6,3               | 7,5–8,2                                   |
| C:N             | 10–45:1               | 20–30:1                                   |
| Obsah sušiny    | < 40 % sušiny         | < 30 % sušiny                             |
| Redox potenciál | 400–(-300) mV         | < -250 mV                                 |
| C:N:P           | 500:15:5–3            | 600:15:5–3                                |
| Stopové prvky   |                       | Ni, Co, Mo, Se                            |

#### 4.2.5.1.1 Teplota

Teplota patří k hlavním parametrům ovlivňujících proces tvorby bioplynu. Podle její výše jej rozlišujeme fermentační proces:

- Psychrofilní 25 °C <
- Mezofilní 32–42 °C
- Termofilní 48–58 °C

V praxi jsou provozovány zařízení v mezofilním nebo termofilním teplotním režimu z důvodu nízké intenzity psychrofilního procesu, u kterého je potřebná doba zdržení materiálu velmi dlouhá, při současně nízkých výnosech bioplynu. Termofilní proces je ve srovnání s mezofilním intenzivnější, rychlejší růst bakterií dovoluje vyšší zatížení reaktoru a kratší dobu zdržení materiálu. Na druhou stranu je mezofilní proces stabilnější, jelikož většina metanogenů je mezofilních a adaptace na změny prostředí je

u něj rychlejší. Změny teploty vyšší než  $\pm 3$  °C za den vedou u mezofilního procesu k omezení produkce bioplynu, u termofilního procesu se změny teploty vyšší než 1 °C za den projeví silně inhibičně (Weiland 2010, Deublein a Steinhauser 2008, Gerardi 2003). Termofilní proces je vhodný pro zařízení zpracovávající odpadní materiál, zvláště s vysokým obsahem tuků. Při vyšších teplotách je dosaženo vyššího hygienizačního účinku a rychlejšího rozkladu tuků (Deublein a Steinhauser 2008). Teplota má také vliv na uvolnění CO<sub>2</sub> do vody. S rostoucí teplotou je méně CO<sub>2</sub> rozpuštěno do vody a jeho podíl v bioplynu roste.

#### **4.2.5.1.2 pH**

Metan vzniká v poměrně úzkém intervalu pH 6,5–8,5 s optimem 7,0–8,0. Pokud je hodnota pH nižší než 6 nebo vyšší než 8,5, je proces inhibován (Weiland 2010). Na pH má vliv obsah NMK, CO<sub>2</sub>, –NH<sub>2</sub> a NH<sub>3</sub>. Zatímco během tvorby NMK, především v acidogenní fázi dochází k poklesu pH, při zvýšených koncentracích –NH<sub>2</sub> a NH<sub>3</sub> v metanogenní fázi, pH roste. Amonné ionty se do systému uvolňují při rozkladu bílkovin a oxid uhličitý je v rovnováze s ostatními zásadami (Gerardi 2003). Dynamika alkalické reakce je charakterizována poklesem pH v počátcích procesu s následným zvýšením pH způsobené spotřebou NMK a uvolněním –NH<sub>2</sub> a NH<sub>3</sub>.

U pH se uplatňují přirozené pufrční vlastnosti a změny v koncentracích NMK či amonných iontů se nemusí okamžitě projevit jeho poklesem. V těchto případech není pH reprezentativní parametr stavu fermentovaného materiálu. Narušení této rovnováhy bývá způsobeno náhlými změnami procesních podmínek, změnami v množství a skladbě vstupního materiálu, vysokém zatížení organickými látkami a krátkou dobou zdržení materiálu ve fermentoru.

#### **4.2.5.1.3 FOS/TAC**

Jak bylo výše uvedeno, nepředstavuje hodnota pH parametr vždy objektivně charakterizující stav fermentovaného materiálu. Parametr FOS/TAC je poměr sumy obsahu nižších organických kyselin vyjádřených ekvivalentem kyseliny octové a uhličitánové pufrční kapacity. Vyjadřuje tzv. nakrmení fermentoru. Stanovení FOS/TAC je jednoduché a nenáročné na přístrojové vybavení. Provozovatel tak může snadno a okamžitě zjistit stav biologie fermentačního procesu. Metoda je založena na

titraci zfiltrovaného vzorku 0,1 N kyselinou sírovou do hodnot pH 5 a 4,4. Optimální hodnota tohoto parametru není jednoznačně stanovená a je v rozmezí 0,2–0,45. Nejdůležitější a nejvyužitelnější poskytnutou informací je zjištění trendu hodnoty FOS/TAC. Při jejím růstu dochází k předávkování, při jejím poklesu je dávkování na nízké úrovni (Voß et al. 2009).

#### **4.2.5.1.4 Tlak v reaktoru**

S rostoucím tlakem se zvyšuje množství CO<sub>2</sub> uvolněného do vody a tím dochází k nárůstu obsahu metanu v bioplynu. Odstranění materiálu ze dna fermentoru obsahujícího CO<sub>2</sub>, je jedním ze způsobů zvýšení kvality bioplynu (Kaltschmitt a Hartmann 2001).

#### **4.2.5.1.5 Doba zdržení materiálu, zatížení reaktoru org. látkami**

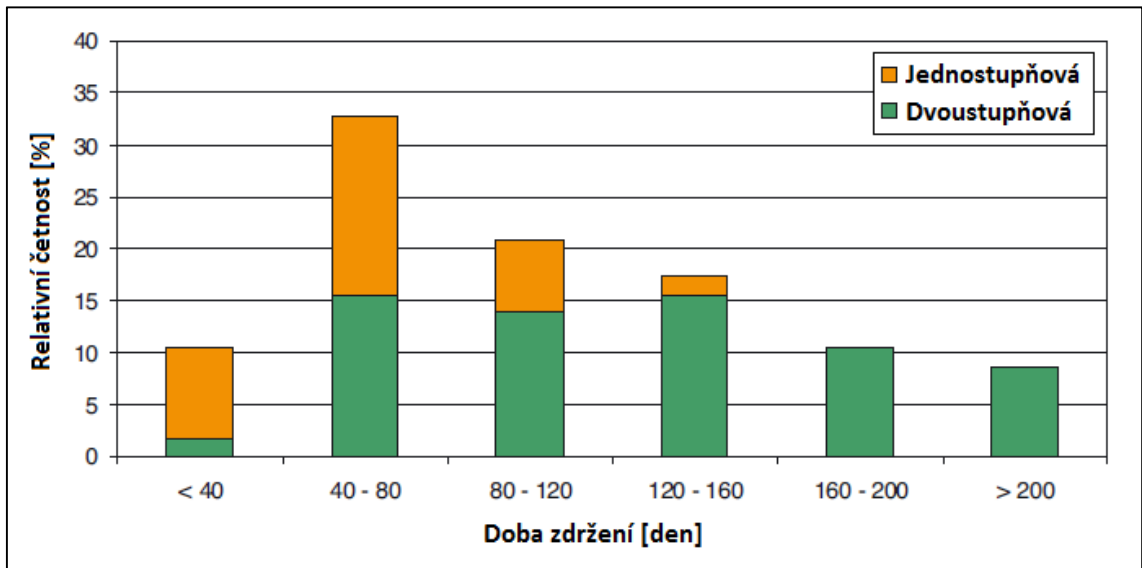
Doba zdržení materiálu (HRT) udává dobu jeho setrvání v reaktoru:

$$\text{HRT} = V_R/V_M [\text{den}]$$

$V_R$ .... objem reaktoru

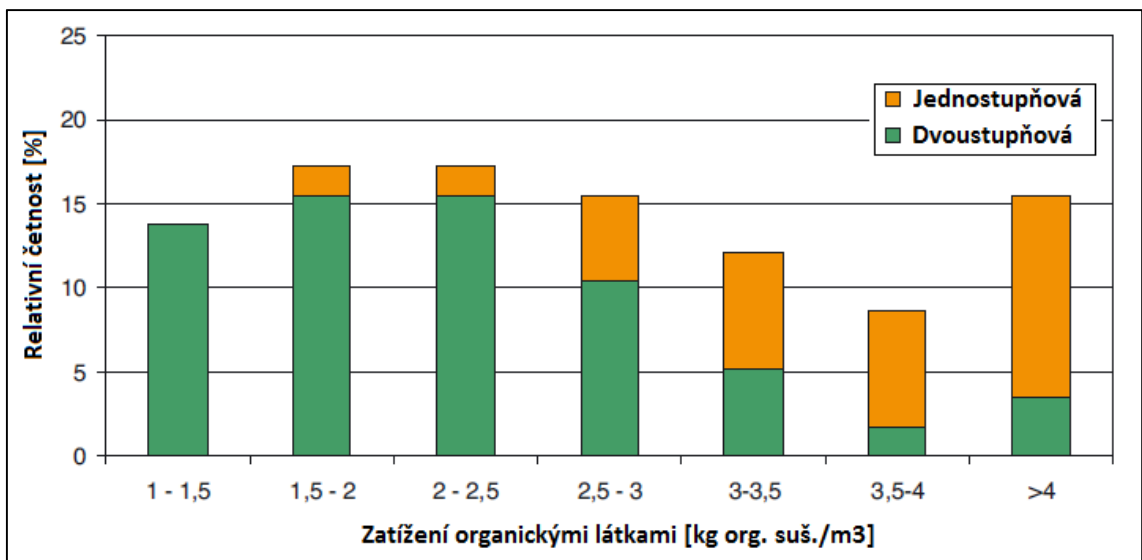
$V_M$ ....objem denní dávky substrátu

HRT musí být zvoleno tak, aby nebylo větší množství metanogenních mikroorganismů z reaktoru odstraněno s výstupním materiálem, než které stačilo po tuto dobu narůst, případně bylo dodáno v novém substrátu (Kaltschmitt a Hartmann 2001). Aby nedocházelo k nadměrnému vyplavování metanogenních mikroorganismů, je zapotřebí minimální HRT v rozmezí 10–15 dní (Deublein a Steinhauser 2008). Doba zdržení je kratší u termofilních procesů, u nichž je rychlejší růst metanogenní biomasy. Proto může být termofilní proces efektivně provozován při vysokém organickém zatížení a kratším HRT ve srovnání s mezofilním procesem (Weiland 2010). Délka doby zdržení má vliv na stupeň rozkladu substrátu. Z ekonomického hlediska je nejvhodnější HRT odpovídající odstranění  $\frac{3}{4}$  obsahu CHSK (Kaltschmitt a Hartmann 2001). U jednostupňových BPS je dosahováno kratší doby zdržení ve srovnání s dvoustupňovými BPS (Graf 1).



Graf 1: Doba zdržení materiálu v BPS (Heinrich 2009)

Zatížení organickými látkami (OLR) vyjadřuje denně dodané množství organických látek (organické sušiny) vztahených na aktivní prostor reaktoru. Zatížení organickými látkami je ve vztahu s dobou zdržení materiálu v reaktoru, s rostoucí dobou zdržení klesá organické zatížení a naopak. U jednostupňových technologií je vyšší zatížení organickými látkami z důvodů kratší doby zdržení materiálu (Graf 2).

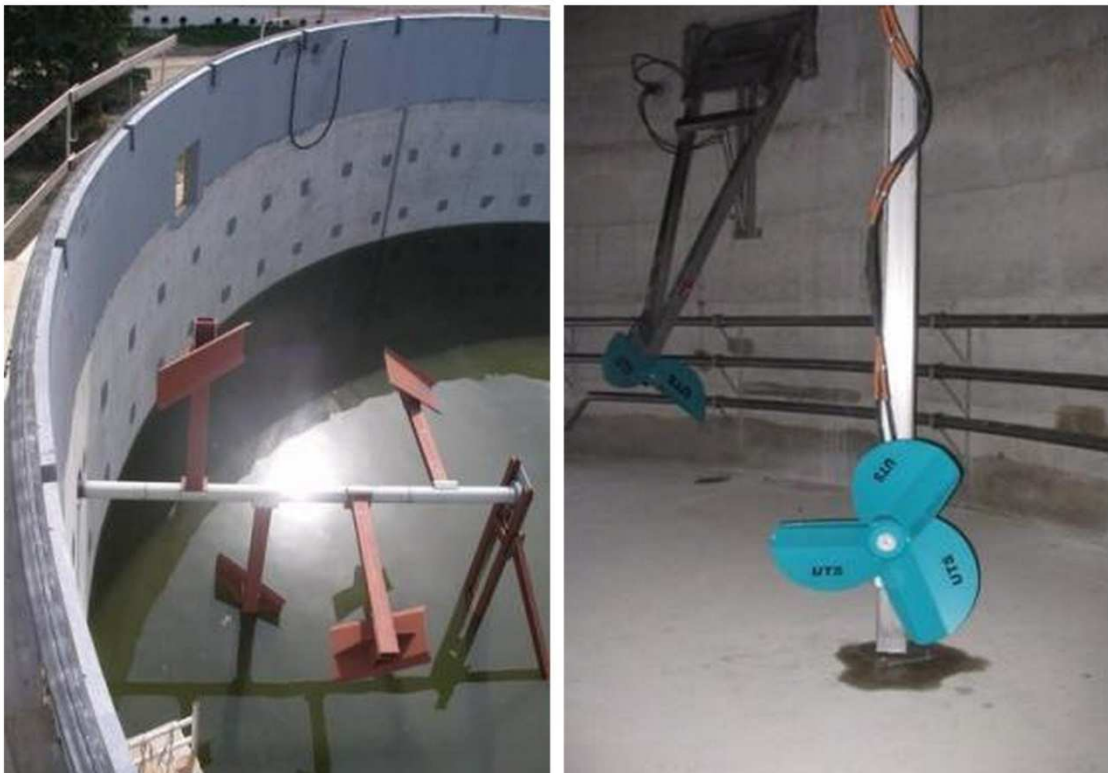


Graf 2: Zatížení reaktoru organickými látkami (Heinrich 2009)

#### 4.2.5.2 Míchání

Míchání fermentovaného materiálu v reaktoru je důležité, zajišťuje teplotní a strukturní homogenitu rozložení pevných částic, omezuje tvorbu pěny a usazenin snižujících aktivní pracovní prostor reaktoru. Míchání je významné pro rychle naočkování čerstvého materiálu. Vstupní materiál je takto rychle vystaven působení metanogenních mikroorganismů a plně využit při plynulém průběhu fermentačního procesu. Míchání můžeme rozdělit z hlediska frekvence na kontinuální a diskontinuální. Z ekonomických důvodů se využívá diskontinuální míchání. Míchání v délce 1–3 hodiny 3–6krát denně je odpovídající alternativou ke kontinuálnímu míchání (Gerardi 2003). Míchání lze provádět hydraulicky nebo mechanicky. Hydraulické míchání zajišťuje obvykle centrální čerpadlo sloužící rovněž k čerpání vstupního a výstupního materiálu. Výhodou je absence pohyblivých částí v prostoru fermentoru, naopak nevýhodou je omezení využití na substráty o nízkém obsahu sušiny (Schulz 2004).

K mechanickému míchání se nejčastěji používají pomaloběžná pádlová a rychloběžná vrtulová míchadla (Obr. 1).



Obr. 1: Pomaloběžné míchadlo (vlevo), rychloběžné míchadlo (vpravo) ([www.bioplyncs.cz](http://www.bioplyncs.cz), [www.biom.cz](http://www.biom.cz))

Metanogenní archae jsou velmi citlivé na intenzivní míchání a z tohoto důvodu se doporučuje používání pomaloběžných před rychloběžnými čerpadly (Gerardi 2003). Rovněž zajištění kontaktu a rovnováhy mezi acetogenními a metanogenními mikroorganismy upřednostňuje pomaloběžná míchadla (Deublein a Steinhauser 2008). Výše uvedené výhody spolu s nižší spotřebou energie vedly k rozšíření pomaloběžných míchadel. Tato míchadla lze využít u substrátů o sušině až 20 % (Schulz 2004).

#### **4.2.5.3 Specifický povrch substrátu**

Velikost specifického povrchu substrátu ovlivňuje rychlost fermentačního procesu. S rostoucím povrchem je substrát lépe přístupný anaerobním mikroorganismům a fermentační proces probíhá rychleji. Specifický povrch je možné zvýšit mletím a řezáním. Při sklizni silážovaného materiálu je vhodné jeho řezání na krátko. U krátké řezanky se při dusání materiálu v silážním žlabu snáze dosáhne anaerobních podmínek nutných pro průběh silážovacího procesu. Při krátké řezance není nutná dodatečná úprava specifického povrchu před použitím v BPS.

#### **4.2.5.4 Obsah makro a mikroprvků**

Mikrobiální biomasa potřebuje ke svému růstu přísun makro a mikro živin. Z důvodu nízkého růstu anaerobní biomasy jsou požadavky na množství dodaných živin nízké. Potřeba stopových prvků je velmi nízká, v rozmezí 0,05–0,06 mg/l, vyšší jsou pouze na obsah železa a to v rozmezí 1–10 mg/l (Bischoff 2009).

Vhodný poměr základních živin ovlivňujících anaerobní fermentaci C:N:P:S, je v literatuře uváděn: 500–800:15:5:1 (Weiland 2000, Gerardi 2003, Schulz 2004). Důležité je dodržení správného poměru C:N. V případě úzkého poměru těchto dvou prvků dochází k akumulaci amonných iontů, při širokém poměru k nedostatku dusíku pro tvorbu proteinu anaerobní biomasy. Požadovaného poměru lze docílit úpravou směsi vstupních materiálů. Jednou z možností je dávkování na dusík bohatého drůbežího trusu, látek tukové povahy nebo smíchání s posklizňovými zbytky obsahujícími vysoké procento organického uhlíku.

Metanogenní archae využívají specifické enzymy obsahující mikroprvky jako Co, Fe, Ni, Mo, Se, S a W. Na rozdíl od ostatních mikroorganismů podílejících se na procesu anaerobní fermentace vyžadují přísun těchto mikroprvků. Metanogenní archae

využívají extracelulárního slizu k transportu mikroprvků přes buněčnou stěnu (Gerardi 2003). Výše uvedené mikroprvky jsou obsaženy v řadě enzymů účastnících se acidogenní a metanogenní fáze fermentačního procesu, proto je jejich přítomnost a využitelnost významná pro aktivitu metanogenů (Zandvoort et al. 2006).

Exkrementy hospodářských zvířat jsou významným zdrojem stopových prvků a je vhodná jejich kofermentace s rostlinnou biomasou za účelem zlepšení procesních podmínek a vyšší produkce metanu. V případě monofermentace rostlinné biomasy je nutný přídavek stopových prvků, k dosažení stabilních procesních podmínek (Kube et al. 2008, Abdoun a Weiland 2009, Jarvis et al. 1997).

Jako zdroj mikroprvků je možné použít extrakt droždí obsahující značné množství aminokyselin, minerálů, vitamínů B a kyseliny listové v dávce  $1,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (Gerardi 2003). Rovněž přidáním popela dřevní biomasy obsahujícího široké spektrum stopových prvků k fermentované směsi kukuřičné siláže a prasečí kejdy, byl zjištěn pozitivní vliv na produkci bioplynu (Haitl et al. 2011). Níže je popsán význam vybraných mikroprvků:

#### Kobalt

Je aktivátorem enzymatického systému metanogenních archae, zvyšuje přeměnu kyseliny octové na metan.

#### Železo

I přes jeho vysoký výskyt v prostředí, nejsou často požadavky metanogenů na jeho přísun splněny z důvodu jeho omezeného výskytu v rozpustné formě. Stejně jako kobalt má pozitivní vliv na přeměnu kyseliny octové. Sloučeniny složené z dvoj- a trojmocných kationtů železa jsou využívány při odsiřování bioplynu jejich přidávkem do fermentované směsi.

#### Nikl

Metanogenní archae vyžadují přítomnost niklu v prostředí. Jimi produkováný enzym  $F_{430}$  obsahuje právě nikl. Dlouho byl obsah tohoto prvku přehlížen, avšak jeho nedostatek způsobuje snížení produkce metanu, v důsledku nízké intenzity přeměny kyseliny octové na metan.

#### Síra

Síru přijímají metanogenní mikroorganismy převážně ve formě sulfidu ( $\text{HS}^-$ ). Jeho zvýšené koncentrace a především vysoké koncentrace nerozpustné formy sirovodíku



(H<sub>2</sub>S) mají inhibiční účinky na metabolickou aktivitu mikroorganismů. Hydrogenotrofní metanogenové jsou více vnímaví na obsah sirovodíku ve srovnání s acetotrofními metanogeny. Zdrojem síry jsou aminokyseliny obsahující síru. Síra tvoří 2,5 % hmotnosti sušiny metanogenů a její obsah je o 50 % vyšší ve srovnání s obsahem fosforu (Gerardi 2003).

Selen, Molybden, Wolfram

Účinek Se, Mo a W není zcela jasný a pouze několik málo metanogenů vyžaduje tyto stopové prvky ke svému růstu (Weiland 2000).

Účinek obsahu a případného přídatku mikroprvků se v provedených vědeckých pokusech projevil při jejich kombinované aplikaci. Zvýšený účinek byl zjištěn zejména u aplikace kombinované aplikace: Fe, Co, Ni, Se (Patidar et al. 2008, Gustavsson 2012, Oleszkiewicz et al. 1990, Takashima et al. 1990)

Pokud jsou mikroprvky přidávány do fermentované směsi za účelem zvýšení produkce bioplynu, je vždy nutné k tomuto přistupovat obezřetně, jelikož jsou mezi nimi zastoupeny těžké kovy. Jejich obsahy v půdě jsou limitovány dle zákona o hnojivech a každý provozovatel by se měl vyvarovat přílišnému zatížení půd těmito kovy pro udržení jejich dobrého zdravotního stavu a úrodnosti.

#### **4.2.5.5 Nižší mastné kyseliny**

Nižší mastné kyseliny (C<sub>2</sub>–C<sub>5</sub>) vznikající rozkladem organických látek se můžou v důsledku nestability fermentačního procesu hromadit v systému a způsobit inhibici metanogenní fáze. Jak již bylo výše uvedeno, toto narušení rovnováhy jednotlivých fází procesu se nemusí v důsledku pufrací kapacity systému projevit snížením pH. V případě poklesu produkce bioplynu je potřeba hledat jiný kvalitativní parametr. Právě koncentrace NMK vypovídá o okamžitém stavu fermentovaného materiálu. Koncentraci NMK lze stanovit sumárně titrací nebo jednotlivě pomocí chromatografické analýzy či kapilární izotachografie.

Koncentrace NMK by měly být na nízké úrovni s výjimkou kyseliny octové, která má nižší inhibiční účinek (Wang et al. 1999), limitní koncentrace jednotlivých NMK nejsou stejné. Inhibiční účinek nižších mastných kyselin podpořený poklesem hodnoty pH pod 7, spočívá v jejich proniknutí do buněk s následnou denaturací buněčných bílkovin (Deublein a Steinhauser 2008).

#### 4.2.5.6 *Inhibitory procesu anaerobní fermentace*

Řada organických a anorganických látek má inhibiční účinky na anaerobní fermentaci. Jejich inhibiční účinek se však může projevit různou mírou nebo také vůbec (Gerardi 2003). Míra účinku inhibitorů je odvislá od jejich koncentrace, složení fermentovaného materiálu, přítomnosti dalších inhibitorů, změně procesních podmínek a adaptaci mikroorganismů na inhibitory (Gerardi 2003, Deublein a Steinhauser 2008). Anaerobní mikroorganismy mají rovněž schopnost odbourávat řadu toxických látek z prostředí (Kaltschmitt a Hartmann 2001). I přes výše uvedené závislosti, lze určit orientační koncentrace, při kterých se projevuje inhibiční účinek:

Sodík

Ovlivňuje pH, inhibiční účinek od koncentrací v rozmezí 6–30 g·l<sup>-1</sup>, adaptované populace tolerance až do 60 g·l<sup>-1</sup>, účinek zaměnitelný s draslíkem

Draslík

Ovlivňuje osmózu metanogenních archae, inhibice od 3 g·l<sup>-1</sup>, zaměnitelný účinek se sodíkem a amonnými ionty

Hořčík

Inhibice od 2,4 g·l<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>, záměna účinku s mastnými kyselinami

Vápník

Inhibice od 2,8 g·l<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> záměna účinku s vyššími mastnými kyselinami

Amonné ionty a amoniak

Amonné ionty jsou v rovnováze s amoniakem (v závislosti na pH), inhibiční účinek od koncentrací v rozmezí (2,7–10 g·l<sup>-1</sup>), adaptované populace při nízkém pH snášejí koncentrace do 30 g·l<sup>-1</sup>, amoniak inhibuje od 0,15 g·l<sup>-1</sup>, záměna účinku v závislosti na organismu s vápenatými nebo sodnými kationty. Inhibiční vliv amoniaku na metanogenní archae je specifický. Metanogenní archae jsou schopny adaptace při dlouhodobě zvýšených koncentracích amonného dusíku resp. amoniaku. Nelze proto přesně stanovit inhibiční hranici amonných iontů a amoniaku (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2010).

## Síra

Vázaná síra inhibuje od koncentrací  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$   $\text{H}_2\text{S}$ , elementární  $\text{S}^{2-}$  od  $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$  a od  $160 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{S}$ . Adaptované populace snášejí koncentrace až  $600 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$   $\text{Na}_2\text{S}$  a  $1\,000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$   $\text{H}_2\text{S}$ . Inhibice sírou nastává při nepřítomnosti některých iontů kovů, rovněž thio- vazby inhibují. Inhibiční účinek síry je závislý právě na látce, v níž je síra vázána.

## Těžké kovy

Inhibiční vliv mají jejich volné ionty: nikl od  $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , měď  $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , chrom od  $130 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , olovo od  $340 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , zinek od  $400 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

Inhibiční koncentrace při vazbě v uhličitanech: zinek od  $160 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , měď od  $170 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , kadmium od  $180 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , chrom trojmocný od  $530 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , železo od  $1\,750 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

Malé množství síranů ( $1\text{--}2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) může neutralizovat účinek těžkých kovů jejich rozkladem.

## Vyšší mastné kyseliny

Jejich odbourávání je závislé na přítomnosti volných iontů vápníku.

## Petrochemické produkty

U neadaptovaných populací, dochází k inhibici od koncentrace  $0,1 \text{ mMol}\cdot\text{l}^{-1}$  aromatických a halogenových uhlovodíků, adaptované systémy však velmi dobře odbourávají tyto látky.

## Kyanid

Inhibice od koncentrace  $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , adaptované společenstva tolerance do  $30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

## Sloučeniny chlóru

Možnost tolerance do koncentrace  $40 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , fluor-chlorované uhlovodíky a ostatní nízkomolekulární organické halogeny jsou toxické od cca  $50 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

## Formaldehyd

U neadaptovaných společenstev inhibice od  $100 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ , u adaptovaných je tolerance do koncentrace  $1\,200 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ .

#### Oxid uhličitý

Při parciálním tlaku vyšším než 1 bar dochází k inhibici odbourávání kyseliny propionové.

#### Aromatické kyseliny

L-Dopamin (odpadní voda ze zpracování brambor) může mít inhibiční účinky. Záměna účinků s mastnými kyselinami, možná adaptace populací.

#### Desinfekční prostředky a antibiotika

Od koncentrací v rozmezí 1–100 mg·l<sup>-1</sup> mohou mít inhibiční účinky, na rozdíl od aerobních nereagují anaerobní mikroorganismy na všechny antibiotika, např. penicilin.

(Kaltschmitt a Hartmann 2001)

#### **4.2.5.7 Tvorba pěny**

Tvorba pěny ve fermentoru je častým provozním problémem při výrobě bioplynu. Následky tohoto problému jsou pro provozovatele značné. Dochází k nerovnoměrnému rozložení substrátu v reaktoru, tvorbě krust, zvyšují se náklady na míchání a čerpání substrátu. Pěna zabírá aktivní prostor reaktoru, snižuje se objemová produkce. Kratší je doba zdržení substrátu, spolu s horším kontaktem metanogenních mikroorganismů s fermentovaným materiálem. Hrozí dokonce zastavení celého fermentačního procesu. Opětovné uvedení fermentoru do provozu spolu s ušlým ziskem představuje pro provozovatele značné finanční náklady.

Příčiny zvýšeného pění substrátu nejsou zcela objasněny. Dochází k němu zejména ve startovních fázích anaerobní fermentace, při nevyrovnaném zastoupení mikrobiálních společenstev, nerovnoměrných a vysokých dávkách rychle rozložitelného substrátu. Dalšími příčinami jsou použití závadného substrátu o nízké kvalitě (výskyt plísní a jiných vláknitých mikroorganismů), příliš intenzivní míchání. Na BPS opětovně využívajících kapalnou fázi s vysokým obsahem amoniaku a amonných iontů byly zjištěny problémy s pěněním (Moeller et al. 2010, Effenberger et al. 2007). Riziko nadměrného pění je dáváno do vztahu s provozní teplotou fermentačního procesu, u termofilního procesu, při kterém jsou eliminovány vláknité mikroorganismy, je pravděpodobnost jeho výskytu nižší (Dohányos et al. 2004).

Nadměrné pění lze eliminovat zejména rovnoměrným dávkováním v krátkých časových intervalech, kontrolou kvality vstupního substrátu a zajištěním stálých procesních podmínek. Použití chemických přípravků je účinné, avšak při jejich volbě je nutná obezřetnost, jelikož inhibují fermentační proces. Alternativou k těmto přípravkům je použití rostlinných olejů, které jsou snadno dostupné a navíc mají pozitivní vliv na produkci bioplynu (Kopplow 2006, Moeller et al. 2010).

#### **4.2.6 Substráty pro výrobu bioplynu**

Obecně vzato, veškerou biomasu skládající se převážně z cukrů, bílkovin, tuků, celulózy a hemicelulózy, je možné použít k produkci bioplynu. Při výběru vstupních substrátů je potřeba brát v potaz níže uvedené zásady:

- Obsah organické hmoty má být co nejvyšší.
- Nutriční hodnota má být co nejvyšší.
- Substrát by neměl obsahovat patogeny a ostatní organismy inhibující fermentační proces.
- Obsah nebezpečných a balastních látek má být nízký, pro bezproblémový průběh fermentačního procesu, v opačném případě je nutná jeho pasterizace či hygienizace.
- Složení vzniklého bioplynu má odpovídat jeho následnému využití.
- Fermentační zbytek má mít vlastnosti pro jeho použití jako hnojiva.

(Weiland 2010)

Výnosy a složení bioplynu stejně jako rozložitelnost vstupních substrátů závisí na obsahu cukrů, bílkovin, tuků a ligninu (Amon et al. 2007). Měrné produkce těchto živin jsou uvedeny v (Tab. 3). Nejvyšší produkce bioplynu s vysokým obsahem metanu je u tuků, zatímco u ligninu, vzhledem k jeho odolnosti vůči rozkladu fermentačními mikroorganismy, je produkce nulová (Baserga 1998).

Tab. 3: Měrné produkce strukturních látek (Baserga 1998)

| Substrát  | Bioplyn [ $\text{Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ suš.] | $\text{CH}_4$ [%] | $\text{CO}_2$ [%] |
|-----------|---|-------------------|-------------------|
| Cukry     | 790–800   | 50                | 50                |
| Bílkoviny | 700   | 70–71             | 29–30             |
| Tuky      | 1 200–1 250                                       | 67–68             | 32–33             |
| Lignin    | 0   | 0                 | 0                 |

V současnosti v ČR provozované BPS zpracovávají ve většině případů vstupní substráty pocházející ze zemědělské činnosti. Jedná se o cíleně pěstovanou biomasu a vedlejší zemědělské produkty. Dále je možné k výrobě bioplynu využít posklizňové zbytky, odpady z potravinářské výroby, restauračních a stravovacích zařízení, prodejen potravin, či vyříděnou organickou složku komunálního odpadu. Substráty jsou v BPS kofermentovány, nejčastěji ve směsi siláže, zejména kukuřice, kejdy a hnoje hospodářských zvířat. Při kofermentaci je dosaženo požadovaného obsahu sušiny a vyšší produkce bioplynu (Weiland 2010). Kejda, zejména kejda přežvýkavců, obsahuje potřebné minerály spolu s metanogenními mikroorganismy a slouží tak jako inokulum. Výnosy a kvalita bioplynu substrátů vhodných pro produkci bioplynu jsou uvedeny v (Tab. 4).

Pro dosažení instalovaného výkonu KJ se při návrhu složení krmné dávky vychází z kvalitativních parametrů vstupních substrátů. Přesná predikce produkce metanu nemůže být zaručena pouze na základě dávky sušiny. Při návrhu skladby krmné dávky BPS jsou významné tyto kvalitativní parametry vstupních substrátů:

- vláknina a její složky
- dusíkaté látky (NL)
- tuk
- cukr
- popel
- stravitelnost (vlákniny, NL)

Tab. 4: Výnosy bioplynu substrátů (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2010)

|  | suš.<br>[%] | orgsuš.<br>[%] | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>[% suš.] | bioplyn<br>[Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> ČH] | CH <sub>4</sub><br>[Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> ČH] | CH <sub>4</sub><br>[Nm <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> orgsuš.] |
|--|-------------|----------------|---|--|--|---|
| Statková hnojiva                           |             |                |   |  |  |   |
| Hovězí kejda                               | 10          | 80             | 1,7                                       | 25   | 14   | 210   |
| Prasečí kejda                              | 6           | 80             | 2,5                                       | 28   | 17   | 250   |
| Hovězí hnůj                                | 25          | 80             | 3,2                                       | 80   | 44   | 250   |
| Drůbeží hnůj                               | 40          | 75             | 14,3                                      | 140  | 90   | 280   |
| Koňský hnůj                                | 28          | 75             |   | 63   | 35   | 165   |
| Cíleně pěstované plodiny                   |             |                |   |  |  |   |
| Kukuřičná siláž                            | 33          | 95             | 1,8                                       | 200  | 106  | 340   |
| GPS  | 33          | 95             | 2,8                                       | 190  | 105  | 329   |
| Obilí zrno                                 | 87          | 97             | 7,2                                       | 620  | 329  | 389   |
| Travní senáž                               | 35          | 90             | 2,2                                       | 180  | 98   | 310   |
| Cukrová řepa                               | 23          | 90             | 0,8                                       | 130  | 72   | 350   |
| Krmná řepa                                 | 16          | 90             |   | 90   | 50   | 350   |
| Slunečnice siláž                           | 25          | 90             |   | 120  | 68   | 298   |
| Čirok súdánský                             | 27          | 91             |   | 128  | 70   | 286   |
| Čirok cukrový                              | 22          | 91             |   | 108  | 58   | 291   |
| Žito na zeleno                             | 25          | 88             |   | 130  | 70   | 319   |
| Druhotné suroviny potravinářského průmyslu |             |                |   |  |  |   |
| Pivní výlisky                              | 23          | 75             | 1,5                                       | 118  | 70   | 313   |
| Obilné mláto                               | 6           | 94             | 4,8                                       | 39   | 22   | 385   |
| Šlupky brambor                             | 6           | 85             | 0,7                                       | 34   | 18   | 362   |
| Ovocné výlisky                             | 2,5         | 95             | 0,7                                       | 15   | 9  | 285   |
| Surový glycerin                            |             |                |   | 250  | 147  | 185   |
| Výlisky řepky                              | 92          | 87             | 24,8                                      | 660  | 317  | 396   |
| Výlisky brambor                            | 13          | 90             | 0,2                                       | 80   | 47   | 336   |
| Melasa                                     | 85          | 88             | 0,3                                       | 315  | 229  | 308   |
| Jablečné mláto                             | 35          | 88             | 1,4                                       | 148  | 100  | 453   |
| Vinné mláto                                | 45          | 85             | 5,8                                       | 260  | 176  | 448   |

#### **4.2.6.1 Cíleně pěstované plodiny**

Rostlinná biomasa zemědělského původu je převažujícím vstupním substrátem na BPS. Z kulturních plodin převažuje v surovinové skladbě BPS siláž kukuřice. Je to z důvodu její vysoké měrné produkce bioplynu, při současně vysokých hektarových výnosech. Cíleně šlechtěné energetické hybridy kukuřice jsou schopny dosáhnout špičkových výnosů 30 t suché hmoty z hektaru. Při produkci kukuřice zemědělci využívají stávající techniku a agrotechnické znalosti. Při produkci energetických plodin jsou však jiné požadavky na jejich kvalitu ve srovnání s jejich použitím jako krmiva pro dobytek, konkrétně jsou zde jiné požadavky na výnos a obsah suché hmoty v biomase. Primární je zde produkce metanu vztažená na plochu zemědělské plochy (Amon et al. 2007). Optimální období sklizně pro dosažení maximálního výnosu je u silážní kukuřice ve fyziologickém stádiu mléčně-voskové zralosti. Se zvyšujícím se FAO (mezinárodní klasifikace stupně ranosti dle norem organizace FAO) roste i optimální obsah sušiny při sklizni.

U raných a středně raných hybridů kukuřice pěstovaných v České republice je optimální obsah sušiny při sklizni v rozmezí 30–35 % (Leonhartsberger 2007).

Aby nedocházelo k jednostrannému složení osevních postupů s negativními dopady v podobě zvýšené eroze a zhoršení fyzikálně-chemických vlastností půd, je potřeba hledat alternativy k silážní kukuřici. Jak uvádí (Amon et al. 2007) mezi nejčastěji pěstované plodiny jsou vedle kukuřice také slunečnice, trávy, čirok, dále lze využít siláž obilnin (GPS), či netradiční plodiny jako ostropestřec, rákos a krmný šťovík. Rozšíření těchto plodin pro produkci bioplynu se přímo vybízí v podmínkách České republiky. Došlo by tím k obohacení osevních postupů a intenzivnějšímu využívání trvalých travních porostů, které jsou při dnešních nízkých stavech dobytka, stále častěji využívány extenzivně.

##### **4.2.6.1.1 Charakteristika čiroku**

Čirok (*Sorghum*) původem ze Severovýchodní Afriky se jeví jako nejlepší z v současnosti zkoumaných „nových plodin“ pro produkci energie (Dalianis et al. 1996, Gosse 1996). Pěstováním čiroku dojde k rozšíření dnes velmi omezených osevních postupů a částečné náhradě kukuřice (Mahmood et al. 2012).



Biomasa čiroku je charakterizována vysokým obsahem snadno fermentovatelných sacharidů (Antonopoulou et al. 2008). Čirok je charakteristický svou flexibilní a vyrovnanou produkcí škrobu, cukrů a celulózy v zrna a rostlinné hmotě (Rooney et al. 2007).

Čirok stejně jako kukuřice patří mezi C4 kulturní rostliny. C4 rostliny pocházejí z teplých oblastí. Ve srovnání s C3 rostlinami, pocházejících z oblastí mírného pásu, mají C4 rostliny nižší úroveň fotorespirace. V důsledku fotorespirace dochází u rostlin ke značnému poklesu produkce sacharidů a ztrátám primárně zachyceného CO<sub>2</sub>. Díky těmto svým vlastnostem mohou mít C4 rostliny oproti C3 rostlinám až desetkrát vyšší denní nárůst sušiny vztažený na listovou plochu. Rovněž mají lepší poměr z atmosféry vázaného uhlíku k množství transpirované vody 250–350 g H<sub>2</sub>O · g<sup>-1</sup> C, u C3 450–940 g H<sub>2</sub>O · g<sup>-1</sup> C (Antonopoulou et al. 2008). Čirok je pěstován zejména v oblastech s nižšími srážkami a vyššími teplotami, kde má ve srovnání s ostatními obilninami rovněž výhodu ve své kratší vegetační době (Smith a Frederiksen 2000). Množství srážek by nemělo být nižší než 350–400 mm (Bassam 1996).

Je to však velmi adaptibilní plodina vůči rozdílným podmínkám a lze jej pěstovat v různých klimatických podmínkách (Ibrahim 1999, Zegarada–Lizarazu a Monti 2012). Má vysokou odolnost vůči suchu, během kterého je schopen pozastavit růst a metabolickou aktivitu do stavu dormance (Bassam 1996). Ve srovnání s kukuřicí má čirok lepší schopnost odolávat suchu a vykazuje efektivnější využití vody, jak uvádí (Zegarada–Lizarazu a Monti 2012). Vzhledem k velmi dobré schopnosti čiroku získávat minerály z půdy, má velmi skromné nároky na kvalitu půdy, optimální pH půdy je pro něj v rozmezí 5–8,5, avšak existují odrůdy tolerující kyselé půdy (Bassam 1996).

Tolerance vysokých teplot, kratší vegetační doba a C4 charakteristika dává možnost pěstovat čirok v oblastech, kde ostatní kulturní plodiny nejsou schopny dosáhnout požadovaných výnosů. Erozní ohrožení půd je při pěstování čiroku ve srovnání s kukuřicí nižší díky výsevu do užších řádků, intenzivnějšímu odnožování a silně rozvinutému kořenovému systému (Bassam 1996).

I přes výše uvedené vlastnosti, byl čirok zařazen mezi kulturní plodiny, jejichž pěstování je regulováno dle GAEC 2 (Standardy Dobrého zemědělského a environmentálního stavu) definovaného na základě nařízení Rady ES č. 73/2009 Sb. Dle

tohoto standardu je na erozi silně ohrožených půdních blocích popřípadě jejich dílech vyloučeno pěstování širokořádkových plodin.

Výsev čiroku je realizován v období, kdy nehrozí poškození mrazy do seťového lůžka o hloubce 10–15 cm s následným zapravením do hloubky 2–4 cm. První měsíc vegetace je pro čirok kritický a je potřeba zajistit vhodné podmínky pro jeho vzcházení a počáteční růst, dokud nebude rozvinut kořenový systém rostliny a zajištěna jeho vnitro i mezidruhá konkurenceschopnost (Tsuchihashi a Goto 2004). Různá množství dodaných živin neměly prokazatelný vliv na výnos biomasy a cukru, proto jsou doporučovány nižší dávky živin (Tab. 5).

Tab. 5: Doporučené dávky živin čiroku (Amon et al. 2007)

|   |               |
|---|---------------|
| Dusík (N)                               | 140–160 kg/ha |
| Draslík (K <sub>2</sub> O)              | 200–240 kg/ha |
| Fosfor (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 120–140 kg/ha |

#### **4.2.6.1.2 Využití travních porostů pro produkci bioplynu**

U intenzivních travních porostů a jejich senáží, lze dosáhnout obdobných produkcí metanu jako u kukuřice. Důležitá je kvalita sklizeného materiálu, obsah sušiny v rostlině a její složení. Z pohledu kvalitativního složení jsou méně vhodné bílkovinné senáže. Při rozkladu těchto senáží dochází k uvolňování nežádoucího amoniaku a sirovodíku. Obsah sušiny by měl být alespoň 30 %. Z důvodu vyššího obsahu vlákniny v sušině a pro zajištění snadného přístupu metanogenním mikroorganismům k fermentovanému materiálu je vhodné upravit řezanku při sklizni na maximální délku do 2 cm.

#### **4.2.6.1.3 Využití GPS pro produkci bioplynu**

Kvalitní siláž GPS (siláž z celých rostlin, nejčastěji žito) je schopna poskytnout obdobné produkce metanu jako siláž kukuřice. Zařazení GPS do krmné dávky BPS dává možnost rozšířit osevní postupy, při získání snadno rozložitelného vstupního substrátu s vysokou měrnou produkcí metanu. GPS se zařazuje jako meziplodina a následnou hlavní plodinu lze zařadit například čirok. GPS je charakteristická svými abrazivními vlastnostmi. Zastoupení GPS v krmné dávce BPS má své limity, při vysokém zastoupení dochází k zahuštění fermentované směsi a problémům s mícháním.

#### **4.2.6.2 Vedlejší produkty a substráty odpadního charakteru**

Nejčastěji využívaným vedlejším zemědělským produktem pro výrobu bioplynu je kejda. Její použití v kofermentaci s rostlinnou biomasou má pozitivní vliv na výnos bioplynu a provozní ekonomiku BPS. Kejda je zdrojem významných mikroprvků, zejména kejda monogastrů. Kejda skotu obsahuje také metanogenní mikroorganismy, jež mají původ v bachoru přežvýkavců. Zfermentovaná kejda jakožto složka fermentačního zbytku vykazuje menší míru zápachu, vyšší obsah rostlinám snadno přístupného a podzemní vody méně ohrožujícího amoniakálního dusíku (Gutser 1990). Důležitý je také hygienizační efekt fermentačního procesu. U kejdy zpracované v mezofilním teplotním režimu dojde ke snížení počtu mikrobiálních zárodků o  $10^1$  až  $10^2$  a u termofilního procesu o  $10^3$  až  $10^4$  (Schulz a Eder 2004).

Použití chlévské mrvy ať už slamnaté nebo bez slamnaté má obdobný efekt jako kejda s tím rozdílem, že u slamnaté mrvy se musí počítat s možným zahuštěním fermentované směsi a je vhodné použití řezané (štípané) slámy, aby nedošlo ke komplikacím při čerpání, míchání substrátů a eliminovaly se plovoucí vrstvy.

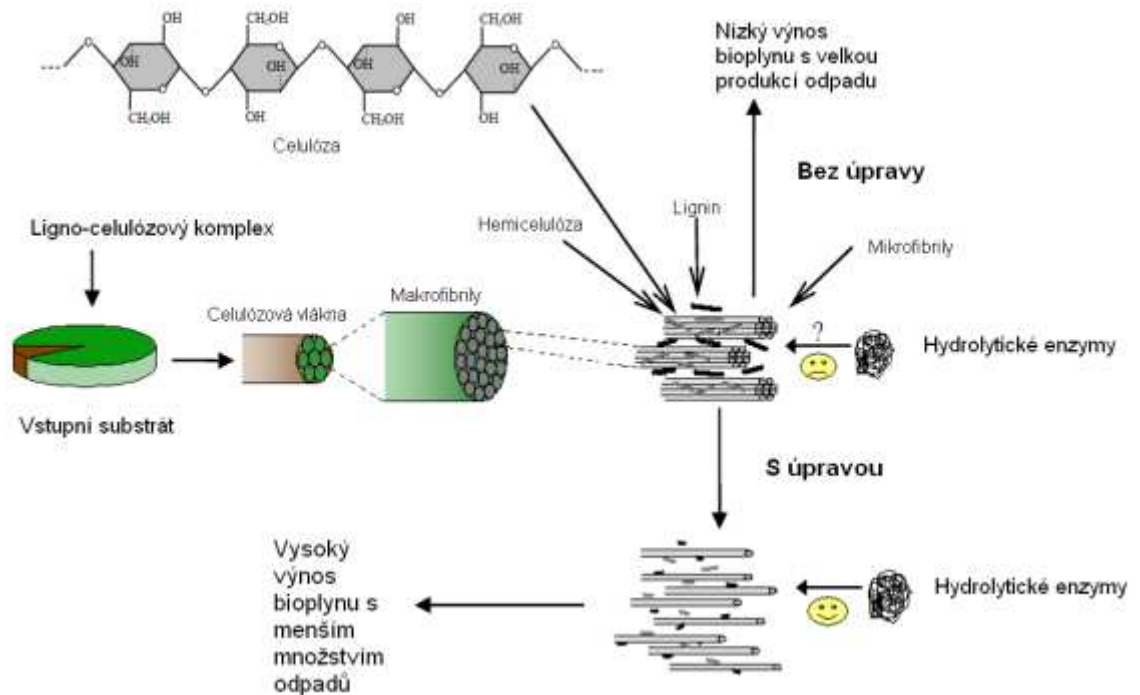
Lihovarnické výpalky a cukrovarnické řízky jsou hojně využívanými vedlejšími produkty na BPS. Výhodou při jejich použití je nízká cena a vysoká stravitelnost. Sezónní dostupnost, kolísající a nestabilní kvalita jsou pro provozovatele BPS faktory, které musí při jejich použití zohlednit. Zřídka jsou totiž tyto substráty silážovány a do BPS jsou dávkovány v čerstvém stavu. Při použití výpalků a řízků je nutné dodržet limitované maximální zastoupení v krmné dávce, aby se předešlo vysokým obsahům sirovodíku ve vzniklém bioplynu. Při použití výpalků v kapalné formě existuje riziko vzniku pěny v reaktoru.

Při použití vstupních materiálů, které nepocházejí ze zemědělské činnosti, je před jejich použitím na BPS potřeba splnit platné legislativní požadavky. Nařízení ES č.1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě, definuje nutné procesní postupy a požadované technologické prvky při zpracování těchto materiálů na BPS. Dle tohoto nařízení musí mít takto definované materiály maximální velikost částic před vstupem do hygienizačního zařízení maximálně 12 mm, minimální požadovaná doba zdržení při 70 °C je 60 minut a minimální teplota celé hmoty materiálu v hygienizačním

zařízení je 70 °C. Provozovatelé musí při zpracování materiálů definovaných dle uvedeného nařízení na výstupu z BPS analyzovat fermentační zbytek a zjistit, zdali došlo k požadovanému poklesu indikátorových organismů (*E. Coli*, *Enterococcaceae*, *Salmonella spp.*).

#### 4.2.6.3 Úprava substrátů pro výrobu bioplynu

Substráty používané pro výrobu bioplynu je často nutné před jejich využitím v BPS upravit a to z důvodu jejich struktury, tvořené ligno-celulózovým komplexem (Obr. 2).



Obr. 2: Ligno-celulózový komplex (Taherzadeh et al. 2008)

Materiály obsahující ligno-celulózu jsou charakteristické svou odolností vůči enzymatickým účinkům. Ligno-celulóza tvoří značnou část rostlinných substrátů, zvířecích exkrementů, zemědělských a lesnických odpadů (Sims 2004). Skládá se z celulózy, hemicelulózy, ligninu a několika dalších anorganických materiálů (Sjöström 1993).

Celulotické řetězce spojené vodíkovými vazbami jsou též nazývané mikrofibryly (Ha et al. 1998). Tyto mikrofibryly jsou spojeny hemicelulózou, amorfními polymery různých cukrů, stejně jako ostatními polymery například pektinem a kryty ligninem.

Mikrofibrily jsou sdružovány do svazků nazývaných makrofibrily (Delmer et al. 1995). Tato speciální a složitá struktura činí celulózu nepřístupnou hydrolyzujícím enzymům.

V hemicelulóze se v závislosti na původu vyskytuje majoritně manóza, xylóza, dále galaktóza, glukóza, arabinóza (Taherzadeh et al. 2008). Na rozdíl od celulózy je hemicelulóza snadno hydrolyzovatelná kyselinami na monomery (Sjöström 1993). Lignin je velmi komplexní, těžko rozložitelná molekula tvořená fenyl-propanovými jednotkami. Lignin je nejodolnější složka buněčných stěn rostlin a s jeho rostoucím obsahem roste odolnost substrátu vůči rozkladu (Taherzadeh et al. 2008). Cílem úprav vstupních substrátů je upravit jejich vlastnosti tak, aby byl možný jejich enzymatický rozklad. Odstranění ligninu s následným zlepšením enzymatického rozkladu je spojováno s lepším přístupem enzymů v důsledku uvolnění pórů. Vzhledem ke složitosti a různorodosti ligno-celulóзовých substrátů není jejich úprava jednoduchá a byla objevena řada metod jejich úpravy (Taherzadeh et al. 2008). V praxi jsou využívány mechanické, fyzikálně-chemické, chemické a biologické metody úpravy.

#### ***4.2.6.3.1 Mechanické úpravy***

Mechanické úpravy substrátů mají za cíl zvětšení jejich specifického povrchu a snadnější přístup metanogenním mikroorganismům. Mletí zlepšuje zmenšením částic substrátů enzymatickou hydrolýzu a rozklad krystalové struktury lignocelulózy (Zeng et al. 2007). Těžce rozložitelné substráty s dlouhými vlákny s ligno-celulóзовým komplexem se řežou a melou, aby bylo docíleno jejich vysokého povrchu. U těchto strukturovaných substrátů bylo zjištěno navýšení produkce bioplynu o 20–25 % (Deublein a Steinhauser 2008).

#### ***4.2.6.3.2 Fyzikálně-chemické úpravy***

##### **Exploze parami**

Za současného působení vysoké teploty a tlaku dochází k uvolnění hemicelulózy, což pozitivně ovlivňuje účinek hydrolytických enzymů. Tlak a teplotu je nutné volit velmi uvážlivě, aby nedocházelo ke ztrátám celkového obsahu cukrů, či tvorbě nerozložitelných komplexů (Taherzadeh et al. 2008).

##### **Exploze parami s přidavkem oxidu siřičitého**

Exploze parami může být provedena s přidavkem oxidu siřičitého za účelem lepšího uvolnění jak celulózy, tak hemicelulózy (Taherzadeh et al. 2008). Lze jí provést přidáním oxidu siřičitého odpovídající 1–4 % hmotnosti substrátu (Eklund et al. 1995).

#### Exploze amoniakem

Jedná se o alkalickou, fyzikálně-mechanickou úpravu, kdy je substrát vystaven účinku kapalného amoniaku při vysoké teplotě (90–100 °C) po dobu cca 30 minut, následované okamžitým poklesem tlaku. Touto metodou, lze snížit obsah ligninu při neporušení celulózy a hemicelulózy (Taherzadeh et al. 2008). Ačkoli nevznikají na rozdíl od jiných metod inhibující vedlejší produkty, je nutné odstranit fenologické zbytky ligninu, čímž roste množství odpadní vody (Chundawat et al. 2007). Zjištěný optimální poměr přidaného amoniaku je u prosa prutnatého (*Panicum virgatum*) 1:1 kg suché hmoty substrátu (Alizadeh et al. 2005).

#### Exploze superkritickým oxidem uhličitým

Superkritický oxid uhličitý je vzhledem ke své dostupnosti, nízké ceně, netoxicitě, nehořlavosti považován za vhodné extrakční činidlo (Zheng et al. 1996). Rovněž bylo zjištěno, že v přítomnosti vody zlepšuje enzymatický rozklad dřeva (Kim et al. 2001). Delignifikace oxidem uhličitým za vysokého tlaku je podpořena při současné přítomnosti etanolu nebo kyseliny octové ve vodním prostředí (Pasquini et al. 2005)

#### Úprava působením horké vody

Voda je schopna za vysokého tlaku proniknout do biomasy, hydratovat celulózu, odstranit hemicelulózu a část ligninu. Absence přidaných chemikálií a antikoročních materiálů v hydrolytickém reaktoru jsou hlavními výhodami této metody, která rozšiřuje prostor celulózy využitelný hydrolytickými enzymy (Zeng et al. 2007). Zjištěné optimální procesní podmínky jsou pro posklizňové zbytky obilovin 190 °C po dobu 15 minut, kdy následně došlo k enzymatickému rozkladu obsažené hemicelulózy ve výši 90 % (Mosier et al. 2005). Porovnání exploze parami a účinku horké vody ukázalo u obou metod zlepšení hydrolýzy, avšak u horké vody došlo k vyššímu uvolnění xylanu. Efekt horké vody je srovnatelný s účinkem zředěných kyselin, na rozdíl od kterých však není potřeba použít kyseliny a neutralizovat odpad (Laser et al. 2002).

#### 4.2.6.3.3 Chemické úpravy

##### Alkalická hydrolýza

Tato úprava spočívá v aplikaci alkálií NaOH, Ca(OH)<sub>2</sub> nebo NH<sub>3</sub><sup>+</sup>, za účelem odstranění ligninu a části hemicelulózy a zvýšit tak přístupnost celulózy enzymům. Lze jí provést za relativně nízkých teplot, ale při delším čase a vysoké koncentraci alkálií, je vhodná pro substráty ze zemědělské výroby (Taherzadeh et al. 2008). Ve srovnání s účinkem kyselin či oxidačních činidel je alkalická úprava nejefektivnější v rozkladu esterických vazeb mezi ligninem, hemicelulózou a celulózou.

##### Použití peroxidu v alkalickém prostředí

Při této metodě je substrát namočen do vody s upraveným pH (pH 11–12 NaOH) obsahující H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> při pokojové teplotě a době trvání 6–24 hodin, kdy enzymatická hydrolýza je urychlena delignifikací (Taherzadeh et al. 2008). Z dvaceti zkoušených chemických úprav bylo zjištěno u této metody nejvyšší zlepšení enzymatické hydrolýzy za použití NaOH a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Mishima et al. 2006).

##### Použití organických rozpouštědel

Je možné použít organická rozpouštědla za účelem získání celulózy vhodné pro enzymatickou hydrolýzu, odstraněním nebo rozkladem ligninu, případně části hemicelulózy (Curreli et al. 2007, Ito et al. 2003, Pan et al. 2006, Rolz et al. 1986). Během této metody je substrát smíchán s vodou a organickým rozpouštědlem a zahříván za účelem rozpuštění ligninu a části hemicelulózy. Výhodou je nízká hmotnost odstraněného ligninu a jeho vysoká čistota Naopak nevýhodou je nutnost odstranění rozpouštědla z důvodu inhibičních účinků na enzymatickou hydrolýzu (Wyman et al. 1996, Sun a Cheng 2002, Hooper a Li 1996).

##### Mokrá oxidace

Substrát je upraven za použití vody, vzduchu, resp. kyslíku při teplotě vyšší než 120 °C (Taherzadeh et al. 2008). Teplota spolu s reakčním časem a tlakem kyslíku je nejdůležitějším parametrem (Schmidt a Thomsen 1998). Během tohoto procesu jsou zasaženy všechny tři složky ligno-celulozového komplexu, hemicelulóza je rozložena na monomery, stejně jako lignin, jenž je navíc oxidován a celulóza je částečně rozložena (Taherzadeh et al. 2008). Celulóza je poté vhodná pro enzymatickou hydrolýzu (Schultz et al. 1984).

### Hydrolýza kyselinami

Nejvhodnějšími kyselinami pro tuto úpravu jsou kyselina sírová, chlorovodíková a dusičná (Taherzadeh et al. 2007). Je možné použít koncentrované kyseliny za současně nízké teploty nebo zředěné kyseliny při vysoké teplotě. Použití koncentrovaných kyselin znamená vyšší hydrolytický účinek, avšak je nutné použití nekovových či hliníkových materiálů, rovněž vyšší náklady související s recyklací kyselin snižují ekonomickou výhodu této metody (Wyman 1996, Jones a Semrau 1984, Sun et al. 2004).

Použití nekoncentrovaných kyselin je nejpoužívanější chemickou úpravou. Při teplotách v rozmezí 140–190 °C a koncentraci 0,1–1 % H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> lze dosáhnout prokazatelného navýšení míry hydrolýzy, při téměř 100% odstranění hemicelulózy (Taherzadeh et al. 2008). Touto metodou sice není možné rozpustit lignin, lze jej ovšem narušit a zvýšit tak přístupnost celulózy k enzymatické hydrolýze (Wyman 1996). Nejlepších výsledků bylo dosaženo při teplotě 210 °C a délce 2 minut, ale už při teplotě 200 °C byla zjištěná 90% míra následné enzymatické hydrolýzy celulózy (Taherzadeh et al. 2008).

#### **4.2.6.3.4 Biologické úpravy**

Některé druhy hub (hnědé a červené houby) a bakterií, jsou schopny rozložit lignin a hemicelulózu a umožnit tak enzymatickou hydrolýzu biologickému rozkladu odolné celulózy (Taherzadeh et al. 2008). Výhodou biologických metod je jejich energetická nenáročnost, absence přidaných chemických látek a šetrnost k životnímu prostředí, na druhou stranu míra rozkladu je u nich nízká (Sun a Cheng 2002).

#### **4.2.6.3.5 Silážování**

Silážování je nejrozšířenějším způsobem úpravy rostlinné hmoty používané jak ke krmení dobytka tak i vstupních substrátů pro výrobu bioplynu. Během silážování dojde ke konzervaci a částečnému hydrolytickému rozkladu rostlinné hmoty, kterou je poté možné dlouhodobě skladovat při stále kvalitě a po nadávkování do reaktoru je fermentační proces urychlen. Během silážování sice dochází ke snížení obsahu organické sušiny, avšak mezi produkty silážování patří NMK (C<sub>2</sub>–C<sub>6</sub>) a alkoholy, které jsou následně využity metanogenními mikroorganismy a jejich vznik převyšuje ztráty organické sušiny. Srovnáním produkce metanu čerstvého a silážovaného substrátu byla



u silážovaného zjištěna vyšší produkce metanu vztažená na organickou sušinu, vyšší obsah metanu v bioplynu a vyšší intenzita produkce metanu (Hermann et al. 2011). Při výrobě siláží a senáží je důležitá délka řezanky silážované hmoty, zpracování řezanky na jámě. Základní požadavky na kvalitu řezanky siláže a senáže spolu s agrotechnickými postupy jsou uvedeny v Tab. 6:

Tab. 6: Parametry ovlivňující kvalitu siláže pro produkci bioplynu (Durst 2010)

| Parametr                | Optimum                 |                            |
|-------------------------|-------------------------|----------------------------|
| Obsah sušiny            | Kukuřičná siláž         | 28–35 %                    |
|                         | Travní senáž, GPS       | 30–40 %                    |
| Délka řezanky           | Kukuřičná siláž vlhká   | 10 mm                      |
|                         | Kukuřičná siláž suchá   | 5–6 mm                     |
|                         | Travní senáž, GPS vlhká | 6 mm                       |
|                         | Travní senáž, GPS suchá | 4 mm                       |
| Dusací zařízení         | Hmotnost                | min. ¼ výkonu              |
|                         | Výška vrstev max.       | 30 cm                      |
|                         | Zhutnění min.           | 220 kg suš./m <sup>3</sup> |
| Vrstva odebírané siláže | Zima                    | > 1 m/týden                |
|                         | Léto                    | > 2 lépe 3 m/týden         |
| Vlastnosti siláže       | pH                      | < 4,5                      |
|                         | Obsah kys. octové       | 1–3 % sušiny               |
|                         | Obsah kys. máselné      | 0–0,3 % sušiny             |
| Obsah amoniaku          | Travní senáž            | < 8 % N <sub>tot</sub>     |
|                         | Kukuřičná siláž         | < 6 % N <sub>tot</sub>     |

## 4.2.7 Využití bioplynu

### 4.2.7.1 Kogenerace, trigenerace

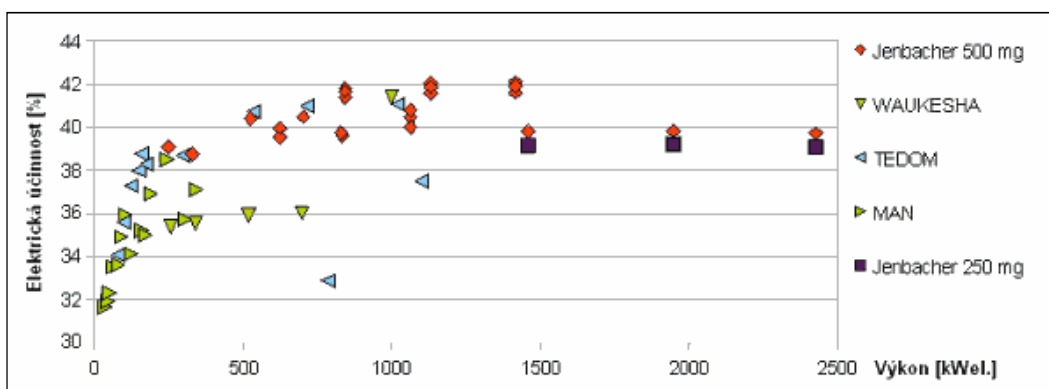
Kogenerace

Energii obsaženou v bioplynu lze transformovat na tepelnou a elektrickou energii jeho spálením v KJ (Obr. 3).



Obr. 3: Kogenerační jednotka BPS

Tento způsob využití bioplynu je v současnosti nejčastěji využíván. Primární je zde zisk elektrické energie, která je následně dodávána do veřejné elektrické sítě. Prvotně využívané KJ byly vznětové či zážehové motory upravené pro spalování bioplynu. Elektrická účinnost takových jednotek nebyla nijak vysoká. Postupnými inovacemi a zlepšeními, docílili výrobci KJ značného navýšení elektrické účinnosti, které dnes přesahují 40 % (Graf 3). Nejpoužívanějšími typy KJ jsou zážehové a vznětové motory se zápalným paprskem. Počet jejich instalací v Evropě je vyrovnaný 50:50 % (Deublein a Steinhauser 2008). Motory se zápalným paprskem jsou výhodné zejména u instalací s menším výkonem, u nichž je pomocí této technologie dosaženo elektrické účinnosti až 43 % (Mrůzek 2011), další jejich výhodou je možnost kompenzace výkyvu kvality bioplynu změnou dávky zapalovacího oleje (Deublein a Steinhauser 2008).



Graf 3: Elektrická účinnost kogeneračních jednotek ([www.oze.tzb-info.cz](http://www.oze.tzb-info.cz))

Kogenerací získáme značné množství tepelné energie. Toto teplo bývá často využíváno k vytápění hospodářských či provozních budov daného podniku, což může být ovšem v některých případech komplikované, vzhledem k velikosti podniků, útlumu živočišné výroby a omezené potřeby tepla v letních měsících.

Aktuální znění zákona o podporovaných zdrojích energií podporuje pouze kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie při minimální celkové elektrické účinnosti 50 % ([www.biom.cz](http://www.biom.cz)). Pokud tedy není teplo efektivně využíváno a podmínka minimální účinnosti splněna, nebude takovému zdroji přiznána státní podpora. Řešením v takových případech může být realizace bioplynového potrubí a umístění KJ v blízkosti zástavby, čímž se zvýší podíl využitého tepla. Teplo může být využíváno i v letních měsících v rekreačních a výrobních objektech. Známé jsou realizace pro vytápění lázní (Třeboň), objektů pro chov exotických zvířat (langusty), skleníků, provoz sušáren zemědělských a přidružených potravinářských výrob a další.

#### Trigenerace

Současný zisk elektrické energie, tepla a chladu tzv. trigenerace dále rozšiřuje možnosti využití bioplynu. Teplo vzniklé spálením bioplynu v KJ je přeměněno za pomoci absorpční chladicí jednotky na chlad. I přes vyšší investiční náklady, poskytuje trigenerace provozovateli možnost vyšších zisků (úměrně zvýšení investice) dosažených za dobu životnosti zařízení ([www.vetrani.tzb-info.cz](http://www.vetrani.tzb-info.cz)).

#### **4.2.7.2 Využití bioplynu v palivových článcích**

V porovnání se spalováním dochází k okamžité chemické přeměně energie obsažené v bioplynu za vzniku elektrické energie. Palivový článek tvořený kapalným nebo pevným elektrolytem je umístěn mezi katodou a anodou. Reagují zde vodík a kyslík za vzniku vody. Před použitím bioplynu v palivových článcích je potřeba odstranit sirovodík a oxid uhličitý (Deublein a Steinhauser 2008). Palivový článek garantuje vysokou účinnost až 50 %, z důvodu jeho nákladnosti není ovšem zatím rozšířen.

#### **4.2.7.3 Čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu**

Na rozdíl od Švédska či Spolkové republiky Německo není, tato forma využití bioplynu v podmínkách České republiky rozšířena. Úpravou na biometan je dosahováno

vysokého stupně využití bioplynu. V současnosti není výroba biometanu dotačně podporována, což je důvod proč doposud nedošlo k nárůstu počtu realizací zařízení pro úpravu bioplynu na biometan.

Nejčastější metody úpravy bioplynu:

- **Metoda tlakové vodní vypírky**  
Adsorpční metoda, při které se molekuly CO<sub>2</sub> váží na molekuly vody. V reagenční tlakové komoře s pracovním tlakem 8–10 bar a teplotou 20–25 °C postupují obě média proti sobě. Vlivem tlakových změn se mění parciální tlaky jednotlivých plynů a CO<sub>2</sub> se zachycuje ve vodě. Využíváno dvoustupňově, výsledný obsah metanu v bioplynu cca 97 %.
- **Metoda tlakových změn**  
Před vlastní úpravou je nutné odsíření, následné stlačení bioplynu v adsorpční komoře při tlaku 8–10 bar. CO<sub>2</sub> se při tomto tlaku váže na molekuly aktivního uhlí nebo adsorpční „síta“ na jeho bázi.
- **Metoda nízkotlaké absorpce**  
Jedná se o chemickou reakci, v adsorpční koloně proti sobě postupují bioplyn a adsorpční materiál (dusíkatá sloučenina s obchodním názvem COAAB).

(Kára et al. 2009)

Upravený bioplyn o vysokém obsahu metanu lze využít v dopravě, zejména k pohonu vozidel městské dopravy a zemědělské techniky. Ve Švédsku a Švýcarsku je několik desítek takovýchto realizací na čistírenských BPS, v Rakousku a Spolkové republice Německo probíhá vyhodnocení tohoto využití u zemědělských BPS (Kára et al. 2009).

#### ***4.2.7.4 Produkce elektrické energie pomocí plynové turbíny***

Kompresorem stlačený vzduch společně s bioplynem je přiváděn do spalovací komory, kde je vzniklá směs spálena. Spaliny jsou odvedeny k turbíně, kde expandují a předávají svou kinetickou energii. Pohyb turbíny zajišťuje provoz kompresoru a elektrického generátoru umístěných na stejné hřídeli. Zbylou tepelnou energii spalin, spaliny opouštějí prostor turbíny při teplotě cca 400–600 °C, lze využít k vytápění, či predehřívání nasávaného vzduchu (Deublein a Steinhauser 2008). I zde je potřeba odstranění sirovodíku z bioplynu před jeho použitím v turbíně.

Nižší vzniklé emise, široký rozsah obsahu metanu v bioplynu jsou výhodami použití plynových turbín. Účinnost plynových turbín je ovšem poměrně nízká, 15–28 %. Slibným řešením se jeví kombinace plynové a parní turbíny, dosahující celkové účinnosti 50 % (Deublein a Steinhauser 2008).

#### **7.2.7.5 Využití fermentačního zbytku**

Fermentační zbytek vzniklý ze statkových hnojiv a objemných krmiv je možné po splnění kvalitativních parametrů na organické hnojivo typu 18.1 (minimální obsahy spalitelných látek 25 %, a dusíku 0,6 %) daných zákonem o hnojivech č. 156/1998 Sb. a vyhlášky č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva použít jako hnojivo pro vlastní potřebu na zemědělské půdě bez ohlášení a registrace. Je-li ovšem takto vzniklý fermentační zbytek uváděn do oběhu, je nutné jeho ohlášení či registrace, v závislosti na tom zdali odpovídá typu 18.1 či nikoli. Fermentační zbytek vzniklý z jiných než výše uvedených vstupů je nutné před jeho použitím na zemědělské půdě registrovat.

Fermentační zbytek lze rovněž využít pro výrobu kompostů. Tento postup je obvykle využíván u tzv. netekuté fermentace, při níž má vzniklý fermentační zbytek vysoký obsah sušiny. U tekuté fermentace lze použít ke kompostování oddělenou pevnou složku fermentačního zbytku tzv. separát.

## 5 BIOPLYNOVÉ STANICE, ROZDĚLENÍ A TECHNOLOGIE

Rozdělení dle původu zpracovaného substrátu

- Zemědělské – vstupní substráty rostlinného charakteru a statková hnojiva
- Čistírenské – anaerobní stabilizace čistírenského kalu, součást ČOV
- Ostatní – zpracování vybraných bioodpadů uvedených v zákoně o odpadech, případně substráty uvedené u předchozích BPS

Rozdělení dle obsahu sušiny zpracovaného substrátu

- BPS zpracovávající tekuté substráty – obsah sušiny v rozmezí 5–15 %
- BPS zpracovávající netekuté substráty – obsah sušiny v rozmezí 15–30 %

Rozdělení dle počtu procesních stupňů

- Jednostupňová
- Dvoustupňová
- Třístupňová

Rozdělení dle procesní teploty

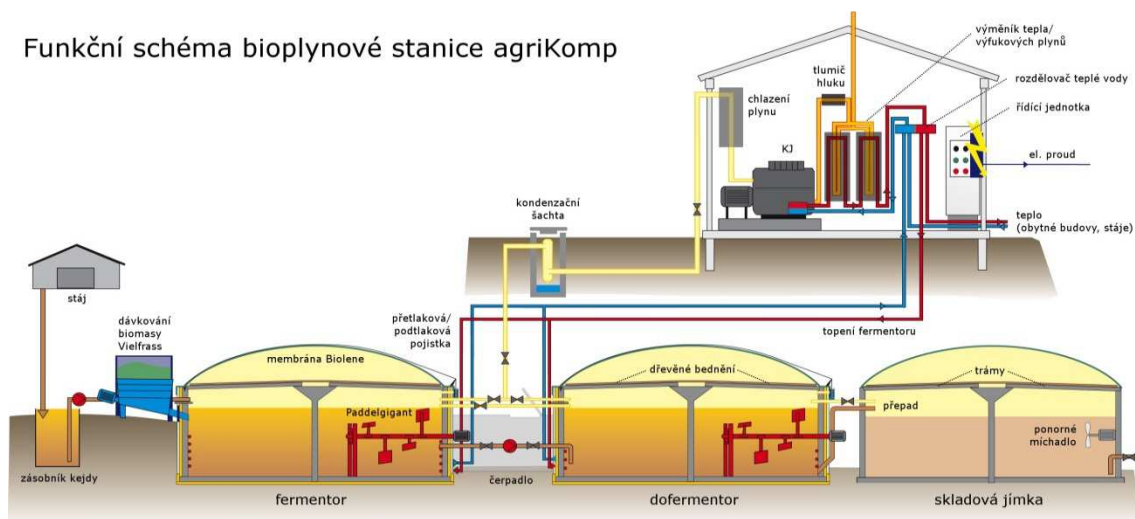
- Mezofilní
- Termofilní

### 5.1 Zemědělské BPS

Nejrozšířenější typ BPS zpracovávající převážně tekuté substráty. Obsah sušiny substrátu (5–15 %) je omezen ekonomickými náklady na provoz těchto zařízení. Při velmi nízké sušině dochází ke zvýšeným nákladům na ohřev a čerpání fermentovaného materiálu při nízké produkci bioplynu. Vysoký obsah sušiny znamená riziko nedostatečné homogenity teplotní a materiálové, hrozbu tvorby krust. Preventivní opatření spočívající ve zvýšené intenzitě míchání sebou přináší zvýšené náklady na provoz zařízení.

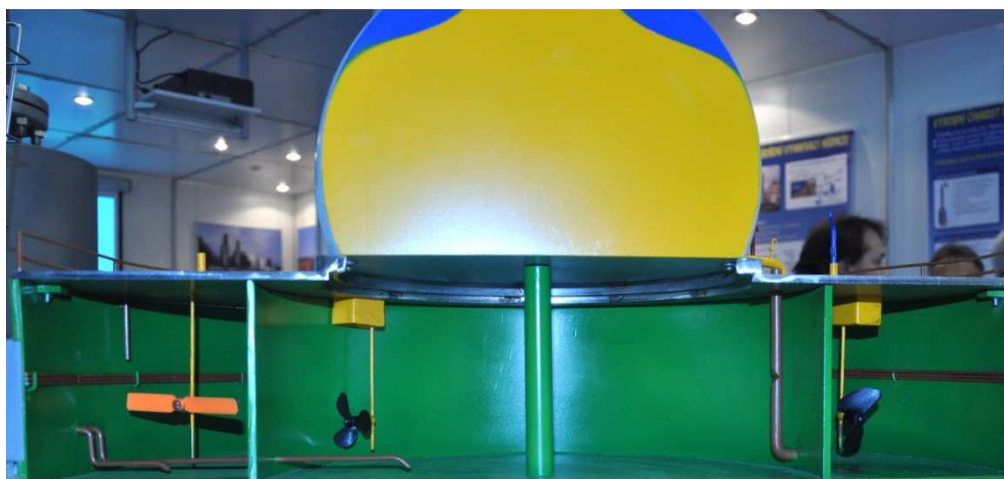
Využívány jsou jak jednostupňové tak vícestupňové systémy s kontinuálním provozem (Obr. 4).

Funkční schéma bioplynové stanice agriKomp



Obr. 4: Schéma vícestupňové zemědělské BPS na tekuté substráty s využitím bioplynu v KJ ([www.agrikomp.cz](http://www.agrikomp.cz))

Fermentory jsou realizovány samostatně nebo jsou sdružovány do jednoho celku, technologie kruh v kruhu. U technologie kruh v kruhu vnější prstenec tvoří 1. fermentační stupeň, vnitřní kruh představuje 2. fermentační stupeň či naopak s plynojemem pro vzniklý bioplyn (Obr. 5). Častější je provoz v mezofilním teplotním režimu. Ve skladbě vstupních substrátů dominuje kukuřičná siláž a kejda hospodářských zvířat. Fermentační zbytek z těchto BPS je nejčastěji využíván jako hnojivo zemědělské půdy.



Obr. 5: Technologie kruh v kruhu (KH Kinetic), s vrtulovými míchadly a plynojemem v sekundárním fermentoru.

## 5.2 Čistírenské BPS

Historický první typ BPS, není zde primární cíl získání energie, ale stabilizace a snížení organického zatížení čistírenského kalu pomocí anaerobní fermentace. Hojně rozšířeny v ČR, více než 100 realizací v provozu. Výnosy bioplynu nedosahují výnosů zemědělských BPS, avšak i zde je bioplyn využíván kogenerací. Získaná elektrická a tepelná energie slouží k pokrytí potřeb provozu ČOV, případné přebytky dodávány do veřejné sítě.

## 5.3 Ostatní BPS

Vzhledem k charakteristice zpracovávaných substrátů jsou zde větší nároky na technologické části, BPS musí být vybavena pasterizační jednotkou, případně zařízením zpracovávajícím tepelně substráty dle legislativních požadavků, prostorem k čištění a desinfekci dopravních prostředků, kontejnerů a přepravních nádob před výjezdem dopravních prostředků ze zařízení. Nutnost kontrolovat parametry technologického procesu a sledovat předepsané ukazatele výstupů buď laboratoří vlastní, nebo jinou.

## 5.4 BPS na netekuté substráty

Je zde vyšší vstupní obsah sušiny substrátu než 15 %. Existuje několik technologických řešení netekuté fermentace.

### Technologie BIOFERM - Garážový typ netekuté BPS

Jedná se o diskontinuální typ BPS pracující v mezofilním režimu (Obr. 6). K zajištění stabilní produkce bioplynu je na BPS instalováno více reaktorů (garáží). Vstupní substrát je smíchán se zfermentovaným za účelem jeho inokulace a následně navezen do prostoru vyhřívaného, vzduchotěsného reaktoru. Reaktor je poté uzavřen vzduchotěsnými vraty. Materiál je skrácen perkolátním postřikem zajišťujícím potřebnou vlhkost substrátu a inokulaci anaerobní biomasou. Vzniklý bioplyn je odváděn mimo prostor reaktoru a jímán do plynového vaku.





*Obr. 6: Technologie BIOFERM: míchání substrátu (vlevo nahoře), navážení substrátu do reaktoru (vpravo nahoře), vzduchotěsná vrata reaktoru v pozadí další reaktor (vlevo dole), plynový vak (vpravo dole)*

### Technologie KOMPOGAS

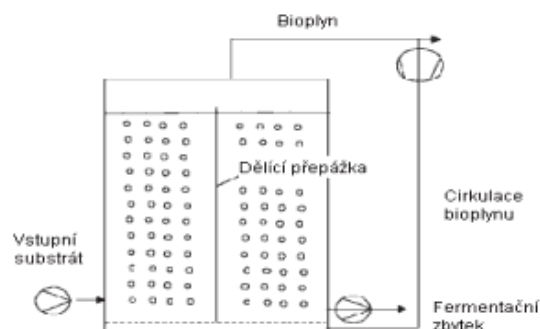
Vznikla za účelem zpracování biologicky rozložitelné složky komunálního odpadu. Na rozdíl od technologie BIOFERM je kontinuální, pracuje v termofilním režimu 55 °C a substrát je v horizontálním reaktoru míchán pomaloběžnými míchadly (Obr. 7). Před nadávkováním do reaktoru je substrát vytříděn a nadrcen. Doba zdržení je přibližně 14 dnů ([www.axpo-kompogas.ch](http://www.axpo-kompogas.ch)). Fermentační zbytek je využit k výrobě kompostu v přilehlé kompostárně, jež je součástí tohoto zařízení na biologické zpracování komunálního odpadu.



*Obr. 7: Technologie KOMPOGAS - nevytríděný vstupní substrát (vlevo nahoře), třídící linka (vpravo nahoře), Horizontální fermentory s míchadly (vlevo a vpravo dole)*

#### Technologie VALORGA

Vyvinuta za účelem zpracování biologicky rozložitelné složky komunálního odpadu, zbytků potravin a kalů (Obr. 8). Obsah sušiny fermentovaného substrátu je v rozmezí 25–35 %. Jednostupňová fermentace probíhá ve vertikálním fermentoru, díky čemuž je zajištěn gravitační pohyb substrátu bez nutnosti použití mechanických komponentů.



*Obr. 8 Schéma technologie Valorga (Deublin a Steinhauser 2008)*

Pro zajištění dokonalého promíchání substrátu je uprostřed reaktoru přepážka oddělující prostor reaktoru, způsobující horizontální pohyb obsahu směrem ode dna reaktoru (Deublein a Steinhauser 2008).

## 6 CÍL PRÁCE

Cílem této práce bylo ověření produkce bioplynu, resp. metanu nových energetických hybridů kukuřice a čiroku. Testované hybridy byly vyšlechtěny za účelem jejich použití pro produkci bioplynu. Čirok se jeví jako vhodná alternativa silážní kukuřice.

Cílem je zjistit, zdali je možné v podmínkách České republiky dosáhnout takových výnosů odpovídající kvality čirokové siláže pro efektivní použití při produkci bioplynu na zemědělských BPS využívajících cíleně pěstovanou biomasu a tím doplnit skaldbu krmné dávky BPS o tuto plodinu. Sledovány byly mezidruhové a meziplodinové charakteristiky produkce bioplynu, resp. metanu. Testovaný materiál byl sklizen ve vegetačním stádiu nejvhodnějším pro jeho použití pro produkci bioplynu. Po sklizni z polních pokusných ploch byl materiál zasilážován do mikrosilážních nádob. Po uplynutí doby nutné pro průběh silážovacího procesu proběhly laboratorní fermentační testy.

Byla použita metoda kvalitativně-quantitativní laboratorní analýzy, při které byly použity vsázkové laboratorní reaktory. Ze zjištěných hodnot byla stanovena měrná a plošná produkce metanu testovaných energetických odrůd kukuřice a čiroků. Zjištěné výsledky byly statisticky vyhodnoceny, provedena analýza ANOVA a porovnány s výsledky ostatních autorů.

## 7 MATERIÁL A METODIKA

### 7.1 Testované substráty

Byly testovány nové energetické hybridy kukuřice a čiroků vyšlechtěné firmou KWS za účelem produkce bioplynu. Testované hybridy byly sklizeny v letech 2010 a 2011 (Tab. 7).

Tab. 7: Charakteristika testovaných hybridů

| <b>Hybridy kukuřice</b> |              |                                    |
|-------------------------|--------------|------------------------------------|
| Atletico                | FAO S 280    | Tříliniový hybrid                  |
| Cassilas                | FAO S 260    | Dvouliniový hybrid                 |
| Fernandez               | FAO S 270    | Dvouliniový hybrid                 |
| <b>Hybridy čiroků</b>   |              |                                    |
| Maja                    | Raný         | <i>Sorghum Bicolor</i>             |
| Freya                   | Raný         | <i>Sorghum Bicolor x Sudanense</i> |
| Zerbeus                 | Středně raný | <i>Sorghum Bicolor</i>             |

V roce 2010 pocházel testovaný materiál z lokality Švábenice (okr. Vyškov, řepařská výrobní oblast, 382 m n. m.), v roce 2011 z lokality Dolní Heřmanice (okr. Žďár nad Sázavou, bramborářská výrobní oblast, 478 m n. m.). Agrotechnické údaje jsou uvedeny v Tab. 8. Teplotní a srážkové charakteristiky pokusných lokalit jsou uvedeny v příloze (Obr. 10, Obr. 11).

Tab. 8: Agrotechnické údaje

|                         |                    | 2010                                 | 2011                                      |
|-------------------------|--------------------|--------------------------------------|---|
|                         |                    | Švábenice                            | Dolní Heřmanice                           |
| Setí kukuřice           |                    | 20. 4.                               | 27. 4.                                    |
| Setí čirok              |                    | 9. 6.                                | 14. 5.                                    |
| Sklizeň kukuřice, čirok |                    | 20. 9.                               | 22. 9.                                    |
| Délka vegetace kukuřice |                    | 154 dnů                              | 149 dnů                                   |
| Délka vegetace čiroku   |                    | 104 dnů                              | 132 dnů                                   |
| Výsevek kukuřice        |                    | 95 200 · ha <sup>-1</sup>            | 88 900 · ha <sup>-1</sup>                 |
| Výsevek čirok           |                    | 190 000 · ha <sup>-1</sup>           | 190 000 · ha <sup>-1</sup>                |
| Hnojení                 | Fermentační zbytek | 20 m <sup>3</sup> · ha <sup>-1</sup> |   |
|                         | Močovina           | 200 kg · ha <sup>-1</sup>            | 300 kg (46 N)                             |
|                         | Amofos             | 100 kg · ha <sup>-1</sup>            | 150 kg · ha <sup>-1</sup> (12 N – 52 P)   |
|                         | Kamex              |                                      | 200 kg · ha <sup>-1</sup> (40 K – 5,5 Mg) |
|                         | Hnůj podzim        |                                      | 30 000 kg · ha <sup>-1</sup>              |

Nařezaný a zasilážený substrát dodala firma KWS po jeho sklizni v mikrosilážních nádobách. Přístup vzduchu byl zamezen vrstvou oleje ve víku nádoby (Obr. 9).



Obr. 9: Mikrosilážní nádoby

Po uplynutí doby nutné pro průběh silážovacího procesu bylo zahájeno testování energetických hybridů.

## 7.2 Použité přístroje a vybavení

Laboratorní testy byly provedeny v Laboratoři bioplynových transformací Ústavu zemědělské, potravinářské a environmentální techniky Agronomické fakulty Mendelovy univerzity v Brně. K testování byly použity vsázkové laboratorní reaktory o provozním objemu 0,12 m<sup>3</sup> (Obr. 10).



*Obr. 10: Laboratoř bioplynových transformací s testovacími reaktory*

Reaktory jsou konstruovány tak, aby simulovaly podmínky provozní BPS. Jsou vybaveny otopným a míchacím systémem, sondami pro měření pH, teploty, odběr vzorků a dávkovací sondou. Během provedených fermentačních testů bylo použito uvedené laboratorní vybavení:

Membránový plynoměr BK G4 – měření množství vzniklého bioplynu

Analyzátor plynu Dräger X-am7000 – měření koncentrace CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, O<sub>2</sub>

Laboratorní váhy RADWAG AS 220/C/2 – vážení vzorků

Elektrická sušárna KBS G 100 – stanovení sušiny

Muflová pec LMH 07/12 – stanovení obsahu organických látek v sušině

pH sonda WTW 315i – stanovení pH

Titrační aparatura – stanovení FOS/TAC

### 7.3 Metodika testování

Siláže hybridů kukuřice a čiroků byly kofermentovány s inokulačním materiálem pocházejícím z BPS Čejč. BPS Čejč je zemědělská BPS zpracovávající kukuřičnou siláž a kejdu prasat.

Při zahájení testů bylo inokulum odebráno z reaktoru BPS a ihned po jeho převozu nadávkováno v množství 100 l do vytemperovaných laboratorních reaktorů (39,5 °C). Současně proběhl odběr vzorků inokula a siláží potřebných pro vstupní analýzy, poté byly reaktory uzavřeny.

Vstupními analýzami se stanovil v inokulačním materiálu obsah sušiny, organických látek v sušině, pH a FOS/TAC. U testovaných siláží se stanovil obsah sušiny a organických látek v sušině. Obsah sušiny byl stanoven dle normy ČSN EN 14 346:2007, ze zhomogenizovaného vzorku v sušárně za teploty 105 °C po dobu 12 hodin. Takto vysušený vzorek byl zvážen a umístěn do muflové pece při teplotě 595 °C po dobu 6 hodin pro stanovení obsahu organických látek v sušině.

Stanovení FOS/TAC bylo provedeno titrací 0,1 N kyselinou sírovou. Postup analýzy je následující. Zkušební vzorek o objemu 20 ml, získány přefiltrováním přes čajové sítko titrujeme na magnetickém míchadle, do dosažení hodnoty pH 5. Po jejím dosažení a ustálení odečteme z byrety spotřebované množství kyseliny. Pokračujeme v titraci do dosažení pH 4,4. Po ustálení odečteme spotřebované množství kyseliny. Dosadíme hodnoty spotřebované kyseliny do níže uvedených rovnic (5), vypočteme hodnoty FOS, TAC a jejich vzájemný poměr:

$$\begin{aligned}TAC &= A \cdot 250 \text{ [mgCaCO}_3\text{/l]} \\FOS &= ((B \cdot 1,66) - 0,15) \cdot 500 \text{ [mg/LHAc]}\end{aligned}\tag{5}$$

Kde:

- A spotřeba H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> od počátku titrace po pH 5
- B spotřeba H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> od pH 5 po pH 4,4

Ze získaných hodnot vstupních analýz byla stanovena dávka siláží tak, aby nedošlo k přetížení systému a inhibici fermentačního procesu. Výsledky analýz Fos/tac jsou uvedeny v příloze (Graf 20–23).

## Dávkování siláže

Následující den po nadávkování inokula byly do reaktorů přidány testované siláže v takovém množství, aby výsledná sušina fermentované směsi v reaktoru byla rovna 6 %. Jeden reaktor fungoval jako kontrola bez přídavku siláže, aby bylo možné stanovit měrné produkce bioplynu a metanu hybridů vztažených na kilogram přidané organické sušiny.

Denně byla zjišťována kvalita, kvantita vzniklého bioplynu, teplota materiálu, v pravidelných intervalech hodnoty FOS/TAC a pH pro zjištění stavu a zatížení biologického systému ve směsi. Množství bioplynu odečtené z průtokových plynoměrů bylo přepočteno na normálové podmínky teploty a tlaku (0 °C,  $1,01325 \cdot 10^5$  Pa) pomocí upravené stavové rovnice ideálního plynu (6):

$$\begin{aligned} p \cdot V &= n \cdot R \cdot T \\ \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} &= \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} \\ V_N &= V_1 \cdot \frac{T_N}{T_1} \cdot \frac{p_1}{p_N} \end{aligned} \quad (6)$$

Kde:

$P_1$  naměřený tlak [Pa]

$p_N$  normální tlak [Pa]

$V_1$  odečtený objem bioplynu [ $m^3$ ]

$V_N$  normální objem bioplynu [ $m^3$ ]

$T_1$  naměřená teplota [K]

$T_N$  normální teplota [K]

Na základě hektarových výnosů suché hmoty a zjištěné specifické produkce metanu byla stanovena hektarová produkce bioplynu a metanu testovaných hybridů. Délka fermentačních testů byla u všech opakování 26 dní, při teplotě 39,5 °C.

Během dvouletého testování bylo provedeno celkem 6 opakování, 3 ze sklizně v roce 2010 a 3 ze sklizně v roce 2011.

Výsledky získané v těchto testech byly statisticky zpracovány v programu STATISTICA. Zjišťována byla statistická průkaznost produkcí metanu jednotlivých hybridů a meziplodinové rozdíly pomocí analýzy ANOVA, dále minima, maxima, průměry a směrodatné odchylky.



## 8 VÝSLEDKY A DISKUSE

### 8.1 Výsledky vstupních analýz substrátů

V níže uvedené tabulce (Tab. 9) jsou uvedeny výsledky provedených vstupních analýz použitých substrátů. Mezi silážemi sklizenými v roce 2010 a 2011 je rozdíl v obsahu sušiny. U kukuřičných hybridů byl v roce 2010 zjištěn vysoký obsah sušiny přesahující 35 %, zatímco v roce 2011 se obsah sušiny pohyboval v rozmezí 27–29 %.

U čiroků se obsah sušiny v roce 2010 pohyboval v rozmezí 23–26 %, což je méně než minimální hodnota pro optimální průběh silážovacího procesu uvádějící pro silážování bez ztrátových průsaků vody (Doležal et al. 2012). V roce 2011 byly obsahy sušiny vyšší, a to v rozmezí 27–30 %. Výrazně nižší obsah sušiny u čiroků sklizených v roce 2010 lze přičíst kratší vegetační době, z důvodu pozdějšího výsevu. Obsahy organických látek v sušině byly u všech hybridů kukuřice i čiroků v obou ročnících vyrovnané.

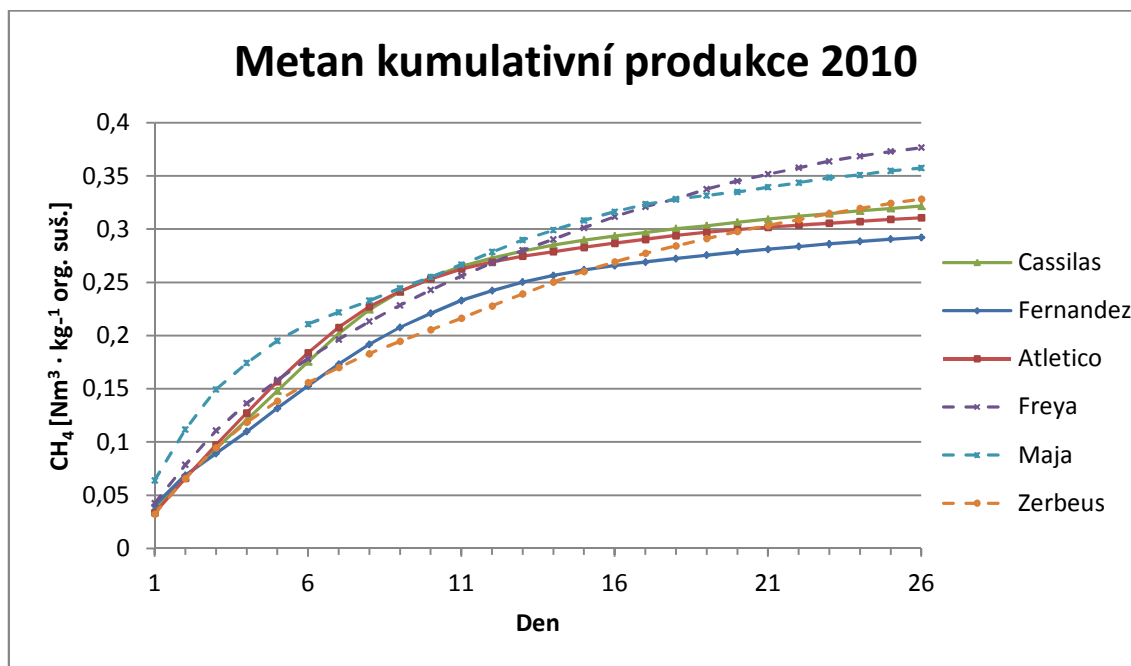
Tab. 9: Vstupní charakteristika substrátů

|             | Obsah sušiny [%] | Obsah org. l.<br>v sušině [%] | pH   | FOS/TAC | Dávka siláže<br>[kg org. suš.] |
|-------------|------------------|-------------------------------|------|---------|--------------------------------|
| <b>2010</b> |                  |                               |      |         |                                |
| Test 1      |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum    | 3,50             | 72,94                         | 8,05 | 0,18    |                                |
| Cassilas    | 38,20            | 95,93                         | 3,81 |         | 2,834                          |
| Fernandez   | 37,31            | 95,91                         | 3,78 |         | 2,871                          |
| Test 2      |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum    | 3,78             | 72,94                         | 8,05 | 0,13    |                                |
| Cassilas    | 35,32            | 95,67                         | 3,84 |         | 2,525                          |
| Fernandez   | 37,07            | 95,98                         | 3,82 |         | 2,546                          |
| Atletico    | 37,34            | 95,73                         | 3,82 |         | 2,520                          |
| Test 3      |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum    | 4,31             | 72,94                         | 8,20 | 0,1     |                                |
| Atletico    | 36,48            | 95,81                         | 3,85 |         | 1,922                          |

|           | Obsah sušiny [%] | Obsah org. l.<br>v sušině [%] | pH   | FOS/TAC | Dávka siláže<br>[kg org. suš.] |
|-----------|------------------|-------------------------------|------|---------|--------------------------------|
| Freya     | 24,19            | 91,18                         | 3,94 |         | 1,147                          |
| Maja      | 23,16            | 94,43                         | 3,78 |         | 1,203                          |
| Zerbeus   | 24,37            | 91,75                         | 3,91 |         | 1,111                          |
| Test 4    |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum  | 6,08             | 76,31                         | 7,98 | 0,13    |                                |
| Freya     | 26,64            | 91,59                         | 3,84 |         | 1,147                          |
| Maja      | 22,52            | 94,23                         | 3,82 |         | 1,263                          |
| Zerbeus   | 23,64            | 92,26                         | 3,82 |         | 1,211                          |
| 2011      |                  |                               |      |         |                                |
| Test 5    |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum  | 4,53             | 73,91                         | 8,00 | 0,11    |                                |
| Cassilas  | 27,78            | 96,08                         | 4,10 |         | 1,866                          |
| Fernandez | 29,28            | 96,63                         | 4,08 |         | 1,850                          |
| Atletico  | 27,82            | 95,84                         | 4,11 |         | 1,861                          |
| Test 6    |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum  | 4,07             | 73,14                         | 8,04 | 0,11    |                                |
| Cassilas  | 29,46            | 96,24                         | 4,04 |         | 2,322                          |
| Fernandez | 29,31            | 95,86                         | 4,02 |         | 2,316                          |
| Atletico  | 28,83            | 95,79                         | 4,08 |         | 2,324                          |
| Test 7    |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum  | 6,32             | 74,94                         | 7,99 | 0,12    |                                |
| Freya     | 30,10            | 95,34                         | 3,98 |         | 1,494                          |
| Maja      | 29,22            | 95,46                         | 4,02 |         | 1,512                          |
| Zerbeus   | 27,04            | 95,12                         | 4,00 |         | 1,548                          |
| Test 8    |                  |                               |      |         |                                |
| Inokulum  | 4,63             | 74,94                         | 8,14 | 0,17    |                                |
| Freya     | 30,81            | 95,34                         | 4,01 |         | 1,627                          |
| Maja      | 29,37            | 95,46                         | 3,96 |         | 1,648                          |
| Zerbeus   | 27,83            | 95,12                         | 3,99 |         | 1,666                          |

## 8.2 Výsledky testování ročník 2010

V roce 2010 byla zjištěna vyšší měrná produkce metanu vztahovaná na kilogram přidané organické hmoty (Graf 4) u hybridů čiroků (přerušované čáry) než u hybridů kukuřice (plné čáry). Produkce metanu zobrazených v grafech jsou průměry tří opakování.

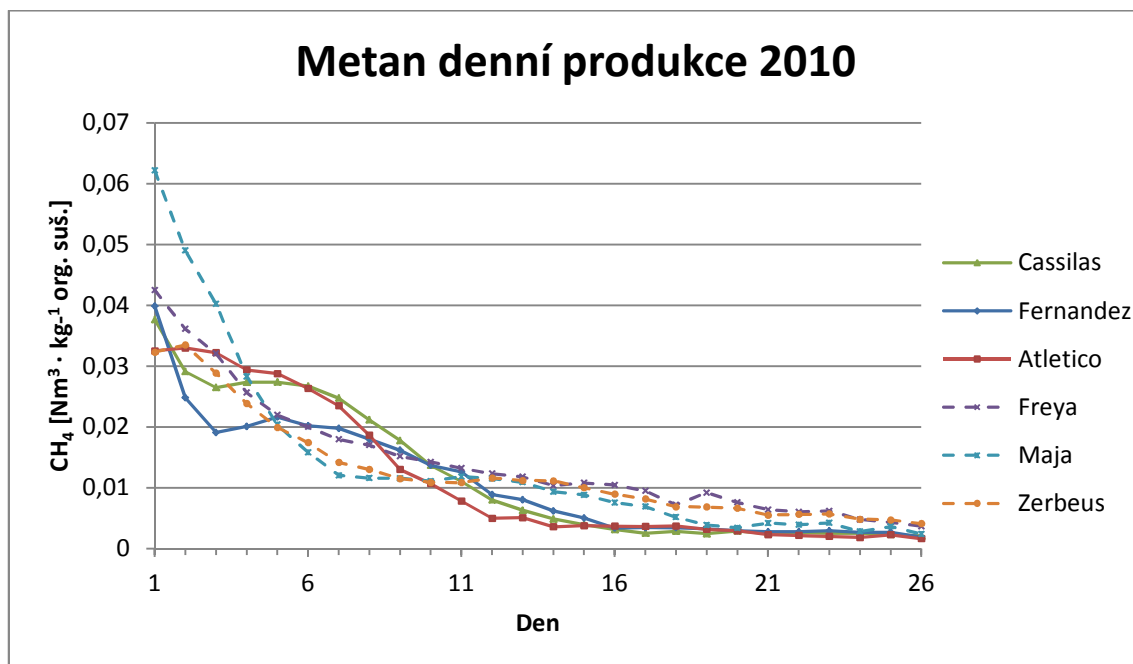


Graf 4: Kumulativní produkce metanu 2010

Z hodnot denní produkce metanu byla zjištěna rozdílná dynamika produkce metanu hybridů kukuřice a čiroku. Pro kukuřici byla charakteristická vysoká a stabilní produkce metanu na počátku testů, kdy následoval pokles a od 16. dne testu došlo k jejímu ustálení. Pro čiroky byl charakteristický počáteční pokles vysoké produkce metanu, avšak již přibližně od 6. dne testu došlo k jejímu ustálení a od 11. dne testu byly produkce čiroků vyšší ve srovnání s hybridy kukuřice. Nejvyšší produkce metanu v roce 2010 dosáhl hybrid Freya následován hybridem Maja, Zerbeus, Cassilas, Atletico a Fernandez. Hodnoty produkcí metanu jsou uvedeny v (Tab. 10).

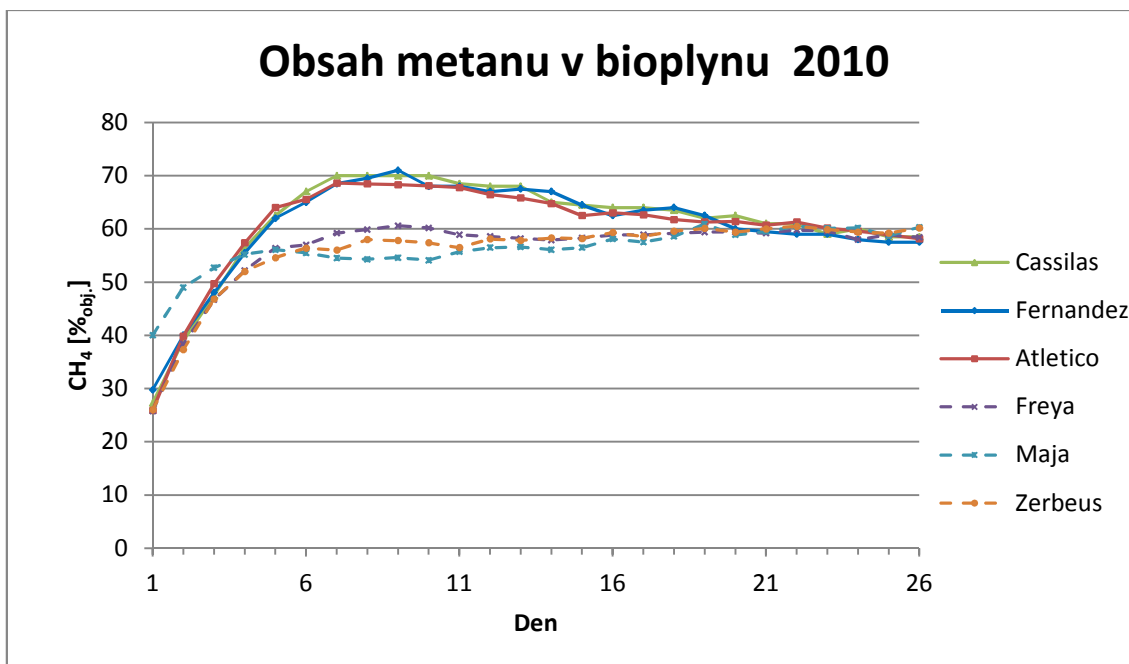
Tab. 10: Měrné produkce metanu 2010

| Hybrid    | CH <sub>4</sub> [Nm <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> org. suš.] |
|-----------|--|
| Cassilas  | 0,3216   |
| Fernandez | 0,2922   |
| Atletico  | 0,3107   |
| Freya     | 0,3766   |
| Maja      | 0,3628   |
| Zerbeus   | 0,3283   |



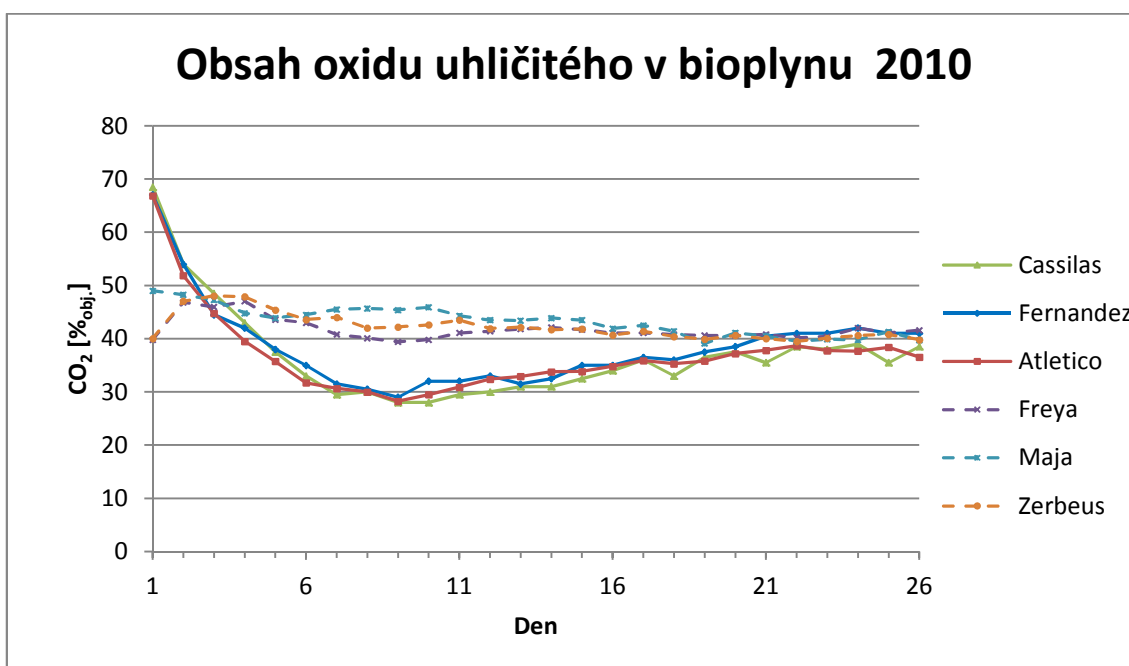
Graf 5: Denní produkce metanu 2010

Obsah metanu v bioplynu byl v daném roce vyšší u hybridů kukuřice, kdy dosáhl vysokých hodnot oscilujících kolem hodnoty 70 % v období 7–10. dne testů.

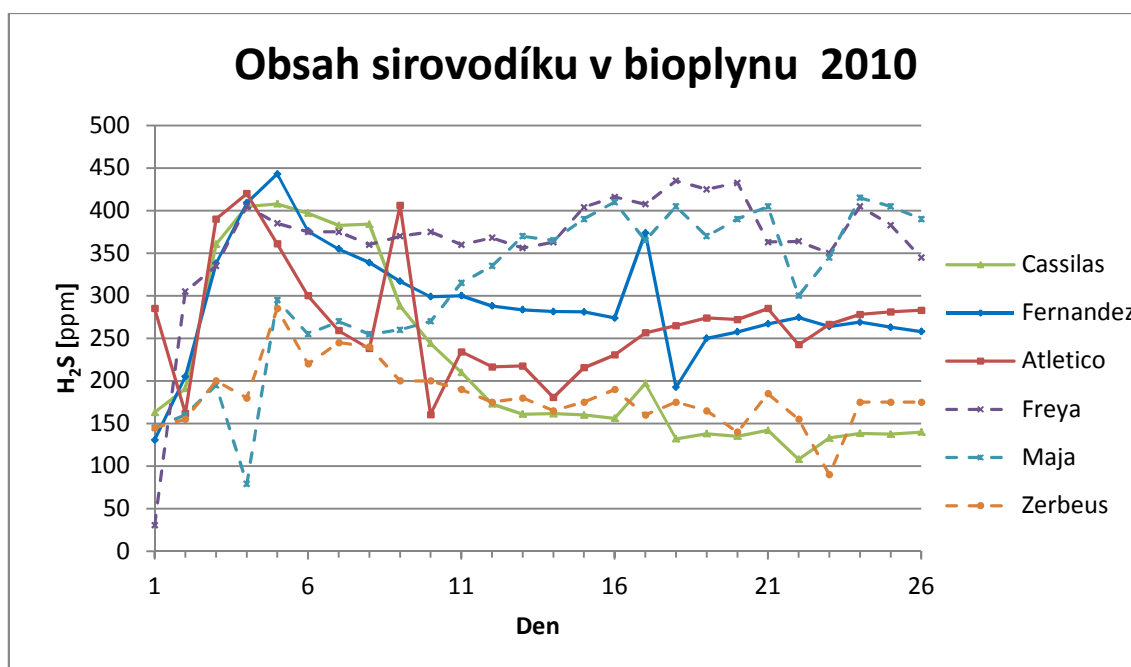


Graf 6: Obsah metanu v bioplynu 2010

Další sledované kvalitativní parametry vykazovaly dynamiku obvyklou pro použitou vsázkovou technologii. U oxidu uhličitého došlo po ustálení anaerobních podmínek a rozvoji anaerobní biomasy k poklesu a stabilizaci jeho obsahu.



Graf 7: Obsah oxidu uhličitého v bioplynu 2010



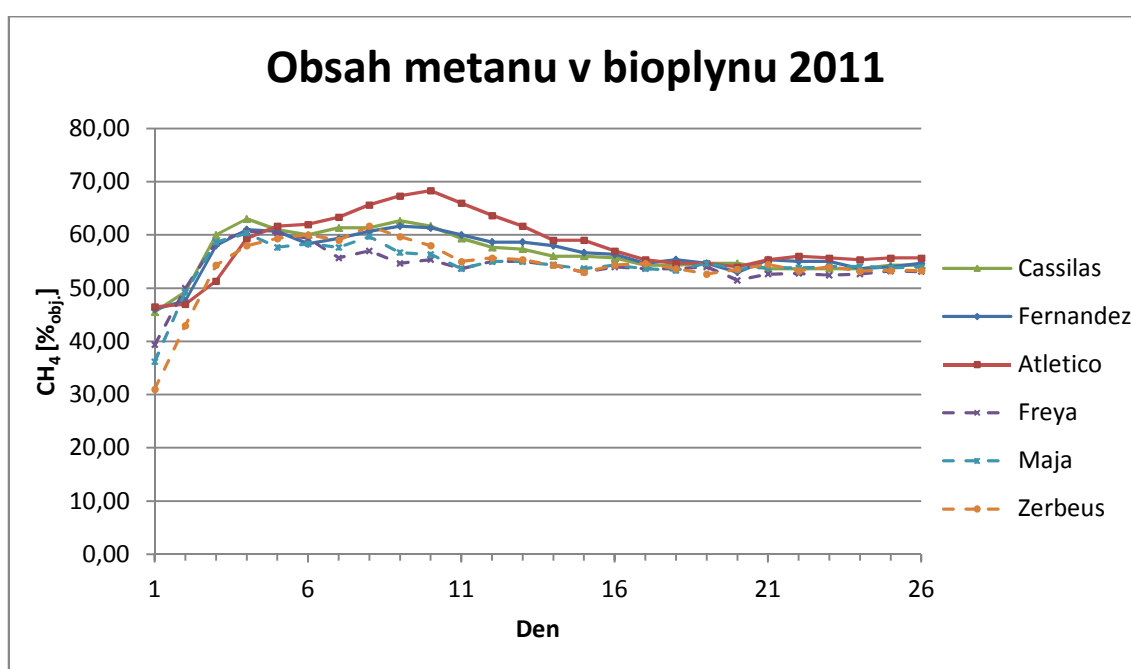
Graf 8: Obsah sirovodíku v bioplynu 2010

### 8.3 Výsledky testování 2011

U materiálu sklizeného v roce 2011 byl zjišťován kromě výše uvedených kvalitativních parametrů také obsah, cukrů a kyseliny octové v sušině (Tab. 11). Na základě obsahu kyseliny octové, která je prekurzorem metanu, je možné odhadovat vhodnost daného substrátu pro produkci bioplynu. Obsahy kyseliny octové byly vyšší u hybridů čiroku. Zjištěnou odlišnou dynamiku produkce metanu kdy kukuřice rychle dosahuje vysokých hodnot, zatímco u čiroku je produkce vyrovnanější, lze vysvětlit výše uvedeným rozdílným složením kukuřice a čiroku. Vysokou produkci metanu u kukuřice v počáteční fázi testu lze vysvětlit právě zvýšeným obsahem snadno rozložitelné, energeticky bohaté glukózy. Po přidání glukózy se efekt zvýšené produkce bioplynu projeví velmi rychle, přibližně po 5 až 6 hodinách po přidání k fermentované směsi dochází k výraznému nárustu produkce bioplynu (Demirel et al. 2010). Obsahy složitějších cukrů (xylóza, arabinóza) byly u hybridů kukuřice a čiroků vyrovnané.

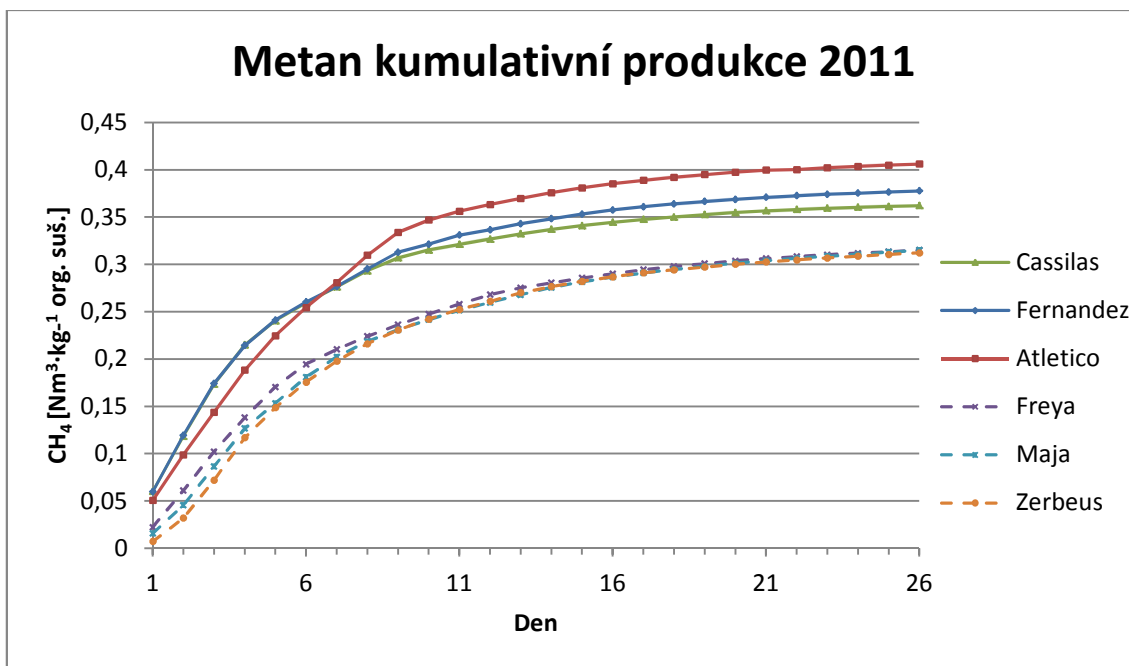
Tab. 11: Výsledky strukturní analýzy materiálů 2011

| Hybrid    | % sušiny   |         |        |           |             |
|-----------|------------|---------|--------|-----------|-------------|
|           | Popeloviny | Glukóza | Xylóza | Arabinóza | Kys. octová |
| Cassilas  | 3,76       | 48,41   | 15,39  | 1,75      | 3,33        |
| Fernandez | 4,14       | 50,57   | 13,02  | 1,76      | 2,84        |
| Atletico  | 4,24       | 52,04   | 11,41  | 1,81      | 2,89        |
| Freya     | 4,47       | 36,06   | 14,51  | 1,51      | 3,82        |
| Maja      | 4,50       | 29,66   | 13,64  | 1,25      | 4,04        |
| Zerbeus   | 4,56       | 31,60   | 15,98  | 1,51      | 4,01        |



Graf 9: Obsah metanu v bioplynu 2011

U materiálů sklizených v roce 2011 byl zjištěn vyrovnanější obsah metanu při srovnání jeho obsahu mezi hybridy čiroku a kukuřice. Lze konstatovat, že u hybridů kukuřice s výjimkou Atletica, u něhož byla zjištěná dynamika obsahu metanu obdobná jako v předešlém roce, byl u hybridů Cassilas a Fernandez zjištěn nižší obsah metanu v bioplynu.



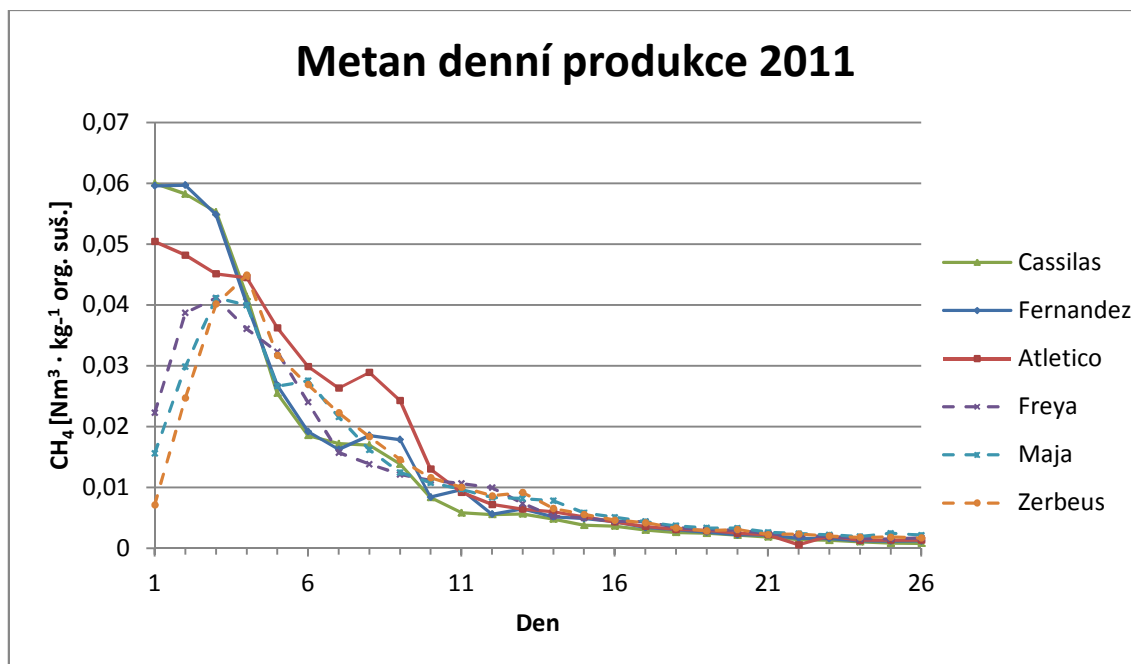
Graf 10: Kumulativní produkce metanu 2011

Velmi vyrovnaná a v porovnání s předcházejícím ročníkem nižší měrná produkce metanu byla v ročníku 2011 zjištěna u hybridů čiroku. Hybridy kukuřice dosáhly vyšších produkcí. Nejvyšší měrná produkce metanu v tomto ročníku byla dosažena u hybridu Atletico. Zjištěná měrná produkce Atletica byla nejvyšší za celou dobu dvouletého testování. Atletico následovaly hybridy Fernandez a Cassilas (Tab. 12). Mezi hybridy čiroku dosáhl nejvyšší měrné produkce metanu hybrid Maja, následovaný, Freyou a Zerbeusem

Tab. 12: Měrné produkce metanu 2011

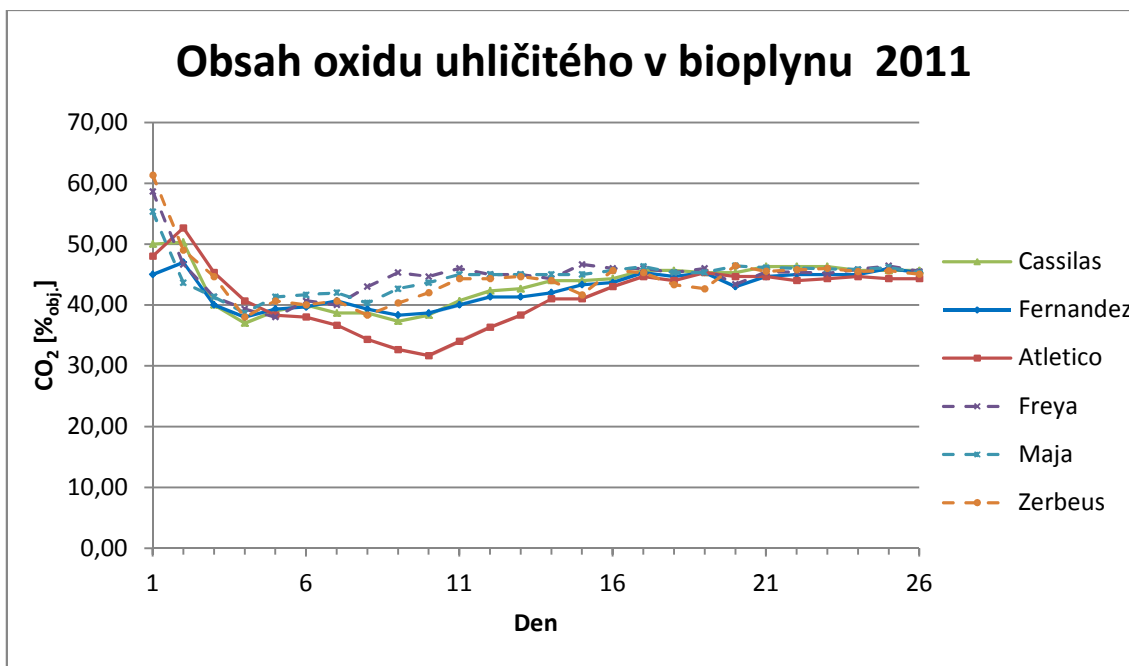
| Hybrid    | CH <sub>4</sub> [Nm <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> org. suš.] |
|-----------|--|
| Cassilas  | 0,3620   |
| Fernandez | 0,3777   |
| Atletico  | 0,4061   |
| Freya     | 0,3150   |
| Maja      | 0,3151   |
| Zerbeus   | 0,3122   |





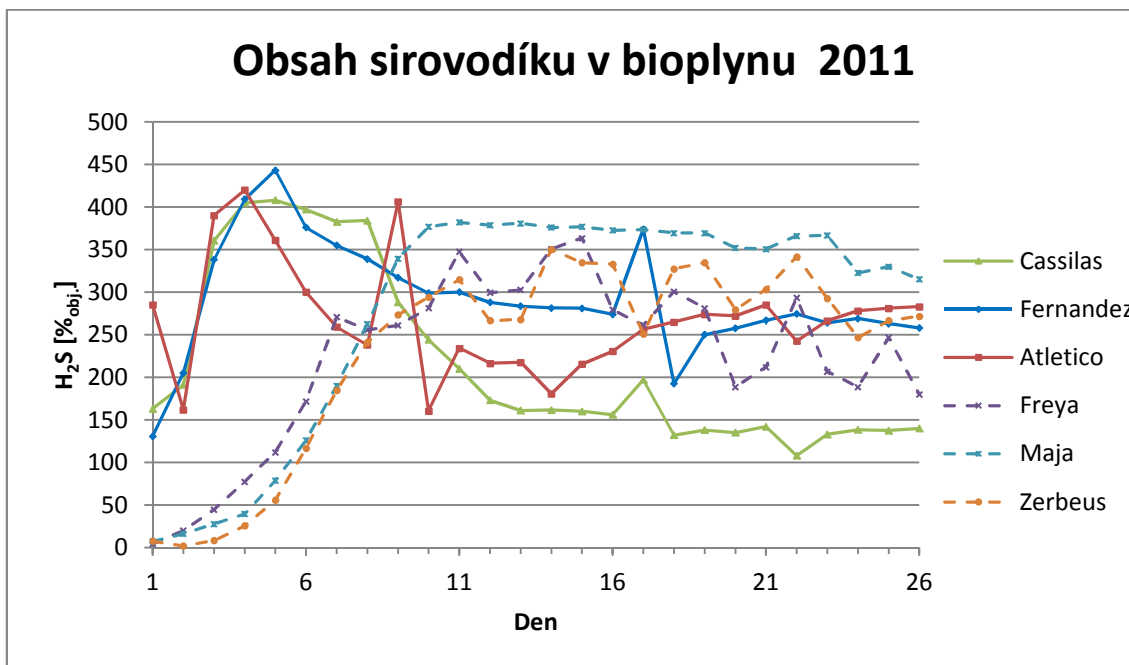
Graf 11: Denní produkce metanu 2011

Odrůdové rozdíly v dynamice produkce metanu se projevily i v ročníku 2011. Hybridy kukuřice charakterizovala počáteční vysoká produkce metanu s klesajícím trendem. Výjimkou byl hybrid Atletico, jehož vysoký obsah metanu v bioplynu na počátku testů měl vliv na vyšší produkci metanu, pokles produkce metanu u něj nebyl tak výrazný jako u Cassilase a Fernandez. U hybridů čiroku byly počáteční měrné produkce metanu nižší, měly ale rostoucí trend. Stejně jako u hybridů kukuřice byla u čiroků po 4. dni testů produkce metanu charakterizována klesajícím trendem, kdy dále docházelo k vyrovnávání produkcí mezi hybridy kukuřice a čiroku. Přibližně od 16. dne testů byly již mezidruhové i odrůdové rozdíly v produkci metanu minimální.



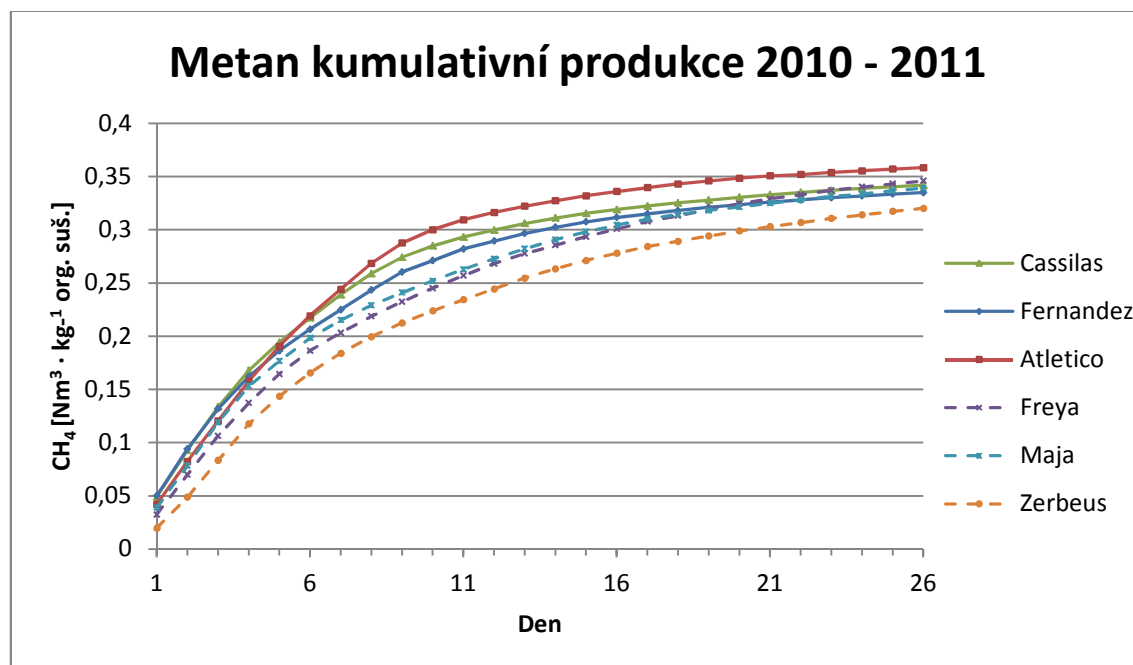
Graf 12: Obsah metanu v bioplynu 2011

Obsah oxidu uhličitého v bioplynu byl ve srovnání s předešlým ročníkem vyrovnanější, zejména u hybridů kukuřice, hodnoty jeho obsahu se pohybovaly v rozmezí 40–50 %.



Graf 13: Obsah sirovodíku v bioplynu 2011

Trend obsahu sirovodíku v bioplynu kopíroval produkci metanu, kdy u kukuřice již od počátku testů byly koncentrace sirovodíku vyšší, zatímco u čiroků docházelo k postupnému nárůstu obsahu sirovodíku spolu se zvyšující se produkcí metanu.

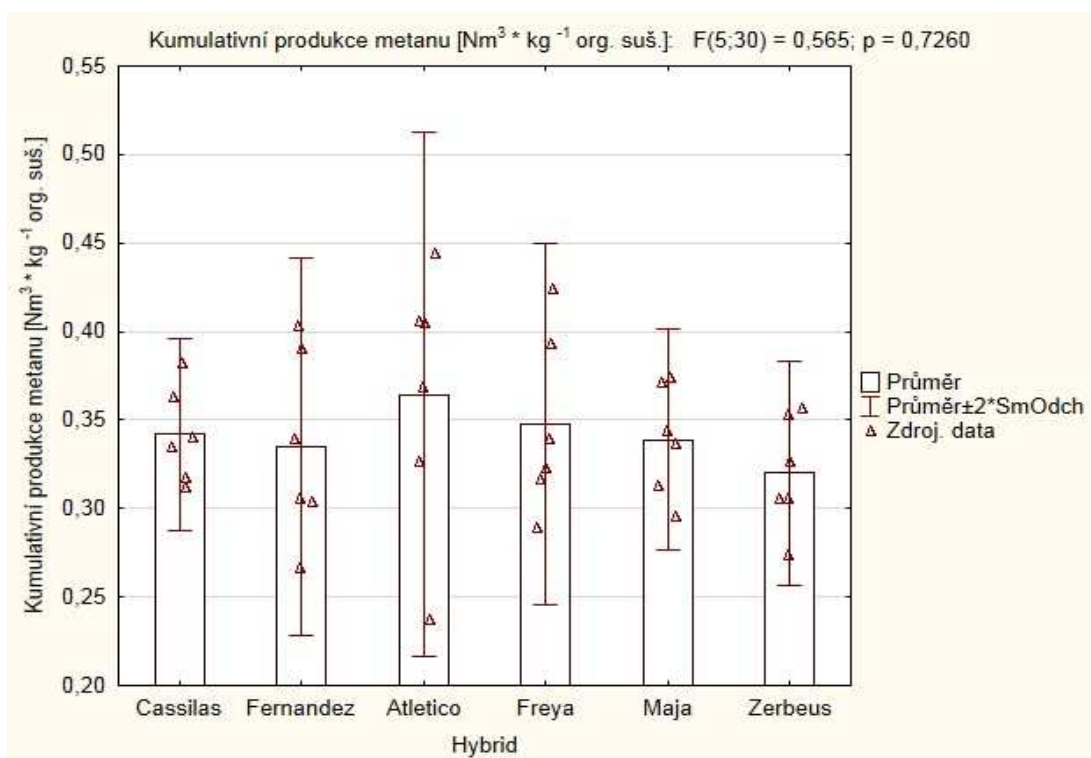


Graf 14: Kumulativní produkce metanu 2011

Na grafu č. 14 jsou zobrazeny průměrné kumulativní produkce (2010–2011) metanu dosažené v průběhu dvouletého testování. Výsledné kumulativní produkce testovaných hybridů jsou velmi vyrovnané, lze si povšimnout mezidruhové odlišnosti v jejím průběhu mezi hybridy kukuřice a čiroku v období 6–18. dne fermentačního testu.

Značnou variabilitou v dosažených produkcích metanu jsou charakterizovány hybridy kukuřice Fernandez a Atletico, z hybridů čiroku po-té Freya. Naopak stabilnější produkce byla charakteristická pro hybrid kukuřice Cassilas a čiroku Maja a Zerbeus.

## 8.4 Statistické vyhodnocení ročníků 2010–2011



Graf 15: ANOVA, Fischerův test, průměr, směrodat. odch., zdroj. data

Hybridy kukuřice dosáhly v průměru vyšších specifických produkcí metanu, avšak směrodatné odchylky jejich produkcí jsou vyšší než u čiroků (Graf 15, Tab. 13). Z tohoto pohledu lze na hybridu čiroků nahlížet jako na materiály s vyrovnanou produkcí metanu.

Tab. 13: Základní statistická data produkcí metanu

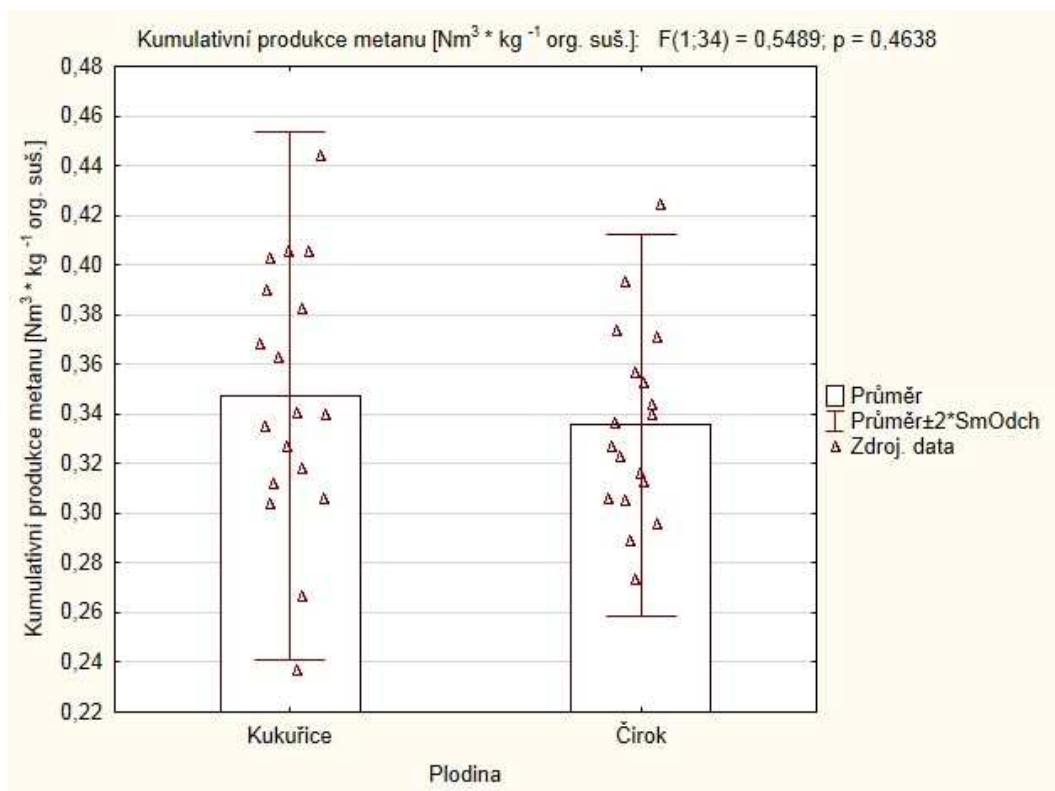
|           | Průměr   | Medián   | Minimum  | Maximum  | Rozptyl  | Směrodatná odchylka |
|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------------------|
| Cassilas  | 0,341820 | 0,337729 | 0,311816 | 0,382676 | 0,000727 | 0,026971            |
| Fernandez | 0,334932 | 0,322771 | 0,266937 | 0,403001 | 0,002832 | 0,053213            |
| Atletico  | 0,364502 | 0,386921 | 0,236988 | 0,443860 | 0,005474 | 0,073988            |
| Freya     | 0,347610 | 0,331195 | 0,289263 | 0,424190 | 0,002606 | 0,051049            |
| Maja      | 0,339011 | 0,340234 | 0,296082 | 0,373990 | 0,000962 | 0,031022            |
| Zerbeus   | 0,320242 | 0,316427 | 0,273683 | 0,356738 | 0,001005 | 0,031698            |

Nejvyšší produkce metanu dosáhl hybrid Atletico, následován hybridy Cassilas, Fernandez, Freya, Maja a Zerbeus. V podmínkách Spolkové republiky Německo byla zjištěna u hybridu Atletico produkce metanu  $0,380 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ org. suš.}$  Oslaj et al. 2010, zjistil nižší měrné produkce metanu v podmínkách Slovinské republiky u hybridů kukuřice klasifikace FAO 300 a to  $0,292 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ org. suš.}$  U čiroků dosáhl obdobných výsledků Mahmood 2012 v podmínkách Spolkové republiky Německo u hybridů Goliath a Bovital. Měrné produkce u uvedených hybridů čiroku se pohybovaly v rozmezí  $0,187\text{--}0,340 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ org. suš.}$  Analýzou ANOVA, Fischerův test nebyl na hladině alfa 0,05 zjištěn statisticky průkazný rozdíl mezi měrnými kumulativními produkcemi metanu testovaných hybridů (Tab. 14).

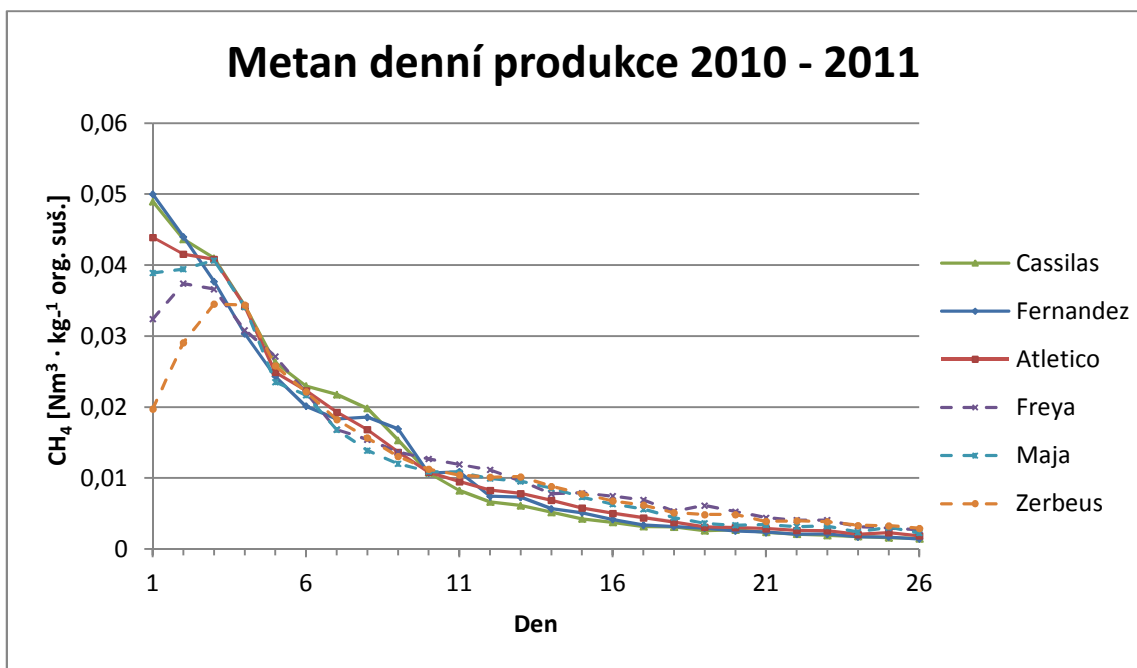
Tab. 14: ANOVA, Fischerův test kumulativní produkce metanu

|           | Cassilas | Fernandez | Atletico | Freya    | Maja     | Zerbeus  |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Cassilas  |          | 0,803889  | 0,415883 | 0,834614 | 0,919312 | 0,438712 |
| Fernandez | 0,803889 |           | 0,290713 | 0,648027 | 0,883045 | 0,597074 |
| Atletico  | 0,415883 | 0,290713  |          | 0,54359  | 0,361244 | 0,11791  |
| Freya     | 0,834614 | 0,648027  | 0,54359  |          | 0,756621 | 0,327488 |
| Maja      | 0,919312 | 0,883045  | 0,361244 | 0,756621 |          | 0,500057 |
| Zerbeus   | 0,438712 | 0,597074  | 0,11791  | 0,327488 | 0,500057 |          |

Provedeným f-testem nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl mezi kumulativními produkcemi metanu testovaných hybridů kukuřice a čiroku  $p = 0,463842$  (Graf 16). Klimiuk et al. 2010, také zjistila vyrovnanou produkci metanu čiroku a kukuřice v podmínkách Polské republiky.



Graf 16: ANOVA,  $f$ -test kukuřice-čirok, průměr, směrodat. odch., zdroj. data



Graf 17: Denní produkce metanu průměr 2010-2011

Rozdílná dynamika produkce metanu kukuřice a čiroku uvedená v grafu 17 se potvrdila i ve statistickém vyhodnocení, kdy u hybridu Zerbeus byl pomocí analýzy ANOVA, Fischerův test zjištěn statisticky významný rozdíl na hladině alfa 0,05 u denních produkcí metanu v porovnání s hybridy, Cassilas a Fernandez. Mezi ostatními hybridy nebyl zjištěn statisticky významný rozdíl u denních produkcí metanu (Tab. 15).

Tab. 15: ANOVA, Fischerův test denní produkce metanu, výsledky z 6 opakování

|           | Cassilas | Fernandez | Atletico | Freya    | Maja     | Zerbeus  |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Cassilas  |          | 0,932413  | 0,664843 | 0,174247 | 0,418913 | 0,019965 |
| Fernandez | 0,932413 |           | 0,604751 | 0,150001 | 0,370908 | 0,01635  |
| Atletico  | 0,664843 | 0,604751  |          | 0,347866 | 0,71737  | 0,052519 |
| Freya     | 0,174247 | 0,150001  | 0,347866 |          | 0,537271 | 0,296007 |
| Maja      | 0,418913 | 0,370908  | 0,71737  | 0,537271 |          | 0,094126 |
| Zerbeus   | 0,019965 | 0,01635   | 0,052519 | 0,296007 | 0,094126 |          |

Z výše uvedené rozdílné dynamiky denní produkce metanu hybridů kukuřice a čiroku vyplývá potřeba odlišného přístupu při použití čiroku, kdy je nutné počítat s delší dobou zdržení materiálu ve fermentoru. V praxi je tento fakt často opomíjen a provozovatelé se po zařazení čiroku do krmné dávky BPS potýkají se snížením produkce. Rozdílná dynamika produkcí metanu musí být zohledněna již při návrhu BPS, aby velikost fermentorů byla dostatečná při použití substrátů vyžadujících delší dobu zdržení. V opačném případě totiž dochází k jejímu snížení. To se odráží v nedostatečném využití substrátů, narušení rovnováhy anaerobní fermentace, nárůstu koncentrací NMK, zejména kyseliny propionové, jež má silně inhibiční účinky na metanogenní archae (Bischofsberger et al. 2005).

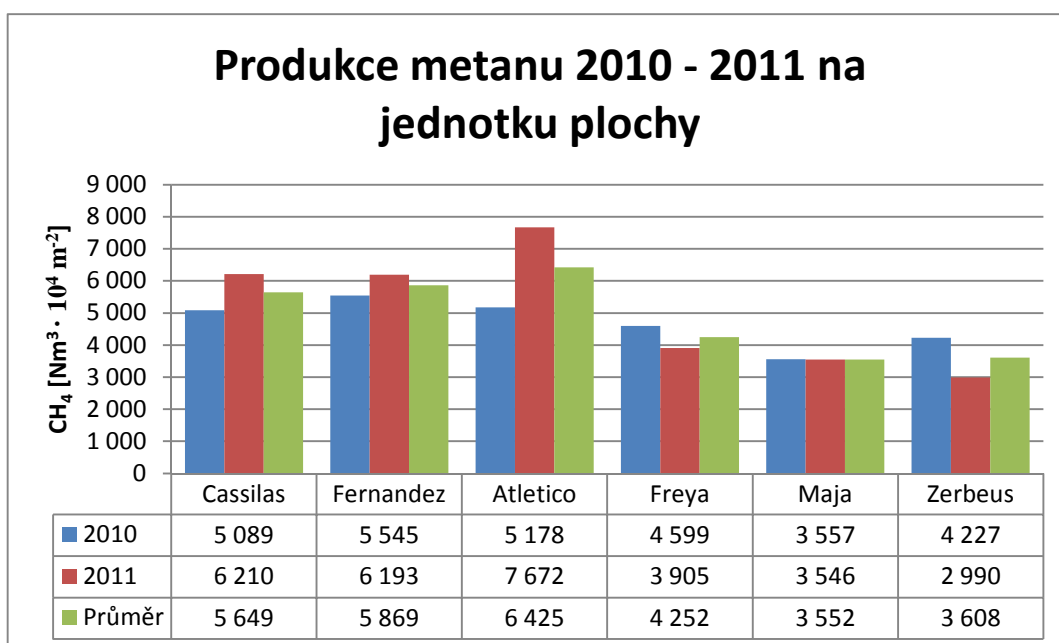
Fischerovým testem byl zjištěn mezidruhový statisticky významný rozdíl na hladině spolehlivosti 0,05 v denní produkci metanu kukuřice a čiroku  $p = 0,019024$ .

## 8.5 Stanovení plošných výnosů metanu testovaných hybridů

Tab. 16: Výnosy suché hmoty testovaných hybridů

| Sklizeň     | Výnos suché hmoty testovaných hybridů [ $\text{kg} \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ ] |           |          |        |        |         |
|-------------|---|-----------|----------|--------|--------|---------|
|             | Cassilas  | Fernandez | Atletico | Freya  | Maja   | Zerbeus |
| 20. 9. 2010 | 16 161  | 19 362    | 17 105   | 11 981 | 9 952  | 12 844  |
| 22. 9. 2011 | 18 347  | 18 652    | 21 664   | 12 394 | 11 255 | 9 579   |

V roce 2011 byly ve srovnání s rokem 2010 zjištěny vyšší výnosy suché hmoty s výjimkou hybridu Fernandez. V podmínkách Pákistánu zjistili Ayub et al. 2012 vyšší hektarové výnosy suché hmoty u sedmi hybridů čiroku v rozmezí 12 610–22 530 kg. Zjištěné rozdíly ve výnosech suché hmoty potvrzují vhodnost čiroku do teplých oblastí.



Graf 18: Plošné produkce metanu

Přepočtem zjištěných měrných produkcí metanu a výnosů hybridů uvedených v (Tab. 16) získáme plošné výnosy metanu jednotlivých testovaných hybridů (Graf 18).

Díky vyšším hektarovým výnosům suché hmoty dosahují hybridy kukuřice vyšších hektarových produkcí metanu ve srovnání s čiroky. U kukuřice hybrid Fernandez s nejnižší měrnou produkcí metanu zde dosahuje obdobné produkce jako Cassilas s nejvyšší měrnou produkcí. Atletico s vyrovnanými produkcemi v obou parametrech



pak dosahuje nejlepších hektarových výnosů metanu, obdobného výnosu u hybridu Atletico dosáhl (Amon et al. 2008), konkrétně  $6\,424 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ , při průměrném hektarovém výnosu metanu hybridů kukuřice  $5\,480 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ . V období 2009-2010 byly v podmínkách Belgie, Francie a Lucemburska zjištěny hektarové výnosy metanu kukuřice  $6\,934 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$  a čiroku  $4\,332 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$  (Mayer et al. 2014). U kukuřice byla zjištěna hektarová produkce metanu Fischerovým testem (Tab. 17) byl zjištěn statisticky průkazný rozdíl v hektarové produkci metanu na hladině spolehlivosti 0,05 mezi hybridy kukuřice a čiroků. Při využívání hybridů čiroku, ale nejen jich za účelem produkce bioplynu je důležité zohledňovat optimální dobu sklizně, aby bylo dosaženo maximálního výnosu organické suché hmoty při zachování kvality materiálu pro silážování (Amon et al. 2008), pro dosažení dostatečně vysoké měrné produkce metanu.

Tab. 17: ANOVA, Fischerův test hektarové produkce metanu

|           | Cassilas | Fernandez | Atletico | Freya    | Maja     | Zerbeus  |
|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| Cassilas  |          | 0,702295  | 0,051391 | 0,001640 | 0,000045 | 0,000031 |
| Fernandez | 0,702295 |           | 0,109185 | 0,000623 | 0,000017 | 0,000012 |
| Atletico  | 0,051391 | 0,109185  |          | 0,000009 | 0,000000 | 0,000000 |
| Freya     | 0,001640 | 0,000623  | 0,000009 |          | 0,168424 | 0,130086 |
| Maja      | 0,000045 | 0,000017  | 0,000000 | 0,168424 |          | 0,884077 |
| Zerbeus   | 0,000031 | 0,000012  | 0,000000 | 0,130086 | 0,884077 |          |

Hektarové výnosy organické suché hmoty mají vliv na ekonomiku provozu BPS. Při kalkulaci tržeb za prodanou elektrickou energii vycházíme ze současného stavu, kdy je výkupní cena za 1 kWh el. ze zemědělských BPS stanovena na 4,12 Kč, elektrická účinnosti KJ 40 % a výhřevnosti metanu  $36 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nejvyšších tržeb dosahuje hybrid Atletico 105 876 Kč, následován hybridy Fernandez 96 725 Kč, Cassilas 93 099 Kč, Freya 70 069 Kč, Zerbeus 59 467 Kč a Maja 58 529 Kč. Z výše uvedeného je zřejmé, že za současných podmínek a nastavení státní podpory je ekonomika produkce bioplynu kukuřičných hybridů lepší než u čiroků.

## 9 ZÁVĚR

Během provedených testů byly zjištěny velmi vyrovnané měrné produkce metanu u odrůd kukuřice a čiroku. Energetické odrůdy čiroku (*Sorghum Bicolor x Sudanense*, *Sorghum Bicolor*) je vhodné pěstovat v teplejších a sušších oblastech, ve kterých dosahují i vyšších plošných výnosů sušiny než kukuřice (Amon et al. 2008).

V posledních letech dochází v teplých oblastech České republiky k častějším výskytům sucha, při kterých není kukuřice schopna poskytnout dostatečný hektarový výnos suché hmoty o požadované kvalitě. Pro tyto oblasti představuje čirok vhodnou energetickou plodinu pro produkci bioplynu. Nebyl zjištěn statisticky průkazný rozdíl na hladině spolehlivosti 0,05 mezi měrnými produkcemi metanu jednotlivých energetických odrůd čiroku a kukuřice. Toto zjištění je předpokladem k zařazení čiroku do osevních postupů v oblastech, kde je kukuřice limitována přísunem vláhy.

Čirok ve srovnání s kukuřicí dosahuje nižších výnosů sušiny. Zjištěný statisticky průkazný rozdíl plošných produkcí metanu na hladině spolehlivosti 0,05 mezi odrůdami čiroku a kukuřice je nutné zohlednit při zařazení čiroku do osevních postupů, pro zajištění dostatečného množství vstupních substrátů pro provoz BPS. Nejvyšší plošná produkce metanu u testovaných odrůd kukuřice byla zjištěna u Atletica  $6\,425 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$  u odrůd čiroku u odrůdy Freya  $4\,252 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \cdot 10^4 \text{ m}^{-2}$ .

## 10 LITERATURA

- Abdoun E., Weiland P., 2009, Optimization of monofermentation from renewable raw materials by the addition of trace elements, *Bornimer Agrartechnische Berichte* 68, s. 69–78
- Alizadeh H., Teymouri F., Gilbert T. I., Dale B. E., 2005, Pretreatment of switchgrass by ammonia fiber explosion (AFEX), *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 124, s. 1133–1141
- Amon T., Amon B., Kryvoruchko V., Machmüller A., Hopfner-Sixt K., Bodiroza V., Hrbek R., Friedel J., Pötsch E., Wagentristl H., Schreiner M., Zollitsch S. W., 2007, Methane production through anaerobic digestion of various energy crops in sustainable crops rotation, *Bioresource Technology* 98, s. 3204–3212
- Amon T., Amon B., Bauer A., Bodiroza V., Hrbek R., Lyson D. F., Kryvorutschko V., Leonhartsberger Ch., Machmüller A., Milovanovic D., Sapik R., Friedel J. K., Rinnofner T., Kaul H. P., Wichmann S., Brandstetter A., Schally H., Mayer K., Zwatz E., Pötsch E., Danzinger G., Wagentristl H., 2008, Agrarische Rohstoffbasis zur Biogaserzeugung, *Závěrečná zpráva, č. projektu 812189–SCK/SAI, BOKU Wien*
- Antonopoulou G., Gavala H. N., Skiadas I. V., Angelopoulos K., Lyberatos G., 2008, Biofuels generation from sweet sorghum: Fermentative hydrogen production and anaerobic digestion of the remaining biomass, *Bioresource technology* 99, s. 110–119
- Ayub M., Khalid M., Tariq M., Elahi M., Nadeem M. A., 2012, Comparison of sorghum genotypes for forage production and quality, *The Journal of Animal & Plant Sciences*, 22:3, 733–737
- Baserga U., 1998, *Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen, FAT-Berichte* 512, Tänikon, Švýcarsko., s. 12
- Bassam El N., 1996 *Renewable energy–potential energy crops for Europe and the mediterranean region, REU Technical Series 46, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Řím, s. 200*
- Bernard R., 1996, *Biochemie der Pflanzen, Stuttgart, s. 522*
- Bischoff M., 2009, *Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz und Hilfstoffen sowie von Spurenelementen in Biogasanlagen, VDI-Ber 2057, s. 111–123*

- Bischofsberger W., Dichtl N., Rosenwinkel K. H., Seyfried C. F., Böhnke B., 2005, Anaerobtechnik 2. vollständig überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Buxton D. R., Anderson I. C., Hallam A., 1999, Performance of sweet sorghum grown continuously, double cropped with winter rye, or in rotation with soyabean and maize, *Agronomy Journal*, 91:1, s. 93–101
- Curreli N., Fadda M. B., Rescigno A., Rinaldi A. C., Soddu G., Sollai F., Vaccargiu S., Sanjust E., Rinaldi A., 1997, Mild alkaline/oxidative pretreatment of wheat straw, *Process Biochem.*, 32, s. 665–670
- Český hydrometeorologický ústav, 2007, Atlas podnebí Česka, Praha, s. 256
- Dalianis C., Panoutsou C., Dercas N., 1996, Sweet and fiber sorghum, two promising biomass crops, First European Seminar on Sorghum for Energy and Industry, Toulouse, Francie, s. 173–176, Toulouse, Francie
- Delmer D. P., Amor Y., 1995, Cellulose biosynthesis, *Plant Cell*, 7, s. 987–1000
- Demirel B., Scherer P., Yenigun O., Onay T. T., 2010, Production of methane and hydrogen from biomass through conventional and high-rate anaerobic digestion processes, review, *Environmental Science and technology*, 40:116–146
- Deublein D., Steinhauser A., 2008, Biogas from waste and renewable resources, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- Dohányos M., Zábranská J., Kutil J., Jeníček P., 2004, Improvement of anaerobic digestion of sludge. *Water. Sci. and Tech.* 49, s. 89–96
- Doležal P., Dvořáček J., Loučka R., Mikyska F., Mudřík Z., Opitz B., Prokeš K., Příklad J., Dkládanka J., Straková E., Suchý P., Szwedziak K., Tukiendorf M., Zeman L., Červinka J., 2012, Silážování krmiv a jejich využití ve výživě zvířat, Mendelova univerzita v Brně
- Durst L., 2010, Bereitung hochwertiger Silage – die Grundlage für hohen Biogasertrag, Bayern Biogas Forum, Triesdorf, s. 9

- Effenberger M., M. Lebuhn, A. Gronauer, 2007, Fermentermanagement – Stabiler Prozess bei NawaRo–Anlagen, Biogas im Wandel, Tagungsband zur 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V., s. 99–105
- Eklund R., Galbe M., Zacchi G., 1995, The influence of SO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> impregnation of willow prior to steam pretreatment, *Bioresource Technol.*, 52, s. 225–229
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2010, Förderkennzeichen (FKZ), 22005108 Leitfaden Biogas von der Gewinnung zur Nutzung, Rostock, s. 272
- Fan L. T., Lee Y., Beardmore D.H., 1980, Mechanism of the enzymatic hydrolysis of cellulose, Effects of major structural features of cellulose on enzymatic hydrolysis, *Biotechnol. Bioeng.*, 22, s. 177–199
- Gerardi M. H. 2003, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, John Wiley & Sons, New Jersey, s. 192
- Gosse G., 1996, Overview on the different routes for industrial utilization of sorghum, First European Seminare on Sorghum for Energy and Industry, s. 2 Toulouse, France
- Gustavsson J., 2012, Cobalt and nickel bioavailability for biogas formation, *Linköping Studies in Arts and Science*, 549, Linköping, s. 49
- Gutser R., 1991, Grundlagen der Nährstoffwirkung von Gülle und Festmist, Tagungsband Landtechnik Weihenstephan 27.–28. 6. 1990, Freising, s. 88–100
- Ha M. A., Apperley D. C., Evans B. W., Huxham I. M., Jardine W. G., Vietor R. J., Reis D., Vian B., Jarvis M. C., 1998, Fine structure in cellulose microfibrils: NMR evidence from onion and quince. *Plant J.*, 16, s. 183–190
- Habyarimana E., Laureti D., Ninno M. De., Lorenzoni C., 2004, Performance of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region, *Industrial Crops and Products* 20, s. 23–28
- Haitl M., Vítěz T., Karafiát Z., Koutný T., 2011, Využití odpadu z kotelny na biomasu při výrobě bioplynu, *Odpadové fórum 2011*, článek ve sborníku, s. 21–26
- Hartmann H., Angelidaki I., Ahring B. K., 2000, Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Sci. Technol.* 41, s. 145–153

Heinrich J., Gemmeke B., Rieger Ch., Weiland P., Schröder J., 2009, Biogas-Messprogramm II, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, s. 168

Hermann C., Heiermann M., Idler C., 2011, Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops, 2011, Bioresource Technology, 102, s. 5153–5161

Hooper R. J., Li J., 1996, Summary of the factors critical to the commercial application of bioenergy technologies. Biomass Bioenerg., 11, s. 469–474

<http://www.agrikomp.de/cz/>

<http://www.czba.cz/aktuality/prubezne-hodnoceni-vyroby-elektriny-z-bioplynu-za-1-ctvrtleti-2015.html>

<http://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-stanic/>

<http://www.vetrani.tzb-info.cz>

Chundawat S. P., Venkatesh B., Dale B. E., 2007, Effect of particle size based separation of milled corn stover on AFEX pretreatment and enzymatic digestibility, Biotechnol. Bioeng., 96, s. 219–231

Institut für Energetik und Umwelt GmbH Leipzig, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) Braunschweig, KTBL Darmstadt, 2004, Handreichung–Biogasgewinnung und nutzung, Leipzig, s. 232

Itoh H., Wada M., Honda Y., Kuwahara, M., Watanabe T., 2003, Bioorganosolve pretreatments for simultaneous saccharification and fermentation of beech wood by ethanolysis and white rot fungi, J. Biotechnol., 103, s. 273–280

Jarvis A., Nordberg A., Jarlsvik T., Mathisen B., Svensson B. H., 1997, Improvement of grass–clover silane–fed biomass process by the addition of cobalt, Biomass Bioenergy 12, s. 453–460

Jones J., Semrau K., 1984, Wood hydrolysis for ethanol production previous experience and the economics of selected processes, Biomass, 5, s. 109–135

Kaltschmitt M., Hartmann H., 2001, Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, s. 770

- Kára J., Koudřa J., Moudrý I., 2009, QH81195 Nové technologické systémy pro hospodárné využití bioplynu, Zpráva VÚZT č. Z- 2510, VÚZT, v.v.i., Praha, s. 53
- Kim K. H., Hong J., 2001, Supercritical CO<sub>2</sub> pretreatment of lignocellulose enhances enzymatic cellulose hydrolysis, *Bioresource Technol.*, 77, s. 139–144
- Klimiuk E., Pokój T., Budzyński W., Dubis B., 2010, Theoretical and observed production from plants biomass of different fibre content, *Bioresource technology*, 101:24, s. 9527–9535
- Kopplow U., 2006, Maßnahmen zur Minderung des Schäumens im Faulbehälter unter besonderer Berücksichtigung der Klärschlammintegration, Disertační práce, Institut für Umweltingenieurwesen, Uni Rostock, s. 163
- Krieg A., Braun M., Euler H., B. Klingler, 1995, Biogas-Studie Österreich, Akademie für Umwelt und Energie, Vídeň: Norka-Verlag
- Kube J., Friedman H., 2008, Optimierung der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen durch den Einsatz von Mikronährstoffen – ein Erfahrungsbericht, Tagungsband 17. Jahrestagung des Fachverbandes Biomass, Norimberk, s. 125–130
- Laser M., Schulman D., Allen S. G., Lichwa J., Antal M. J. Jr., Lynd L. R., 2002, A comparison of liquid hot water and steam pretreatments of sugar cane bagasse for bioconversion to ethanol, *Bioresource Technol.*, 81, s. 33–44
- Leonhartsberger C., 2007, Standortangepasste Energiepflanzen und ausgewogene Fruchtfolgen für die Biogasproduktion, 16. Jahrestagung Biogas und Bioenergie in der Landwirtschaft, Wolpertshausen
- Mahmood A., 2012, Performance of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) as an energy crop for biogas production, disertační práce, Justus Liebig University Giessen, SRN
- Mahmood A., Honermeier B., 2012, Chemical composition and methane yield of sorghum cultivars with contrasting row spacing, *Field Crops research* 128, s. 27–33
- Mayer F., Gerin P. A., Noo A., Lemaigre S., Stilmant D., Schmit T., Lecleh N., Ruelle L., Gennen J., Francken-Welz H., Foucart G., Flammang J., Weyland M., Delfosse P.,

2014, assessment of energy crops alternative to maize for biogas production in Greater Region, *Bioresource Technology*, 166, str. 358–367

Mishima D., Tateda M., Ike M., Fujita M., 2006, Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. *Bioresource Technol.*, 97, s. 2166–2172

Moeller L., Herbes C., Miller R. A., Zehnsdorf A., 2005, Schaumbildung und –bekämpfung im Prozess der anaeroben Gärung, *Landtechnik* 65:3, s. 204–207

Mosier N., Hendrickson R., Ho N., Sedlak M., Ladisch M. R., 2005, Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover, *Bioresource Technol.*, 96, s. 1986–1993

Mrůzek, M., 2011, Analýza produkce bioplynu z travních senáží v závislosti na kvalitě, *Disertační práce*, Brno, s. 90

Oleszkiewicz J., A., Sharma V. K., 1990, Stimulation and inhibition of anaerobic process by heavy metals – A review, *Biological Wastes*, 31, Winnipeg, s. 45–67

oze.tzb-info.cz, Bioplynová stanice s kogenerační jednotkou pro dodávky elektřiny ve špičkách, dostupné k 10. 7. 2012

Pan X., Gilkes N., Kadla J., Pye K., Saka S., Gregg D., Ehara K., Xie D., Lam D., Saddler J., 2006, Bioconversion of hybrid poplar to ethanol and co-products using an organosolv fractionation process: optimization of process yields, *Biotechnol. Bioeng.* 94, s. 851–861

Pasquini D., Pimenta M. T. B., Ferreira L. H., Curvelo A. A. d. S., 2005, Extraction of lignin from sugar cane bagasse and Pinus taeda wood chips using ethanol-water mixtures and carbon dioxide at high pressures. *J. Supercrit. Fluid.*, 36, s. 31–39

Patidar S. K., Tare V., 2006, Effect of nutrients on biomass activity in degradation of sulfate laden organics, *Process Biochemistry*, 41, s. 489–495

Patidar, S. K., Tare V., 2008, Soluble microbial products formation and their effect on trace metal availability during anaerobic degradation of sulphate laden organic, *Wat Sci Technol*, 58, str. 749–55



- Pokój T., Bulkowska K., Gusiatin Z. M., Klimiuk E., Jankowski K. J., 2015, Semi-continuous anaerobic digestion of different silage crops: VFAs formation, methane yield from fiber and non-fiber components and digestate composition, *Bioresource technology*, 190, str. 201–210
- Rada V., 2009, *Siláž a zdraví zvířat*, Výzkumný ústav živočišné výroby, v.v.i., Praha, s. 40
- Rolz C., Arriola de M. C., Valladares J., Cabrera de S., 1986, Effects of some physical and chemical pretreatments on the composition and enzymatic hydrolysis and digestibility of lemon grass and citronella bagasse, *Agr. Wastes*, 18, s. 145–161.
- Rooney W. L., Blumenthal B. B., Mullet J. E., 2007, Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1:2, s. 147–157
- Schmidt A., Thomsen A., 1998, Optimization of wet oxidation pretreatment of wheat straw, *Bioresource Technol.*, 64, s. 139–151
- Schultz T. P., Ginnis Mc G. D., Biermann C. J., P. O. Drawer, 1984, Similarities and differences in pretreating woody biomass by steam explosion, wet oxidation, autohydrolysis, and rapid steam hydrolysis/continuous extraction, *Energy Biomass Wastes*, 8, s. 1171–1198
- Schulz H., Eder B., 2004, *Bioplyn v praxi*, HEL, Ostrava, s. 167
- Sims R. E. H., 2004, *Biomass and resources bioenergy options for a cleaner environment in developed and developing countries*, Elsevier Science, London, Velká Británie, s. 198
- Sjöström E., 1993, *Wood chemistry: fundamentals and applications*, Academic Press, San Diego, USA, s. 293
- Smith C. W., Frederiksen R. A., 2000, *Sorghum: origin, history, technology and production*, John Wiley&Sons, Inc., New York, s. 824
- Sun X. F., Xu F., Sun R. C., Wang Y. X., Fowler P., Baird M. S., 2004, Characteristics of degraded lignins obtained from steam exploded wheat straw, *Polym. Degrad. Stabil.*, 86, s. 245–256

- Sun Y., Cheng J., 2002, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production, A review, *Bioresource Technol.*, 83, s. 1–11
- Switzenbaum M. S., Giraldo – Gomez E., Hickey R. F., 1990, Monitoring of the anaerobic methane fermentation process, *Enzyme Microb. Technol.* 12, s. 722–730
- Taherzadeh M. J., Karimi K., 2007, Acid – based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials, A review, *BioResources*, 2, s. 472–499
- Taherzadeh M. J., Karimi K., 2008, Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve ethanol and biogas production, Review, *International Journal of Molecular Science*, s. 1621–1651
- Takashima M., Speece R. E., Parkin G. F., 1990, Mineral requirements for methane fermentation, *Critical Reviews in Environmental Control*, 19:5, s. 465–479
- Tsuchihashi N., Goto Y., 2004, Cultivation of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) moench) and determination of its harvest time to make use as the raw material for fermentation, practiced during rainy season in dry land of Indonesia, *Plant Production Science*, 7:4, s. 442–448
- vetrani.tzb-info.cz, Chladící oběhy, trigenerace, dálkové chlazení, dostupné k 10. 7. 2012
- Voß E., Weichgrebe D., Rosenwinkel K. H., 2009, FOS/TAC – Deduction, Methods, Application and Significance, Internationale Wissenschaftskonferenz „Biogas Science 2009 – science meets practice”, LfL-Bayern, 2–4. 12. 2009, Erding, s. 7
- Wang Q. H., Kuninobu M., Ogawa H., Kato Y., 1999, Degradation of volatile fatty in highly efficient anaerobic digestion, *Biomass Bioenergy*, 16, s. 407–416
- Weiland P., 2000, Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und erzeugung in Deutschland, *Gülzoer Fächesprache*, Band 15, Energetische Nutzung von Biomasse „Stand der Technik und Optimierungspotenzial“, Weimar, s. 8–27
- Weiland, P., 2010, Biogas production: current state and perspectives, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85(4), s. 849–860
- Wyman C. E., 1996, Handbook on bioethanol: production and utilization, Taylor & Francis, Washington DC, USA, s. 442

- Zandvoort M. H., Hullebusch van E. D., Feroso F. G., Lens P. N. L., 2006, Trace Metals in Anaerobic Granular Sludge Reactors, Bioavailability and Dosing Strategies, *Engineering in Life Sciences*, 6:3, s. 293–301
- Zandvoort M. H., Hullebusch van E. D., Gieteling J., Lens P. N. L., 2006, Granular sludge in full-scale anaerobic bioreactors: Trace element content and deficiencies, *Enzyme and Microbial Technology*, 39, s. 337–346, Nizozemí
- Zegarada-Lizarazu W., Monti A., 2012, Are we ready to cultivate sweet sorghum as a bioenergy feedstock?, A review on field management practices, *Biomass and Bioenergy*, 40, s. 1–12
- Zeng M., Mosier N. S., Huang C. P., Sherman D. M., Ladisch M. R., 2007, Microscopic examination of changes of plant cell structure in corn stover due to hot water pretreatment and enzymatic hydrolysis, *Biotechnol. Bioeng.*, 97, s. 265–278.
- Zheng Y., Tsao G. T., 1996, Avicel hydrolysis by cellulase enzyme in supercritical CO<sub>2</sub>, *Biotechnol.Lett.*, 18, s. 451–454
- Zusammengestellt für die Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung), 2010, „Biogas Forum Bayern“, II – 7/2010

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Obr. 1: Pomaloběžné míchadlo (vlevo), rychloběžné míchadlo (vpravo) (www.bioplyncs.cz, www.biom.cz).....</i>   | <i>22</i> |
| <i>Obr. 2: Ligno-celulózný komplex (Taherzadeh et al. 2008).....</i>  | <i>36</i> |
| <i>Obr. 3: Kogenerační jednotka BPS.....</i>  | <i>42</i> |
| <i>Obr. 4: Schéma vícestupňové zemědělské BPS na tekuté substráty s využitím bioplynu v KJ (www.agrikomp.cz).....</i>   | <i>47</i> |
| <i>Obr. 5: Technologie kruh v kruhu (KH Kinetic), s vrtulovými míchadly a plynojemem v sekundárním fermentoru.....</i>  | <i>47</i> |
| <i>Obr. 6: Technologie BIOFERM: míchání substrátu (vlevo nahoře), navážení substrátu do reaktoru (vpravo nahoře), vzduchotěsná vrata reaktoru v pozadí další reaktor (vlevo dole), plynový vak (vpravo dole).....</i> | <i>49</i> |
| <i>Obr. 7: Technologie KOMPOGAS - nevytříděný vstupní substrát (vlevo nahoře), třídící linka (vpravo nahoře), Horizontální fermentory s míchadly (vlevo a vpravo dole).....</i>                                       | <i>50</i> |
| <i>Obr. 8: Schéma technologie Valorga (Deublin a Steinhauser 2008).....</i>   | <i>50</i> |
| <i>Obr. 9: Mikrosilážní nádoby.....</i>   | <i>53</i> |
| <i>Obr. 10: Laboratoř bioplynových transformací s testovacími reaktory.....</i>   | <i>54</i> |
| <i>Obr. 11: Srážkové charakteristiky pokusných lokalit (ČHMÚ 2007).....</i>   | <i>86</i> |
| <i>Obr. 12: Teplotní charakteristiky pokusných lokalit (ČHMÚ, 2007).....</i>  | <i>86</i> |

## 12 SEZNAM TABULEK

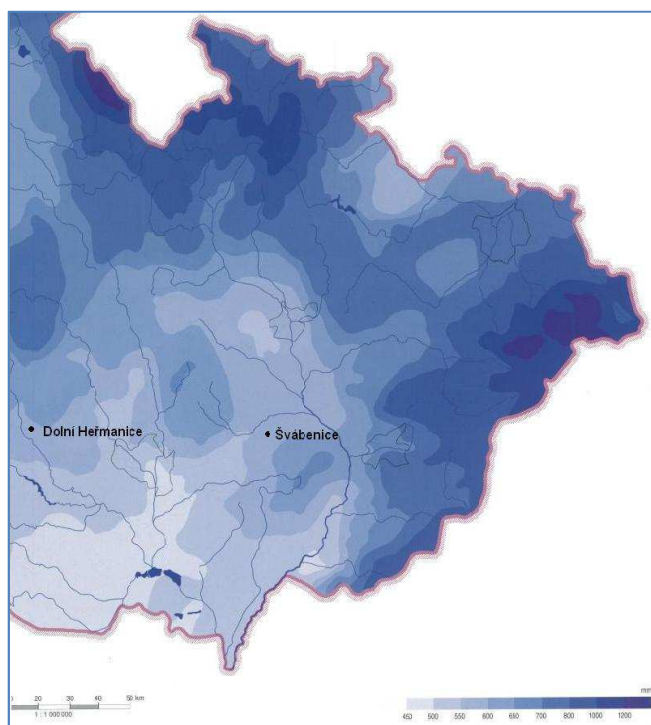
|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tab. 1: Složení bioplynu (Kaltschmitt a Hartmann, 2001).....</i>  | <i>12</i> |
| <i>Tab. 2: Požadavky na procesní podmínky jednotlivých fází anaerobní fermentace (Bischofsberger et al. 2005).....</i> | <i>18</i> |
| <i>Tab. 3: Měrné produkce strukturních látek (Baserga 1998).....</i>   | <i>30</i> |
| <i>Tab. 4: Výnosy bioplynu ze substrátů (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 2010).....</i>                       | <i>31</i> |
| <i>Tab. 5: Doporučené dávky živin čiroku (Amon et al. 2007).....</i>   | <i>34</i> |
| <i>Tab. 6: Parametry ovlivňující kvalitu siláže pro produkci bioplynu (Durst 2010).....</i>                            | <i>41</i> |
| <i>Tab. 7: Charakteristika testovaných hybridů.....</i>  | <i>52</i> |
| <i>Tab. 8: Agrotechnické údaje.....</i>  | <i>53</i> |
| <i>Tab. 9: Vstupní charakteristika substrátů.....</i>  | <i>57</i> |

|   |    |
|---|----|
| <i>Tab. 10: Měrné produkce metanu 2010</i> .....  | 60 |
| <i>Tab. 11: Výsledky strukturní analýzy materiálů 2011</i> .....                          | 63 |
| <i>Tab. 12: Měrné produkce metanu 2011</i> .....  | 64 |
| <i>Tab. 13: Základní statistická data produkcí metanu</i> .....                           | 68 |
| <i>Tab. 14: ANOVA, Fischerův test kumulativní produkce metanu</i> .....                   | 69 |
| <i>Tab. 15: ANOVA, Fischerův test denní produkce metanu, výsledky z 6 opakování</i> ..... | 71 |
| <i>Tab. 16: Výnosy suché hmoty testovaných hybridů</i> .....                              | 72 |
| <i>Tab. 17: ANOVA, Fischerův test hektarové produkce metanu</i> .....                     | 73 |

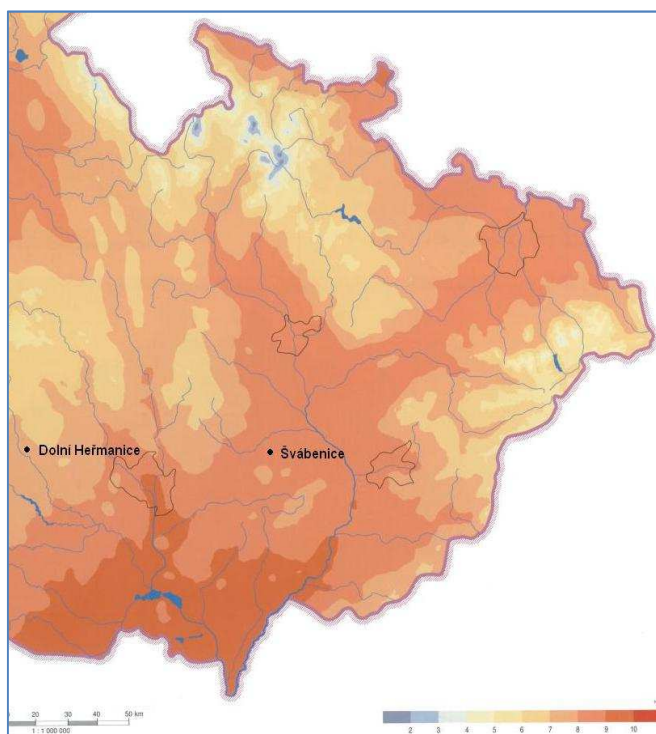
### 13 SEZNAM GRAFŮ

|  |    |
|--|----|
| <i>Graf 1: Doba zdržení materiálu v BPS (Heinrich 2009)</i> .....                        | 21 |
| <i>Graf 2: Zatížení reaktoru organickými látkami (Heinrich 2009)</i> .....               | 21 |
| <i>Graf 3: Elektrická účinnost kogeneračních jednotek (www.oze.tzb-info.cz)</i> .....    | 42 |
| <i>Graf 4: Kumulativní produkce metanu 2010</i> .....                                    | 59 |
| <i>Graf 5: Denní produkce metanu 2010</i> .....  | 60 |
| <i>Graf 6: Obsah metanu v bioplynu 2010</i> .....  | 61 |
| <i>Graf 7: Obsah oxidu uhličitého v bioplynu 2010</i> .....                              | 61 |
| <i>Graf 8: Obsah sirovodíku v bioplynu 2010</i> .....                                    | 62 |
| <i>Graf 9: Obsah metanu v bioplynu 2011</i> .....  | 63 |
| <i>Graf 10: Kumulativní produkce metanu 2011</i> .....                                   | 64 |
| <i>Graf 11: Denní produkce metanu 2011</i> .....   | 65 |
| <i>Graf 12: Obsah metanu v bioplynu 2011</i> .....                                       | 66 |
| <i>Graf 13: Obsah sirovodíku v bioplynu 2011</i> .....                                   | 66 |
| <i>Graf 15: Kumulativní produkce metanu 2011</i> .....                                   | 67 |
| <i>Graf 16: ANOVA, Fischerův test, průměr, směrodat. odch., zdroj. data</i> .....        | 68 |
| <i>Graf 17: ANOVA, f-test kukuřice-čirok, průměr, směrodat. odch., zdroj. data</i> ..... | 70 |
| <i>Graf 18: Denní produkce metanu průměr 2010-2011</i> .....                             | 70 |
| <i>Graf 19: Plošné produkce metanu</i> .....   | 72 |
| <i>Graf 20 Fos/Tac Čirok test 1 2011</i> .....   | 87 |
| <i>Graf 21 FOS/TAC Kukuřice test 1 2011</i> .....  | 87 |
| <i>Graf 22 FOS/TAC Čirok test 2 2011</i> .....   | 88 |
| <i>Graf 23 FOS/TAC Kukuřice test 2 2011</i> .....  | 88 |

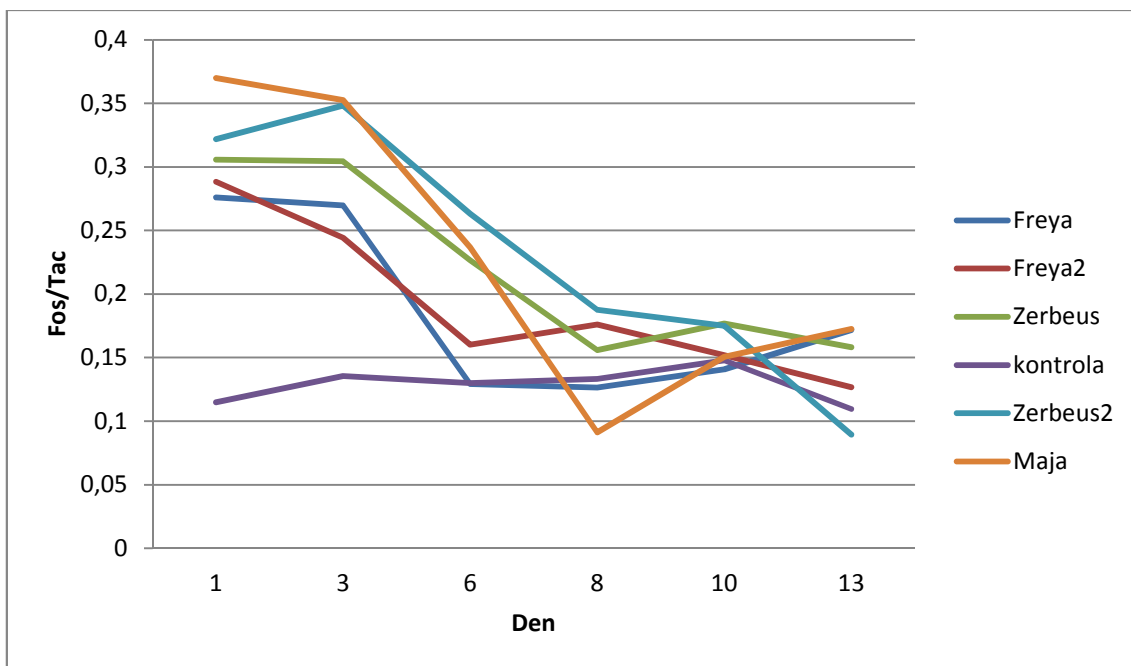
## 14 PŘÍLOHY



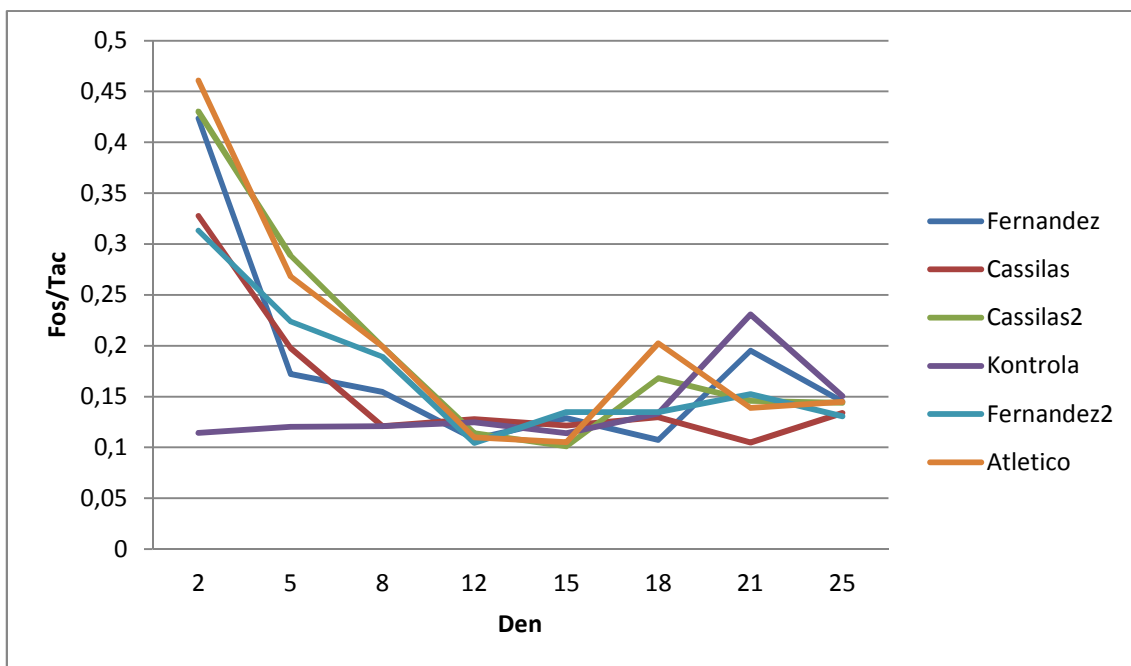
*Obr. 11: Srážkové charakteristiky pokusných lokalit (ČHMÚ 2007)*



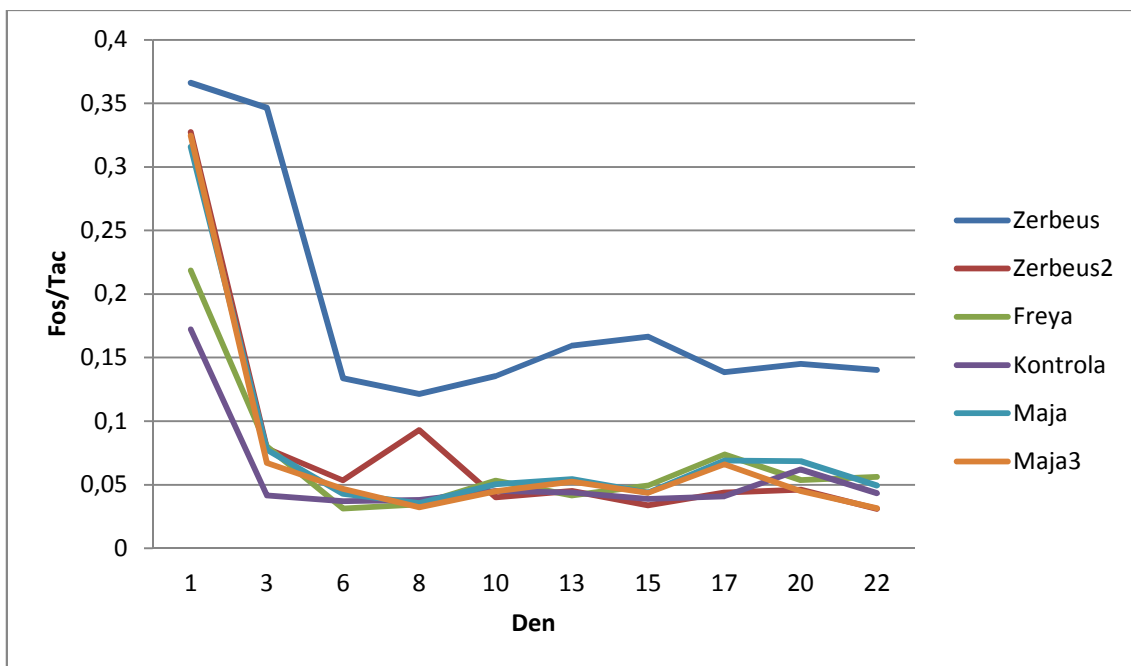
*Obr. 12: Teplotní charakteristiky pokusných lokalit (ČHMÚ, 2007)*



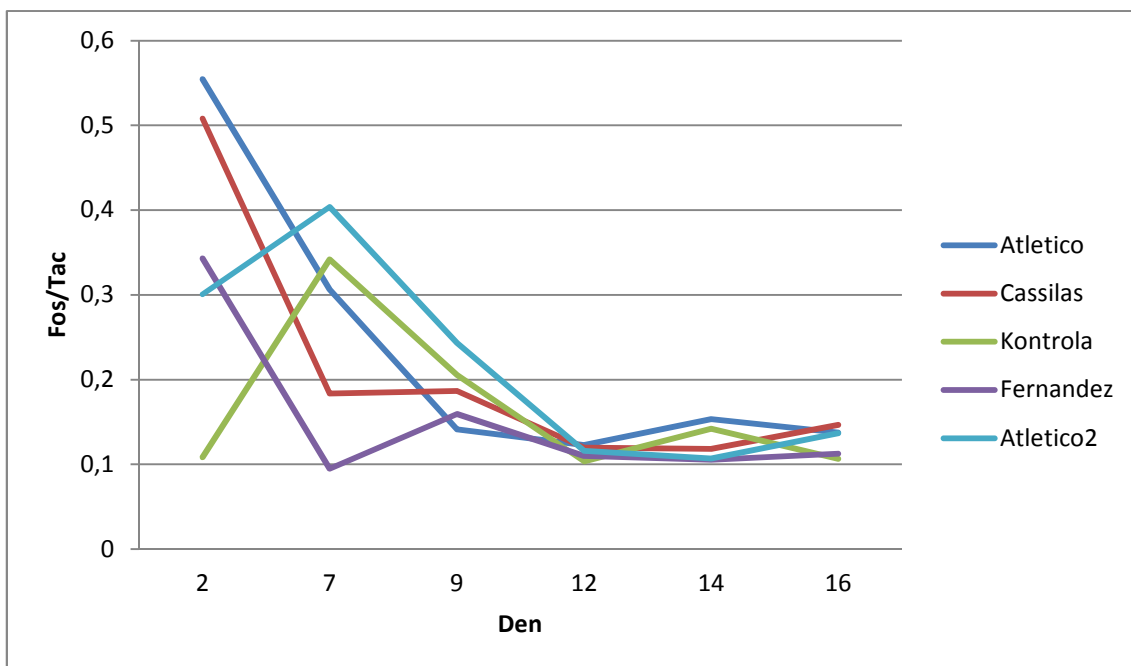
Graf 19 Fos/Tac Ćirok test 1 2011



Graf 20 FOS/TAC Kukuřice test 1 2011



Graf 21 FOS/TAC Čirok test 2 2011



Graf 22 FOS/TAC Kukuřice test 2 2011