

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů**

**Katedra pícninářství a trávnickářství**



**Substrátová produkce bioplynu ze silážní kukuřice**

**Diplomová práce**

**Autor práce: Bc. Andrea Chvapilová**

**Obor studia: Rozvoj venkovského prostoru**

**Vedoucí práce: Ing. Pavel Fuksa, Ph.D.**

© 2018 ČZU v Praze

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Substrátová produkce bioplynu ze silážní kukuřice" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 13.4.2018

---

### **Poděkování**

Ráda bych touto cestou poděkovala především Ing. Pavlu Fuksovi, Ph.D. za možnost psát diplomovou práci pod jeho vedením, dále mu také děkuji za jeho rady, poskytnuté informace a hlavně za jeho trpělivost a čas.

Rovněž děkuji i všem lidem z mého blízkého okolí, především kamarádům a rodině za jejich podporu během tvorby mé diplomové práce.

## Substrátová produkce bioplynu ze silážní kukuřice

### Souhrn

Tato diplomová práce na téma „Substrátová produkce bioplynu ze silážní kukuřice“ má za cíl zpracovat dosavadní poznatky o kukuřici a její využití při produkci bioplynu. Diplomová práce byla zpracována na dvě části: první část je zpracována formou literární rešerše a následující část je praktická, která navazuje na rešerši.

V první části této diplomové práce byla zpracována teorie a obsahovala informace o kukuřici, bioplynu, legislativě, ekonomice a následně o možném využití kukuřice při produkci bioplynu. Jsou zde popsány i jednotlivé faktory, které mohou mít na produkci bioplynu vliv a ty jsou poté zkoumány i v praktické části.

Druhá část této diplomové práce je věnována polnímu a laboratornímu experimentu, který probíhal v roce 2015 v Červeném Újezdu. Byl sledován vliv hustoty výsevu a vliv jednotlivých částí rostliny na produkci bioplynu. Ze statistického vyhodnocení dat se došlo k závěrům, že část rostliny, palice, měla průkazný vliv na produkci bioplynu i na jeho kvalitu. Druhý sledovaný faktor, rozdílná hustota výsevu, měla zanedbatelný vliv na produkci bioplynu. Na závěr je nutno podotknout, že pro hodnocené ukazatele měl velký význam vliv ročníku.

**Klíčová slova:** biomasa, bioenergie, anaerobní digesce, batch test

## **Specific biogas yield from silage maize**

### **Summary**

This master thesis „Specific biogas yield from silage maize“ aims to summarize existing knowledge about maize and its use in the production of biogas. This thesis have a two parts: first part includes literary research and second part includes experiment.

First part of the thesis summarizes information about maize and biogas production. These informations are about maize, biogas, economy, legislation and the possible use of maize for biogas production. There are also described the some factors which can have a influence for biogas production and these factors are study in the second part of thesis.

Second part of the thesis includes field and laboratory experiment. This experiment has taken place on Červený Újezd in 2015. Factors were choosen: different plant density and different parts of plant which may have a potential influence on the production biogas from silage maize. From statistical evaulation it was possible to say that different parts of plant, ears, had a influence on the biogas production from silage maize. The second factor, plant density, had a negligible influence on the biogas production from silage maize. The influence of the year was very important for the evaluated factors.

**Keywords:** biomass, bioenergy, anaerobic digestion, batch test

# Obsah

|  |    |
|--|----|
| 1. ÚVOD .....  | 8  |
| 2. CÍL PRÁCE .....                                     | 9  |
| 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE .....                             | 10 |
| 3.1. Kukuřice ( <i>Zea mays</i> ) .....                | 10 |
| 3.2. Kukuřice na siláž .....                           | 11 |
| 3.3. Kukuřice jako energetická plodina .....           | 11 |
| 3.4. Výběr hybridu.....                                | 12 |
| 3.5. Bioplyn .....                                     | 13 |
| 3.5.1. Produkce bioplynu .....                         | 14 |
| 3.5.2. Vlastnosti bioplynu .....                       | 14 |
| 3.5.3. Zařízení k výrobě bioplynu.....                 | 15 |
| 3.5.4. Využití bioplynu .....                          | 16 |
| 3.5.5. Ekonomika a dotace bioplynové stanice.....      | 17 |
| 3.5.6. Bioplynové stanice a legislativa .....          | 18 |
| 3.5.7. Vhodné substráty k výrobě bioplynu .....        | 19 |
| 3.5.8. Bioplyn z kukuřice.....                         | 22 |
| 3.5.9. Výhody a nevýhody využití kukuřičné siláže..... | 23 |
| 3.5.10. Faktory ovlivňující výtěžnost bioplynu .....   | 25 |
| 3.6. Batch process .....                               | 27 |
| 4. METODIKA .....                                      | 29 |
| 4.1. Charakteristika pokusného stanoviště .....        | 29 |
| 4.2. Realizace pokusu .....                            | 29 |
| 4.3. Stanovení produkce bioplynu .....                 | 30 |
| 4.4. Statistické vyhodnocení dat .....                 | 31 |
| 5. VÝSLEDKY .....                                      | 32 |
| 5.1. Výnosové parametry .....                          | 32 |
| 5.2. Produkce bioplynu .....                           | 34 |
| 5.3. Obsah metanu v bioplynu .....                     | 37 |
| 6. DISKUSE.....  | 40 |
| 7. ZÁVĚR .....   | 44 |

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 8. POUŽITÁ LITERATURA ..... | 46 |
|-----------------------------|----|

# 1. Úvod

Energie je jedním z nejdůležitějších faktorů globální prosperity. V dnešním energeticky náročném životním stylu je potřeba prozkoumat a využívat nové zdroje energie, které jsou obnovitelné, udržitelné a ekologické. Využívání fosilních paliv jako primárního zdroje energie vedlo ke klimatickým změnám, znečištění životního prostředí a degradaci, což vede k problémům v oblasti lidského zdraví.

Se stále stoupajícím počtem bioplynových stanic roste i poptávka po vhodných substrátech. Kukuřičná siláž by měla tvořit zhruba 34 % z celkového množství používaných substrátů. Kukuřice ve formě siláže poskytuje vysoké výnosy a je tedy vhodnou energetickou plodinou pro výrobu bioplynu. Kromě toho pěstování a využívání energetických plodin pro výrobu bioplynu je jednou z alternativ diverzifikace zemědělské výroby, která může značným významem zlepšit ekonomiku zemědělských podniků, neboť může být využívána podnikem samotným a přebytek energie může být prodáván. Kukuřičná siláž je tedy substrát s velkým potenciálem pro výrobu bioplynu.

Neustále se hledají nejrůznější modifikace tradičního způsobu pěstování silážní kukuřice, aby se dosáhlo maximální výtěžnosti bioplynu a zároveň bylo vše z rostliny využito, aby se předcházelo zbytečným odpadům. Jedním z nich může být například i vliv části rostliny či hustoty výsevu, na kterou je tato diplomová práce zaměřena. Dalším faktorem, který může mít vliv na produkci bioplynu je výběr hybridu, velikost rozteče nebo zralost rostliny.



## **2. Cíl práce**

Cílem práce je vypracování literárního přehledu zaměřeného na nové poznatky v produkci bioplynu ze silážní kukuřice. Ve výsledkové části budou vyhodnocena data z laboratorního pokusu, ve kterém byla sledována substrátová produkce bioplynu ze vzorku biomasy silážní kukuřice pěstované při odlišných hustotách porostu.

### Hypotéza 1

Odlišná hustota porostu má vliv na substrátovou produkci bioplynu.

### Hypotéza 2

Substrátová produkce bioplynu a kvalita bioplynu z jednotlivých částí rostlin kukuřice je odlišná.

### 3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

#### 3.1 Kukuřice (*Zea mays*)

Kukuřice je jednoletá, jednodomá, různopohlavní a cizosprašná rostlina. Patří do třídy jednoděložných *Monocotyledonae*, řádu lipnicotvárné *Poales*, čeledi lipnicovitých *Poaceae* a podčeledi kukuřicovitých *Zeeoideae* (Novák, Skalický, 2008).

Kukuřice je původní plodinou tropické a subtropické oblasti Jižní a Střední Ameriky a místním americkým indiánským kmenům byla známa již více než 4000 let před naším letopočtem. Její původ, vznik a vývoj avšak nebyl doposud objasněn. Do Evropy a ostatních světadílů se kukuřice dostala po objevení Ameriky v roce 1492 (Hruška, 1962).

Na území České republiky se kukuřice dostala z Blízkého východu, odkud se za turecké nadvlády rozšířila na Balkánský poloostrov a poté do Rumunska, Maďarska a Rakouska se rozšířila i v naší zemi. Nejstarší zmínka o pěstování kukuřice v českých zemích pochází z roku 1813 v Mittelpacherově „Rozmlouvání o připravování cukru ze zoftu stébel tureckého žita“. Rozmach pěstování kukuřice v České republice ale teprve nastal po druhé světové válce. Kukuřice se u nás pěstuje především jako silážní plodina. Pro pěstování kukuřice na zrno sloužila pouze jižní Morava v minulých letech. V 80. letech se pěstování kukuřice na zrno rozšířilo i do netradičních oblastí jako je Poohří a Polabí, ale i jinam (Šuk et al, 1998).

Jedním ze základních výživářských i ekonomických požadavků je co nejvyšší produkce hmoty kukuřice, ale mimo to by produkce hmoty měla být i co nejkvalitnější. Zároveň se vyžaduje:

- vysoký výnos
- vysoká koncentrace živin
- vysoká stravitelnost živin
- výborná silážovatelnost
- předpoklad nízkých ztrát konzervací a skladováním (Šuk et al, 1998).

### 3.2 Kukuřice na siláž

Kukuřice je známá jako běžně a snadno silážovatelná píce, nicméně se to týká pouze kukuřice, jenž obsahuje zhruba 27 % až 33 % sušiny. Optimální obsah je kolem 30 %. Také optimální doba sklizně je velice důležitá, protože se stává, že kukuřice je sklizena příliš brzy. Pokud se sklídí příliš brzy, zůstávají nevyužity její produkční schopnosti a fermentace nemá úplně ideální průběh.

Úspěšný fermentační proces je dán jednak kvalitou silážovaného materiálu, ale také technologií silážování. Nejdůležitějšími předpoklady pro tvorbu optimálních podmínek pro dlouhodobé udržení kvalitativních a kvantitativních vlastností silážované hmoty jsou:

- řezanka, co má vyhovující sušinu, obsah živin a strukturu
- řezanka, která není kontaminována látkami s velkými pufračními schopnostmi
- dokonalé vytěsnění vzduchu dusáním
- možná úprava silážované hmoty pomocí aditiv
- možnost rychlého naskladnění hmoty do silážního prostoru a její rovnoměrné rozvrstvení
- po navedení řezanky do silážního prostoru jeho rychlé vzduchotěsné uzavření
- zachování anaerobního prostředí v silážním prostoru po celou dobu skladování siláže (Šuk et al., 1998).

### 3.3 Kukuřice jako energetická plodina

Svět v 21. století se potýká s problémy rostoucí spotřeby energie a snížení dodávky energie, což vedlo k výzkumu využití obnovitelných zdrojů energie a v důsledku toho i vývoj nových technologických procesů výroby energie (Oslaj et al., 2010).

Energetické plodiny jsou jednou z alternativ, jak členit zemědělskou výrobu a posílit podnikání. Energie v podobě bioplynu může být použita ke zlepšení energetické bilance samotného podniku nebo nadbytečná energie může být nabízena k prodeji (Hutňan et al., 2010). S neustále stoupajícím počtem bioplynových stanic stoupá také nabídka po vhodných substrátech (Procházka et al., 2013). Jednou z nejlepších energetických plodin, která nabízí

velmi zajímavé výtěžky je právě kukuřice (Hutňan et al., 2010). I dle analýzy padesáti plánovaných bioplynových stanic je zřejmé, že dominovat bude kukuřičná siláž, která by měla tvořit cca 34 % z celkového množství používaných substrátů (Procházka et al., 2013).

Kukuřice je nejvíce využívanou energetickou plodinou ve většině stávajících bioplynových stanicích (Wellinger et al., 2013). Tato plodina obsahuje vysoký podíl vláknitých materiálů, které nejsou zpracovány anaerobní digescí a neuvolňují žádnou energii. Vysokoenergetické plodiny byly speciálně vyvinuty a minimalizoval se podíl vláknitých materiálů, a proto dávají vyšší výtěžky energie na tunu nebo na hektar. Je zřejmé, že tyto výhody na pěstování a sklizeň odrůd kukuřice s vysokou energetickou hodnotou se v současné době dostávají hodně do pozornosti pěstitelů, kteří si kladou za cíl zlepšit výtěžek energie a aby byly životaschopné v regionech, které by byly jinak nevhodné pro pěstování kukuřice. To také vedlo k vývoji delšího období sklizně u některých odrůd, jelikož jsou schopné udržet jejich energetický obsah až do podzimu (Pullen, 2015).

Kukuřičné siláže se ale mohou lišit v obsahu sušiny, složení a také především v anaerobní rozložitelnosti. Tyto rozdíly plynou z různých podmínek při pěstování a skladování. Důležitým faktem je i druh použité kukuřice (Procházka et al., 2013).

Také z výchozích produktů, jenž obsahují cukr nebo škrob, což je například i kukuřice cukrová třtina, cukrová řepa a téměř všechny druhy obilí, je možno vyrábět bioethanol, který řadíme mezi biopaliva první generace (Hromádka, 2012). Kukuřičná zrna jsou ideální surovinou pro výrobu ethanolu, protože endosperm je velice bohatý na škrob. Kukuřičný škrob je v současné době jednou z hlavních surovin pro výrobu biopaliv ve Spojených státech (Halford and Karp, 2011).

Bioplyn a bioethanol z kukuřice jsou obzvláště důležité, jelikož jsou velmi žádané při splnění budoucích globálních cílů udržitelnosti, snižování emisí z domácností, nahrazování fosilních paliv a také ve splnění cílů v oblasti obnovitelné energie. Technologie výroby bioethanolu a bioplynu jsou technologie, které jsou široce používané v celosvětovém měřítku (Arodudu et al., 2017).

### **3.4 Výběr hybridu**

Výběr vhodného hybridu se řadí mezi nejdůležitější pěstitelská opatření. Je téměř nezbytné zvolit takové hybridy, které v daných podmínkách zajistí vysoký a ekonomický

výnos. Jeden z nejdůležitějších faktorů je směr pěstování, tj. zda půjde o kukuřici na siláži nebo o kukuřici na zrno. U kukuřice na zrno může volba hybridu mít vliv na výnos až o zhruba 30 % (Šuk et al., 1998).

Během volby hybridů kukuřice dle ranosti používáme tzv. číslo FAO, což je číslo ranosti a také orientační ukazatel, který charakterizuje hybrid a délku jeho vegetace a to tak, že deset čísel FAO činí rozdíl v délce vegetační doby 1 až dva dny nebo 1 – 1,5 % obsahu sušiny zrna. Pro bramborářskou výrobní oblast jsou dle ranosti obvykle doporučovány nejranější hybridy skupiny FAO 160 – 250, pro řepařskou oblast jsou to pak hybridy skupiny FAO 250 – 300. Pro teplejší řepařskou oblast je možné volit i hybridy pozdnější. V kukuřičné oblasti je možné pěstovat hybridy skupiny FAO 300 – 400 (Fuksa et al., 2006).

### **3.5 Bioplyn**

Bioplyn může být produkován fermentací organických materiálů za nepřítomnosti vzduchu pomocí mikroorganismů. Dochází zde k rozkládání materiálů na meziprodukty, jako jsou alkoholy a mastné kyseliny a v konečné fázi také na methan, oxid uhličitý a vodu. Tento proces se nazývá anaerobní fermentace a je znám už poměrně dlouhou dobu (Mital, 1997).

Jeden z prvních lidí, kteří pozorovali fenomén biometanace, byl Alessandro Volta z Itálie. V roce 1776 byl zaznamenán dopis, jenž psal Volta příteli, že tento hořlavý vzduch je nepřetržitě produkován v jezerech a rybnících v okolí města Como v Severní Itálii. V roce 1806 William Henry uvedl, že Voltův plyn je totožný s metanovým plynem. Humphrey Davy kolem roku 1800 poznamenal, že methan byl přítomen v hromadách hospodářských hnojiv. Také v roce 1808 provedl Davy první laboratorní experiment na výrobu methanu anaerobní fermentací odpadů. Dále v roce 1895 byl bioplyn ze zařízení na úpravu odpadu v Exteru v Anglii shromažďován a používán k osvětlení nedalekého průlivu. Během druhé světové války byl zájem o bioplyn jako o palivo. Po válce se několik zemí jako například USA, Japonsko, Kanada, Rusko, Čína a Jižní Afrika, se zajímalo o biometanaci, ale později tento zájem ubýval v průběhu následujících tří desetiletí z důvodu nástupu fosilních paliv. Nicméně série energetických šoků, které otřáslы světovou ekonomikou od roku 1973 a spojené s ochranou životního prostředí, oživil zájem o biometanaci (Mital, 1997).

### 3.5.1 Produkce bioplynu

Organická hmota jako jsou potraviny, zbytky rostlin, živočišný hnůj, splaškový kal či biologicky odbouratelné části tuhého komunálního odpadu se rozkládají v nepřítomnosti volného kyslíku a vytváří plyn, který se skládá z 40 – 70 % methanu, zbytek je většinou oxid uhličitý se stopami jiných plynů (Abbasi et al., 2011).

Anaerobní digesce zahrnuje bakteriální fermentaci organických odpadů za nepřítomnosti volného kyslíku. Fermentace vede k rozpadu komplexních biologicky rozložitelných látek ve čtyřfázovém procesu:

1. Velké makromolekuly bílkovin, tuky a sacharidové polymery (jako celulóza a škrob) se rozkládají hydrolýzou na aminokyseliny, mastné kyseliny s dlouhým řetězcem a cukry.
2. Tyto produkty se v průběhu acidogeneze fermentují za vzniku těkavých mastných kyselin, zejména kyseliny mléčné, kyseliny propanové, kyseliny máselné a kyseliny valerové.
3. Při acetogenesi spotřebují tyto fermentační produkty bakterie a vytvářejí kyselinu octovou, oxid uhličitý a vodík.
4. Metanogenní organismy spotřebovávají acetát, vodík a část oxidu uhličitého za vzniku methanu (Abbasi et al., 2011).

### 3.5.2 Vlastnosti bioplynu

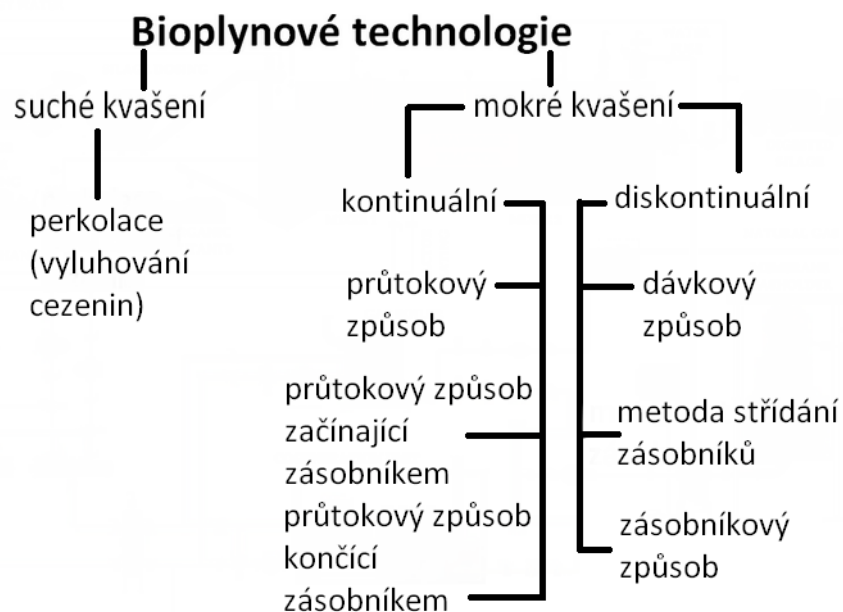
Bioplyn, který se skládá z 60 – 65 % methanu, 35 – 40 % oxidu uhličitého a stopy sirovodíku, amoniaku a dalších nečistot, je výbušný a toxický plyn. Methan, který je hlavní složkou bioplynu, je plyn bezbarvý, bez zápachu a chuti. Methan je také hořlavý ve směsi se vzduchem v koncentraci 5 – 15 % a proto je potenciálně nebezpečný (Mital, 1997).

### 3.5.3 Zařízení k výrobě bioplynu

Zařízení na výrobu bioplynu by mělo být vybaveno těmito stavebními prvky:

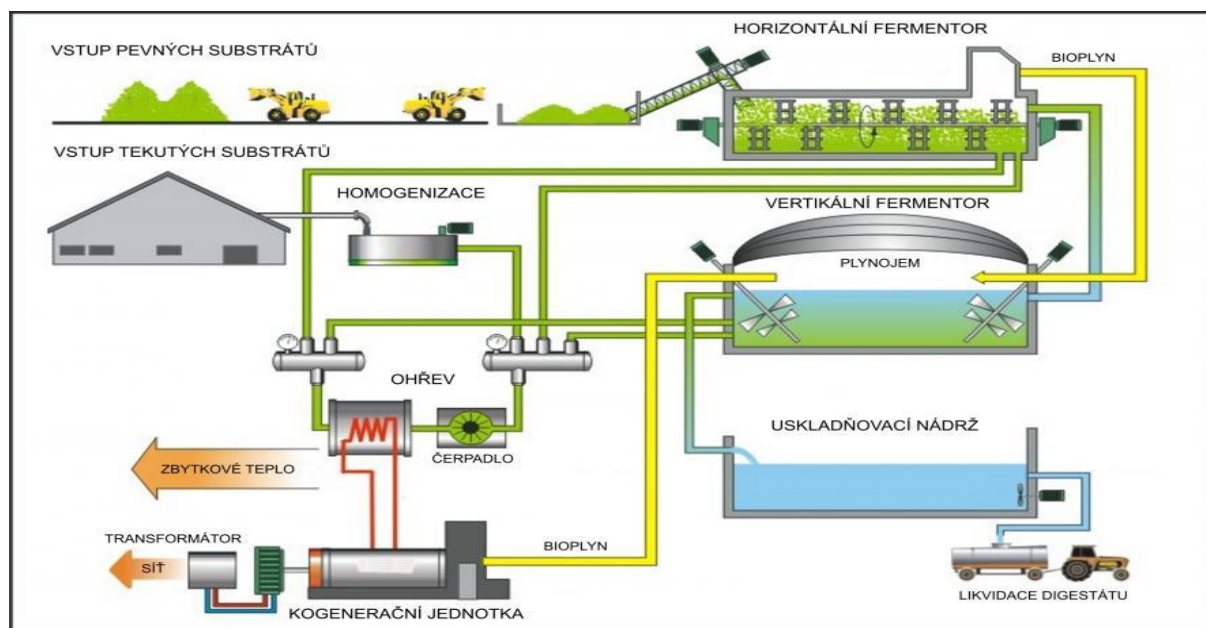
- Jímka, nejlépe s míchacím a drtícím zařízením.
- Vyhřívací nádrž s ohřívacím a míchacím zařízením.
- Plynojem, dle potřeby s pračkou a čistěním plynu.
- Kontrolní a monitorovací přístroje (Nová, 1982).

Bioplynové zařízení má hned několik různých řešení. Lze je zredukovat na několik technologických postupů, které jsou znázorněny na schématu níže (viz orázek 1). Postupy lze rozlišovat podle způsobu plnění na dávkový nebo průtokový postup, dále zda je proces jednostupňový nebo více stupňový či podle konzistence substrátu na kapalný nebo pevný (Schulz and Eder, 2004).



Obrázek 1: Technologické postupy bioplynové stanice. Zdroj: (Schulz and Eder, 2004), upraveno

Na následujícím obrázku (viz obrázek 2) je možné vidět procesy, které probíhají v bioplynové stanici.



Obrázek 2: Procesy probíhající v bioplynové stanici. Zdroj:

([http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bioplynove\\_stanice&site=odpady](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bioplynove_stanice&site=odpady))

### 3.5.4 Využití bioplynu

Bioplyn řadíme mezi ušlechtilé zdroje energie pro jeho vysoký obsah methanu a tím i jeho výhřevnosti. Bioplyn se odvádí z metanizačních reaktorů do nízkotlakového plynojemu a u tohoto místa se dále rozvádí k dalšímu zpracování. Část tohoto bioplynu se využívá k vyhřívání metanizačních nádrží a pro další tepelné hospodářství dané bioplynové stanice. Zbývající část energie se využívá například k výrobě tepla pro vytápění budov, na výrobu teplé vody, sušení, do domácností, kde je jeho primární využití při osvětlení a vaření.

Za neefektivnější se v současné době považuje využití bioplynu pro pohon stabilních motorů, využívaných pro výrobu elektrické energie s plným využitím odpadního tepla. Nevýhodou je nestabilní produkce bioplynu, jelikož anaerobní fermentační procesy lépe probíhají při teplotě kolem 40 °C, čili v zimním období je nutné část vyrobeného plynu využít na vyhřívání fermentoru. Během letního období máme tedy bioplynu přebytek a naopak v zimním období, kdy potřebujeme více elektrické a tepelné energie je zase bioplynu



nedostatek. Ve velké většině evropských zemí je bioplyn převážně používán pro přímé spalování nebo v kogeneračních jednotkách. V dopravě je využíván velice výjimečně. Využívá se především ve Švýcarsku, Švédsku, Francii a na Islandu.

Co se týče dopravy, má čistota bioplynu podstatný vliv na životnost motoru, která se špatnou kvalitou čištění rychle klesá. Čištění bioplynu je ale finančně náročné, a proto snahy vedou k nahrazení klasického spalovacího motoru, který pohání kogenerační jednotky, Stirlingovým motorem (Hromádko, 2012).

### **3.5.5 Ekonomika a dotace bioplynové stanice**

Pokud se bude investovat do obnovitelných zdrojů energie, každá si může předem spočítat, co ho jeho rozhodnutí bude stát a co a kolik mu přinese. Obecně každý projekt i projekty zabývající se obnovitelnými zdroji energií, ovlivňují následující ekonomické veličiny:

- Investiční výdaje – jsou to všechny jednorázové výdeje na projekt, zahájení stavby, technologické zařízení a jeho montáž, stavební úpravy, elektrickou přípravku, případně to mohou být i náklady na zakoupení pozemku.
- Doba životnosti zařízení – doba, po kterou bude možné zařízení využívat, aniž by bylo nutné opět investovat na obnovu zařízení.
- Provozní výdaje – výdaje na obsluhu zařízení, jeho pravidelnou údržbu, nákup paliv, energie a dopravy, pojištění, budoucí opravy, režie, pozemkové daně a jiné poplatky
- Roční produkce energie, případně energetických úspor. Ekonomickou efektivnost pozitivně ovlivní pokud se elektřina bude vyrábět v době špiček, kdy je její cena nejvyšší.
- Způsob financování – doba splacení, velikost a úroková sazba poskytnutého úvěru, cena vlastních peněz investora a případné dotace.

Ekonomický efekt pro investora je ovlivněn i daní z příjmů, ale také případnými daňovými úlevami či jinými podporami. V budoucnosti může mít vliv i případné zavedení

ekologických daní. Jejich výše by měla záviset na spotřebovaném množství energie nebo na produkci skleníkových plynů, které vznikají spalováním fosilních paliv, nikoliv biomasy.

Mimo obecné podpory, která vyplývá ze zákona č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů, je možnost nalézt spoustu možností finanční podpory. Jedná se o zdroje ze strukturálních a kohezních fondů Evropské unie a také o národní programy ČR. Jedná se zejména o tyto evropské programy: Operační program Životního prostředí a Operační program Podnikání a inovace, případně další operační programy. Také je možná podpora od Regionálních operačních programů, které spravují jednotlivé kraje. Národní programy prezentuje Státní program na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie (Murtinger a Beranovský, 2011). Program Obnovitelné zdroje energie má za cíl zvýšit podíl výroby energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě. Program je určený pro podniky všech velikostí a rozdělí mezi české firmy do roku 2020 přibližně 1,5 miliardy Kč ([www.oppik.cz](http://www.oppik.cz)). Projekty nebo záměry je také možné konzultovat v rámci sítě Energetická konzultační a informační střediska či v rámci Národního registru poradců CzechInvest nebo je možná i konzultace přímo u správců jednotlivých programů jako je například Státní fond životního prostředí (Murtinger a Beranovský, 2011).

### **3.5.6 Bioplynová stanice a legislativa**

Legislativa, která upravuje výstavbu i provoz bioplynové stanice je velice obsáhlá a obsahuje mnoho právních normativních aktů. Mezi zákony, které tuto problematiku upravují, patří: Zákon č. 100/2001 Sb., o posuzování vlivů na prostředí, Zákon č. 76/2002 Sb., zákon o integrované prevenci, Zákon č. 183/2006 Sb., stavební zákon, Zákon č. 254/2001 Sb., vodní zákon, Zákon č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a jeho prováděcí vyhlášky, Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech a Zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie. Tyto zákony zahrnují ještě několik vyhlášek. Mezi nejdůležitější se řadí: Vyhláška č. 482/2005 Sb., o stanovení druhů, způsobu využití a parametrů biomasy při podpoře výroby elektřiny z biomasy, Vyhláška č. 475/2005 Sb., kterou se provádějí některá ustanovení zákona o podpoře využívání obnovitelných zdrojů a nebo neméně důležitá vyhláška č. 356/2002 Sb., kterou se stanovují obecné emisní limity a stanovují seznam znečišťujících látek. Zápach vznikající při zpracování surovin je jedním z problémů, který je třeba řešit (Švec et al., 2010, Straka et al., 2006).

### 3.5.7 Vhodné substráty k výrobě bioplynu

Obecně může být pro výrobu bioplynu použita biomasa jakéhokoliv druhu obsahující sacharidy (škrob, celulóza a hemicelulóza), proteiny a tuky jako hlavní složky. Následující body jsou důležité pro výběr biomasy pro produkci bioplynu.

- Složení organické hmoty musí být pečlivě zvoleno pro fermentační proces.
- Potenciál organické hmoty pro tvorbu bioplynu by měl být co možná nejvyšší.
- Musí být zvolen substrát bez patogenů a dalších mikroorganismů, které mohou poškodit fermentační proces.
- Složení bioplynu musí být řádně prozkoumáno pro další použití (Arshad, 2017).

Jedním z rozhodujících faktorů je především obsah sušiny v materiálu. Optimální obsah sušiny je zhruba někde mezi 5 a 15 %. Pokud by byl obsah sušiny menší než 5 %, proces by sice ještě probíhal, nicméně zařízení by bylo nutné pohánět velkým množstvím vody, což by bylo nevhodné. Dalším z důležitých faktorů je poměr uhlíku a dusíku, který by měl dosahovat hodnot mezi 20:1 až 40:1 (Schulz and Eder, 2004). Amon et al. (2004) uvádí, že pokud je poměr příliš vysoký, uhlík nemůže být optimálně převeden na CH<sub>4</sub> a produkční potenciál CH<sub>4</sub> není plně využit. I hodnota pH hraje svojí roli. Ve slabě alkalickém prostředí by se měla pohybovat okolo 7,5. U kyselých substrátů jako jsou například výpalky, siláž a syrovátka je nutné, aby se hodnota pH zvýšila, tudíž bývá zapotřebí přidat vápno (Schulz and Eder, 2004).

V zemědělství se k výrobě bioplynu nejčastěji využívá jako substrát kejda či hnůj. Kejdou se rozumí směs kapalných a tuhých exkrementů zvířat, která jsou ustájena bez podestýlky či jen na nízké podestýlce na štěrbinových podlahách, roštích a v boxech, kde mohou ležet. Pro zpracování v bioplynových stanicích je nejvíce vhodná kejda z volného ustájení. Kvůli vysokému obsahu vody není možné tyto substráty bez dalších přísad kompostovat. (Schulz and Eder, 2004). Bioplyn, který vzniká při anaerobní fermentaci exkrementů hospodářských zvířat, mívá obvykle kolem 55 až 70 % metanu. Výhřevnost bioplynu závisí na druhu zpracovávaného exkrementu. Podle dostupných údajů má nejnižší výhřevnost bioplyn získaný zpracováním kejdy ze skotu a naopak nejvyšší výhřevnost má bioplyn získaný zpracováním

kejdy od prasat. Bioplyn, který získáváme při zpracování kejdy, obvykle obsahuje více sirovodíku, než je požadováno od výrobců stacionárních motorů u agregátů na výrobu elektrické energie (Jonáš a Petříková, 1988).

Produkce bioplynu ze zemědělské biomasy stále roste, vzhledem k tomu, že nabízí značný přínos pro životní prostředí a je dalším zdrojem příjmů pro zemědělce. Hospodářská účinnost anaerobní digesce také závisí na investicích na provoz zařízení na výrobu bioplynu a na optimální produkci metanu. Bioplyn je obnovitelný zdroj energie a snižuje obsah CO<sub>2</sub> (Oslaj et al., 2010, Amon et al., 2007).

Všechny zemědělské plodiny a zbytky plodin mohou být teoreticky využity pro výrobu bioplynu. Avšak pokud je obsah ligninu příliš vysoký, musí být předem připravena vhodná předúprava pro efektivní využití energetického potenciálu anaerobní digesce. Potenciální energetické plodiny lze rozdělit do několika kategorií (viz tabulka 1) (Nordic Council of Ministers, 2008). Výtěžek metanu u zemědělských plodin závisí na typu plodiny, době sklizně, způsobu sklizně a technologii konzervace. Dále také výtěžnost závisí na technologii bioplynového procesu, typu reaktoru a způsobu provozu (Nordic Council of Ministers, 2008).

Tabulka 1: Kategorie potenciálních energetických plodin. Zdroj: (Nordic Council of Ministers, 2008)

| <b>Kategorie potenciální energetických plodin</b> |                         |                       |                      |
|---|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| <b>Roční plodiny:</b>                             | <b>2-3leté plodiny:</b> | <b>Trvalé plodiny</b> | <b>Zbytky plodin</b> |
| Obiloviny   | Siláž:                  | Celoroční trávy       | Sláma z obilovin     |
| Pšenice   | Jetel                   | Ozdobnice             | Listy řepy           |
| Triticale   | Tolice vojtěška         |                       |                      |
| Siláž:  | Slunečnice              |                       |                      |
| Cukrová/krmná řepa                                | topinambur              |                       |                      |
| Kukuřice  | Konopí                  |                       |                      |
| Slunečnice  |                         |                       |                      |

Podle Sun et al. (2016) je hnůj vyprodukovaný kuřaty odpadní surovina, která má vysoký obnovitelný energetický potenciál, neboť je snadno odbouratelná během anaerobní digesce. Tento materiál má vysoký obsah bílkovin, který však uvolňuje amoniak při hydrolýze a to

může zvýšit vyrovnávací kapacitu během procesu anaerobní digesce. Využití hnoje od kuřat jako jediné suroviny způsobí ve většině případu selhání ve fermentoru, protože koncentrace celkového amoniakálního dusíku a volného amoniaku překračují hodnoty, které mohou být tolerovány. Aremu and Agarry (2013) také souhlasí s tím, že drůbeží výkaly mohou sloužit jako vhodný substrát pro výrobu bioplynu. V jejich pokusu testovali drůbeží výkaly jako hlavní substrát, společně s kukuřičnými palicemi a odpadním papírem. Výsledkem bylo, že drůbeží výkaly a ošetřené přidané substráty poskytovaly největší kumulativní průměrný objem bioplynu a hned poté následoval drůbeží trus s neošetřenými přidanými substráty. Samotný drůbeží trus měl pak nejmenší kumulativní průměrný objem bioplynu. Nicméně Arshad (2017) uvádí, že hnůj od skotu je lepší substrát než hnůj od ostatních hospodářských zvířat jako jsou například kuřata, koně či prasata. Je vhodný také pro inokulaci.

Bylo navrženo mnoho přístupů k řešení. Například u živočišných hnojiv toho bylo dosaženo smíšením se zemědělskými plodinami, zejména pak energetických plodin jako je kukuřice, tráva, jetel a z dřevin pak topoly a vrby. Přidávají se jako čistá směs nebo směs zajišťující stejnoměrnou kvalitu substrátu. Dle teoretické studie bylo vypočítáno, že denní produkce metanu by mohla být několikanásobně lepší společnou digescí s kukuřičnou siláží, hnojem skotu a hnojem kuřat. Podobný účinek byl také pozorován u hnoje od mléčného skotu, hnoje od kuřat a pšeničné slámy. Bylo zjištěno, že vykazují větší metanový potenciál než digesce jednotlivých složek, což naznačuje synergické účinky (Sun et al., 2016).

Dle další studie Wu et al. (2010) byly opět prokázány pozitivní účinky kukuřice. V této studii byl zkoumán hnůj od prasat společně se třemi zemědělskými zbytky, tj. kukuřičnými stonky, slámou z pšenice a slámou z ovsa, ke zvýšení produkce bioplynu. Výsledky ukázaly, že všechny zbytky plodin významně zvýšily produkci bioplynu a čistý objem metanu. Kukuřičné stonky dosáhly nejlepšího výsledku zvýšením denního maximálního objemu bioplynu ve srovnání s kontrolou, následované ovesnou slámou a poté pšeničnou slámou. Navíc kukuřičné stonky dosáhly nejvyššího obsahu metanu v bioplynu (zhruba 68 %), což bylo o 11 % vyšší než u ovesné slámy, zatímco pšeničná sláma a kontrola produkovaly bioplyn zhruba s 47 % obsahem metanu. Pšeničná sláma prokázala nižší produkci bioplynu než kukuřičné stonky a ovesná sláma, ačkoliv měla vyšší obsah uhlíku (46 %) než poslední dva jmenované zbytky (39 %). Podle Croce et al. (2016), kteří ve své práci zdůraznili velký potenciál slámy, se uvádí, že sláma je slibnou alternativou k energetickým plodinám, nicméně je třeba zdůraznit problémy spojené s používáním tohoto druhu biomasy k výrobě bioplynu. Jsou to zejména chemické vlastnosti slámy a také její 3D struktura biomasy, které výrazně snižuje schopnost produkovat bioplyn. Pokud se tedy považuje využití

slámy jako slibná alternativa k energetickým plodinám, je třeba podstoupit zvláštní kroky, aby se zvýšila produktivita. Nicméně ne všechny navrhované kroky jsou užitečné a také je třeba zvážit jejich složitost a náklady.

I Jacobs et al. (2016) provedli studii, kde zkoumal energetickou účinnost silážní kukuřice, cukrové řepy a ozimé pšenice. Studie byla provedena na základě tří terénních experimentů na vysoce produkčních místech v Německu. I když kultivace silážní kukuřice potřebovala největší energetický příkon v různých lokalitách, kompenzovala to energetická produkce a největší čistý energetický výnos. Co se týče cukrové řepy, tak energetická náročnost byla nižší. Rozdíly mezi oběma plodinami byly významné, ale ne ve všech případech, kdy se rozdíl projevil jen nepatrně. Ozimá pšenice vyžadovala nejnižší vstupní energii, ale také vykazovala nejnižší energetický výkon. Dospělo se k závěru, že bulvy cukrové řepy jsou vhodnou alternativou k silážní kukuřici.

### **3.5.8 Bioplyn z kukuřice**

Po celá desetiletí byla kukuřice pěstována pro výživu člověka i hospodářských zvířat a v menší míře i jako surovina pro průmyslové účely, ale ne pro biometanizaci. Až v posledních letech, kdy se vyvíjí podpora ochrany klimatu, biomasa hraje zásadní roli v rozvoji udržitelných energetických systémů. Svůj význam si získala především v několika evropských členských zemích, zejména pak v Německu, Rakousku a také v Itálii (Hermann and Rath, 2012).

Kukuřice se obecně považuje za primární surovinu. Všechny plodiny obsahují podíl vláknitých látek, které se nebudou rozkládat v anaerobní digesci a neuvolní žádnou energii (Deublein and Steinhauser, 2011). Kukuřice by měla být silážována před anaerobní digescí, jelikož to zvyšuje výtěžnost metanu (Amon et al., 2007) Silážní kukuřice se hodnotí na základě výtěžnosti sušiny, určité zralosti siláže a stravitelnosti buněčné stěny. Vysoký obsah škrobu je nezbytný, ovšem za cenu nízkých výtěžků. Nicméně vyšší obsah škrobu hraje důležitou roli při výrobě methanu. Bioplyn ze silážní kukuřice obsahuje pouze 50 – 55 % methanu kvůli vysokému obsahu sacharidů (Deublein and Steinhauser, 2011). Během jedné studie bylo zjištěno, že kukuřice (při obsahu vlhkosti 15 %) obsahovala 72 % škrobu, 10,5 % hemicelulózy či celulózy, 9,5 % bílkovin, 4,5 % oleje, 2 % cukrů a 1,5 % popela (Halford and Karp, 2011).

Dle studie Vervaeren et al. (2010) bylo testováno několik biologicky silážních aditiv na substrátech kukuřice pro jejich vliv na produkci bioplynu a zachování obsahu organické sušiny. Přidáním některých biologických přísad a následného skladování po dobu 7 týdnů by mohlo zvýšit produkci bioplynu a biometanu na organickou sušinu ve srovnáním s neošetřeným vzorkem. Běžný mikrobiální inokulant obsahující homofermentační a heterofermentační bakterie (Bonsilage Mais) s vysokou výrobní kapacitou kyseliny mléčné měl za následek úspěšné silážování, ale neměl příznivý vliv na výrobu bioplynu a biometanu ve srovnáním s neošetřeným vzorkem. Komplexnější přísady s heterofermentační aktivitou a homofermentační aktivitou (Silasil Energy), stejně jako enzymy (Sil-all) či bakterie a kvasinky (Microferm) účinně zvyšuje produkci bioplyn na organickou sušinu. Přidání komplexnějších aditiv by mohlo během anaerobní digesce usnadnit proces hydrolýzy. Přesto by inokulum mělo být pečlivě zváženo, v závislosti na tom, zda silážovaná biomasa následně projde anaerobní digescí.

I podle Zhang et al. (2011) poskytuje biologická úprava zlepšení biologické rozložitelnosti. Experiment se zakládal na předběžné úpravě za pomoci komplexních mikrobiálních činidel. Tyto činidla byly použity k předčištění kukuřičné slámy při teplotě přibližně 20 °C, aby se zlepšila její biologická rozložitelnost a produkce bioplynu. Ošetření vedlo ke zvýšení celkového výtěžku bioplynu o 33,07 %, o 75,57 % více metanového výtěžku ve srovnání s neošetřeným vzorkem. Analýzy chemického složení ukázaly snížení celkového obsahu ligninu, celulózy a hemicelulózy. Tyto změny přispěly ke zlepšení výroby bioplynu. Biologická předběžná úprava by tak mohla být účinnou metodou pro zlepšení biologické rozložitelnosti.

### **3.5.9 Výhody a nevýhody využití kukuřičné siláže**

Bezesporu mezi hlavní výhody využívání kukuřičné siláže při výrobě bioplynu patří především vysoký výnos kukuřice na hektar, výborná silážovatelnost a vysoká produkce bioplynu. Jako hlavní nevýhodu lze považovat, že kukuřice používána pro výrobu bioplynu nemůže být využívána tak, jak je navržena pro výživu přežvýkavců. Kukuřičná siláž se díky tomu stává vzácnou komoditou, a také taková konkurence deformuje její cenu. Mimo to hromadné pěstování kukuřice jako monokultury zaujímá ornou půdu pro pěstování jiných plodin a zvyšuje potřebu hnojení a ochrany rostlin (Hutňan, 2016).

V následující tabulce (viz tabulka 2) je srovnání jednotlivých surovin a jejich výtěžek metanu. Silážní kukuřice je víceméně srovnatelná s kejdou a trusem. Využití kukuřice je ale výhodnější, pokud jej srovnáme například s travní senází nebo slámou. Velice dobré výtěžky poskytuje žito a bramborové slupky. Petříková a Weger (2015) zase uvádí, že krmný šťovík je vítanou alternativou nebo i náhradou za tradičně využívanou kukuřici, zvláště pokud jsou půdy ohrožené erozí. Také porovnávali šťovík s kukuřicí, kde bylo testováno pět variant: dvě základní varianty, jedna digestát a jedna kejda bioplynové stanice a v dalších třech byla ke kejdě a digestátu přidána testovaná hmota, tedy zelená hmota a to takto: 20 % kejdy + 20 % digestátu + 60 % šťovíku nebo kukuřice, v další variantě bylo 15 % kejdy + 15 % digestátu + 70 % šťovíku nebo kukuřice a v poslední variantě to bylo 10 % kejdy + 10 % digestátu + 80 % šťovíku nebo kukuřice. Výsledky ukázaly, že nejvíce bioplynu se vytvořilo ve variantě, kde bylo přítomno 60 % obou plodin, při 70 % se výsledek zhoršil a při 80 % obou rostlin vývin bioplynu poklesl ještě více, a to zvláště v případě kukuřice. Nejvyšší přídavek zelené hmoty tedy není nejvhodnější, ale výsledky krmného šťovíku na fermentaci suroviny jsou příznivé a v některých případech i lepší než u tradičně využívané kukuřice.

Využívání polních energetických plodin jako jsou například čiroky, konopí, světlice či hořčice, pro energetické účely je vhodné i při výrobě bioplynu. Tyto plodiny mohou nahradit i tradiční kukuřici. Výhodné pak bývají zejména plodiny víceleté, kterými je možné kukuřici nahradit hlavně na svažitéch pozemcích, kde ochrání půdu proti erozi. Další výhodou je, že se jedná i o jiné druhy rostlin než řepka, obilí a kukuřice, které v současné době na našich polích mají jednoznačnou převahu. To je pro trvalé udržení půdní úrodnosti problematické. Pokud dojde k rozšíření sortimentu plodin, rozšíří se tak i biologická diverzita a tím posílí i ekologická stabilita v zemědělské krajině (Petříková a Weger, 2015).



Tabulka 2: Srovnání měrných výtěžků metanu vybraných surovin. Zdroj: (Straka et al, 2006), upraveno.

| Surovina          | Měrný výtěžek CH <sub>4</sub> [l/kg] |
|-------------------|--------------------------------------|
| Hovězí kejda      | 107-317                              |
| Vepřová kejda     | 222-533                              |
| Slepičí trus      | 199-471                              |
| Kukuřice čerstvá  | 342-480                              |
| Kukuřice siláž    | 171-555                              |
| Sláma obilní      | 270-310                              |
| Travní senáž      | 235-480                              |
| Bramborové slupky | 550                                  |
| Obilní plevy      | 600                                  |
| Žito              | 410-720                              |

### 3.5.10 Faktory ovlivňující výtěžnost bioplynu z kukuřice

Bruni et al. (2010) ve své studii zjistili, že nejvyšší energetický výtěžek má čerstvá kukuřice (celá rostlina) v době sklizně. Ani čas sklizně a ani odrůda kukuřice neměly významný vliv na výtěžek metanu. Amon et al. (2004) také tvrdí, že maximální výtěžnost metanu je dosažena při anaerobní digesci celé kukuřice. Digeste pouze jednotlivých částí poskytuje o 43-70 % méně metanu. I podle Seppälä et al. (2012) nemá doba sklizně a ani doba setí vliv na specifické výtěžky metanu. A i zde se potvrzuje, že nejvyšších výtěžků metanu je možné dosáhnout, pokud využijeme celou plodinu. Celá kukuřice obsahuje živiny, které jsou vhodné pro anaerobní mikroby a koncentrace živin může být příznivější pro produkci metanu z celé plodiny než produkce pouze z listů, palic a lodyh odděleně. I kukuřičný odpad má svůj význam, jak uvádí Eze and Ojike (2012). Byly smíchány a rozdrceny ve vodě kukuřičné plevy, stonky a palice, které podléhaly anaerobní digesci 30 dní. Získané výsledky ukazují, že i když plevy, stonky i palice mají potenciál vyrábět bioplyn, plevy produkují více bioplynu než ostatní dva odpady. Amon et al. (2004) uvádí, že odrůdy s vysokým obsahem bílkovin, tuků, celulózy, hemi-celulózy, škrobu a s vysokým potenciálem pro výrobu biomasy jsou obzvláště vhodné pro účely anaerobní digesce. Surová vláknina

neprodukovala moc metanu. Surová bílkovina, vláknina a celulóza klesly v průběhu vegetačního období a naopak hemi-celulóza a obsah škrobu vzrostly. Menardo et al. (2015) se zase ve své práci zabývali obsahem látek v jednotlivých částech kukuřice. Ve zrnech kukuřice byl nejvíce zastoupen obsah bílkovin a nejnižší obsah bílkovin pak obsahovalo klasové větveno. Sacharidy rozpustné ve vodě jsou nejvíce obsažené ve stéblech, podobně jako obsah ligninu, který je též nejvíce zastoupen ve stéblech a listech. Bíro et al. (2008) analyzovali celé rostliny kukuřice, které se vzájemně rozlišovaly číslem FAO. Testované kukuřičné hybridy s různou délkou dozrání se vyznačovaly značnými rozdíly v obsahu kyseliny mléčné, alkoholů, pH a obsahu fermentačních produktů. Z experimentu bylo zjištěno, že nejlepší parametry pro fermentaci měl středně pozdní hybrid s číslem FAO 420. Pro tento hybrid byly typické nejvyšší koncentrace kyseliny mléčné a nejnižší obsah kyseliny octové, což pozitivně ovlivnilo hodnotu pH. Dle výsledků Oslaje et al. (2010) z laboratorního experimentu vykazovaly vyšší výnosy bioplynu a biometanu kukuřice s vyšším číslem FAO (FAO 400 a FAO 500) s čímž souhlasí i Amon et al. (2004). Také uvádí, že kukuřice s pozdním zráním (FAO 600) lépe využívá svůj potenciál než odrůdy středního a raného typu. Podle jiné studie (Hermann and Rath, 2012) výsledky ukázaly, že specifický výnos kukuřice klesá v pozdějších stádiích zrání. Klesající specifický výnos kukuřice s pokročilým dozráním se pravděpodobně připisuje lignifikaci buněčné stěny, která omezuje přístup mikrobiálních enzymů na sacharidy buněčných stěn a tak výrazně snižuje jejich enzymatickou hydrolýzu. Schittenhelm (2008) provedl studii na kukuřičných hybridech s velmi kontrastní zralostí v letech 2004 a 2005, která zkoumala vliv data sklizně a hybridní zralost. Výtěžek celých rostlin byl stanoven několikrát po kvetení a biomasa byla analyzována dle složení živin. V obou experimentálních letech měly prototypy pozdní energetické kukuřice nižší koncentraci tuku a bílkovin, ale vyšší koncentraci popela, detergentních vláken a ligninu ve srovnání s klimaticky adaptovanými středně ranými hybridy. Navzdory podstatně rozdílné koncentraci živin mezi kukuřičnými hybridy neexistovala jasná spojitost mezi chemickým složením a specifickým výtěžkem metanu. Na rozdíl od středně raných hybridů dosáhly pozdní hybridy maximálního specifického výtěžku metanu a maximálního výtěžku metanu na hektar v konečné fázi sklizně. Je tedy patrné, že pozdní kukuřice pro energetické účely, která plně využívá vegetačního období je vhodnější pro produkci bioplynu za předpokladu, že koncentrace sušiny v celé rostlině je dostatečně vysoká, aby produkovala kvalitní siláž. Co se týče hustoty výsevu, tak podle Wiyoa et. al. (1999) má zvýšení hustoty výsevu negativní vliv na výnos kukuřice. Novacek (2011) zase ve svém experimentu zkoumal vliv twin-row při různých výsevcích. I jeho výsledky naznačují, že twin-row i různé výsevky mají zanedbatelný

vliv na výnos a růst kukuřice. S tím, že nárůst výnosu kukuřice při uspořádání twin-row byl minimální, souhlasí i studie, kterou provedl Balkcom et al. (2011). Uspořádání řádků mělo malý vliv na výnosy kukuřice, zatímco hustota výsevu měla největší vliv na výnosy. Nicméně je nutno dodat, že pěstitelé, kteří využívají twin-row nezaznamenali snížení výnosu. Abuzar et al. (2011) také zkoumal efekt různých hustot výsevků, konkrétně šest hustot a zjistil, že vyššího výnosu kukuřice se také dosáhne při nižším výsevu, tj. 60 000 rostlin/ha, což je ovšem v rozporu s obdobnou studií, kterou se zabývali Yilmaz et al. (2007). Uvádějí, že genotyp kukuřice a hustota výsevu měly významný vliv na výnos sušiny a na některé agronomické charakteristiky. Taktéž uvádějí, že nejvyšší výnosy byly při hustotách výsevu mezi 114 000 a 143 000 rostlin/ha. V jiné studii (Turgut et. al., 2005) publikovali, že hybrid, rozteč řádků a hustota výsevu významně ovlivnily některé morfologické znaky. Pokud je výsevek vyšší, rostliny tak lépe využívají dostupné sluneční záření a zvýší-li se počet rostlin na plochu, je dosaženo vyššího výnosu zrna.

### **3.6 Batch process**

U batch procesu nebo-li u dávkového postupu (anglické slovo "batch" zde označuje dávku, plnění, sadu), se fermentor naplní jednou. Další substrát se nepřidává ani neodjímá a dávka pak vyhnívá do konce doby kontaktu. Produkce plynu se po naplnění pomalu zvyšuje, dosáhne maxima a posléze klesá. Po skončení doby kontaktu se fermentor najednou vyprázdní. V nádrži se ale ponechá menší množství vyhnílého kalu, aby se nová dávka naočkovala již zapracovanými bakteriemi. V praxi po mnoho let žádné zařízení na dávkovém systému nepracovalo. V současné době se touto technikou zabývá pouze jedna firma a zatím bylo uvedeno do provozu několik zařízení, které fungují na dávkovém typu.

Oproti tomu s dávkovým systémem se při laboratorních pokusech pracuje ve většině případů. Metoda je vyhovující především z hygienického hlediska, jelikož při ní nedochází k míchání s čerstvým substrátem (Schulz and Eder, 2004).

Podle studie Míchal et al. (2016) je možné si tuto metodu popsat na konkrétním experimentu. Každý testovaný vzorek byl proveden v 5 opakováních. Inokulum a substrát byly přidány do zkumavek a společně smíchány s destilovanou vodou a vzorkem trávy a poté byly zkumavky utěsněny zátkami. Objem vyrobeného bioplynu byl stanoven volumetrickou metodou, kde je vyrobený objem bioplynu zaznamenán. Inokulum bylo určeno k produkci

bioplynu – vyrobený bioplyn byl odečten z každého vzorku. Testy trvaly 57 dní. Vzorky plynu byly odebrány přes zátky. Během prvních dvou týdnů testů byla stanovena produkce bioplynu každý den, v následujících dvou týdnech byl měřen každý druhý den a po zbývajícím čase už pouze jednou týdně.

## **4. METODIKA**

### **4.1 Charakteristika pokusných stanovišť**

Pokus se silážní kukuřicí byl založen v roce 2015 na pokusném pozemku Výzkumné stanice v Červeném Újezdu. Stanoviště v Červeném Újezdu se nachází v řepařské výrobní oblasti a je v nadmořské výšce 398 m n.m. V řepařské výrobní oblasti je zpravidla průměrná roční teplota vzduchu kolem 8-9 ° C s průměrným ročním úhrnem srážek do 600 m n. m (Tyšer, 2010).

Co se týče půdních charakteristik, tak stanoviště v Červeném Újezdu spadá pod Bělohorskou plošinu. V půdě se vyskytují převážně spraše a nevápenité sprašové pokryvy. Na sprašovém substrátu je především hnědozem, méně hnědozemě illimerizované, černozemě illimerizované a hnědozemě slabě oglejené. Půdní reakce je neutrální a obsah humusu v této půdě je střední. Hloubka ornice je zhruba mezi 28 a 40 cm.

### **4.2 Realizace pokusů**

Pro pokusy byl vybrán středně raný hybrid Koblenz (FAO 280) a byl založen ve třech výsevcích a to: 90 000 – 110 000 – 130 000 rostlin/ha ve třech různých roztečích: 70 cm, 35 cm a twin-row 50:20 cm. Experiment byl založen na 9 parcelách při 4 opakováních. Jedna parcela měla velikost 22,5 m<sup>2</sup> (4,5 x 5 m). pro vyhodnocení a prezentaci výsledků v této diplomové práci byly vybrány dvě varianty: varianta, která se rovná hustotě výsevku 90 000 rostlin/ha a varianta, která je rovna hustotě výsevku 130 000 rostlin/ha.

V době silážní zralosti silážní kukuřice, byl stanoven výnos. Výnos čerstvé hmoty silážní kukuřice (t/ha) byl stanoven zvážením zelené hmoty v kg a poté přepočten na 1 hektar. Stanovení výnosu suché hmoty (t/ha) bylo získáno na základě výnosu zelené hmoty a hodnoty sušiny. Pro hodnocení kvalitativních ukazatelů došlo k odběru 5 rostlin. Ty byly rozděleny na palici a zbytek rostliny a poté vysušeny při teplotě 60 °C a následně byla stanovena hmotnost sušiny. Vzorky byly sešrotovány na laboratorním mlýnu se sítím a

průměru otvorů 1,0 mm. Směsný vzorek byl vytvořen ze čtyř opakování každé varianty. Následně byl analyzován na produkci bioplynu v pěti opakováních.

### **4.3 Stanovení produkce bioplynu**

Substrátová produkce bioplynu ze silážní kukuřice se stanovovala za pomoci jednorázových laboratorních batch testů, které se prováděly za anaerobních podmínek. Při tomto pokusu byly používány plynotěsné skleněné láhve o objemu 120 ml, do kterých byl nadávkován testovaný materiál. Testovaný materiál obsahoval zhruba 0,7 g vzorku kukuřičné biomasy, 30 g inokula a následně byl objem do 80 g doplněn demineralizovanou vodou.

Inokulum pocházelo z Krásné Hory nad Vltavou a směs celého inokula byla tvořena z 60 % kejdy a 40 % hmotnosti silážní kukuřice. Ustálení inokula probíhalo 10 dní a to při teplotě 40 °C a jeho průměrná hodnota pH činila 8,2. Koncentrace sušiny organické hmoty (ODM) činila 71,1 % sušiny (DM) a rozpustná chemická spotřeba kyslíku (COD) byla 2205 mg.l<sup>-1</sup>. Lahve se před umístěním do termokomory uzavřeny gumovým septem. V termokomoře byly mezofilní podmínky a teplota zhruba 40 °C. Lahve tu byly uloženy po dobu 40 dnů, poté produkce bioplynu klesala k nule a proces byl následně ukončen. V průběhu tohoto experimentu se stanovovala substrátová produkce bioplynu za pomoci metody objemového měření, která je založena na principu měření objemu kapaliny vytlačené pomocí plynoměrné byrety. Pro zjištění produkce bioplynu vyprodukovaného samotným inokulem, byl použit vzorek, který obsahoval pouze inokulum.

Během testů byly hodnoceny i kvalitativní charakteristiky bioplynu. Koncentrace metanu byla stanovena za pomoci plynového chromatografu. Tento chromatograf byl vybaven tepelně vodivým detektorem 90 m x 0,37 mm kolona (Restec). Vodík byl nosným plynem a objem jeho nástřiku činil 0,2 ml, jeho teplota byla 110 °C a teplota pece byla 195 °C. Na závěr pokusů byla zjištěna degradace organické složky ze všech vzorků.

Celková produkce bioplynu (m<sup>3</sup>/ha) byla stanovena vynásobením průměrné substrátové výtěžnosti bioplynu s množstvím sklizené sušiny z testovaných variant.

#### **4.4 Statistické vyhodnocení dat**

Statistické vyhodnocení dat bylo provedeno v programu Statistica 12 za pomocí jednofaktorové a vícefaktorové analýzy rozptylu (ANOVA) s následným vyhodnocením dle Tukeyova HSD testu ( $\alpha=0,05$ ).

## 5. VÝSLEDKY

### 5.1 Produkční parametry

V tabulce č. 3 jsou prezentovány výsledky, které se týkají výnosových parametrů silážní kukuřice u vybraných variant.

Z výsledků je patrné, že nebyl zjištěn průkazný vliv hustoty výsevu na substrátovou produkci bioplynu, ovšem u části rostlin je možné jednoznačně říci, že produkce byla statisticky významně větší u palice než u zbytku rostliny.

Dalším testovaným faktorem byl vliv hustoty výsevu a části rostlin na výnos sušiny. U hustoty výsevu nebyly prokázány statisticky významné rozdíly, ovšem u částí rostlin jsou prokazatelné. Zbytek rostliny vykazuje větší výnos než palice. Hustota výsevu neměla na výnos vliv.

U celkové produkce bioplynu, která byla vypočtena jako součin substrátové produkce bioplynu a výnosu sušiny, nebyly prokázány statisticky významné rozdíly u žádného z testovaných faktorů.

Při hodnocení rozkladu organické hmoty byly prokázány statisticky významné rozdíly mezi palicí a zbytkem rostliny. U palice dochází k vyššímu rozkladu organické hmoty než u zbytku rostliny. Další z testovaných faktorů, hustota výsevu, neměl významný vliv na rozklad organické hmoty.

Z výsledků je patrné, že hustota výsevu nevykazuje statisticky významný efekt na hmotnost rostlin, procentuální podíl palic a sušinu celých rostlin, palic a zbytku rostlin.



Tabulka 3: Výnosové parametry silážní kukuřice v závislosti na částech rostliny a hustotě výsevu (Červený Újezd, 2015)

| Výsevek<br>(ks/ha) | Část<br>rostliny   | Subst.<br>produkce<br>e<br>bioplynu<br>(ml/g) | Celk.<br>produkce<br>bioplynu<br>(m <sup>3</sup> /ha) | Výnos<br>(t/ha)  | Rozklad<br>OH<br>(%) | Hm.<br>rostlin<br>(g) | Podíl<br>palic<br>(%) | Sušina<br>celých<br>rostlin<br>(%) | Sušina<br>palic<br>(%) | Sušina<br>zbytku<br>rostliny<br>(%) |
|--------------------|--------------------|---|---|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 90 000             |                    | 648   | 8199  | 12,8             | 77,6                 | 130,5                 | 44,8                  | 33,2                               | 42,3                   | 28,5                                |
| 130 000            |                    | 654   | 8701  | 13,5             | 78,1                 | 113,5                 | 43,9                  | 33,5                               | 40,2                   | 29,5                                |
| <i>P</i>           |                    | <i>0,311</i>                                  | <i>0,318</i>  | <i>0,398</i>     | <i>0,313</i>         | <i>0,145</i>          | <i>0,895</i>          | <i>0,870</i>                       | <i>0,390</i>           | <i>0,446</i>                        |
|                    | Palice             | 716 <sup>b</sup>                              | 4170  | 5,8 <sup>a</sup> | 81,8 <sup>b</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
|                    | Zbytek<br>rostliny | 586 <sup>a</sup>                              | 4280  | 7,3 <sup>b</sup> | 73,9 <sup>a</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
|                    | <i>P</i>           | <i>&lt;0,000</i>                              | <i>0,512</i>  | <i>&lt;0,000</i> | <i>&lt;0,000</i>     |                       |                       |                                    |                        |                                     |
| 90 000             | Palice             | 716 <sup>b</sup>                              | 4100  | 5,7 <sup>a</sup> | 82,1 <sup>b</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
| 130 000            | Palice             | 716 <sup>b</sup>                              | 4239  | 5,9 <sup>a</sup> | 81,6 <sup>b</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
| 90 000             | Zbytek<br>rostliny | 580 <sup>a</sup>                              | 4098  | 7,1 <sup>b</sup> | 73,1 <sup>a</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
| 130 000            | Zbytek<br>rostliny | 593 <sup>a</sup>                              | 4462  | 7,5 <sup>b</sup> | 74,6 <sup>a</sup>    |                       |                       |                                    |                        |                                     |
| <i>P</i>           |                    | <i>0,359</i>                                  | <i>0,503</i>  | <i>0,599</i>     | <i>0,049</i>         |                       |                       |                                    |                        |                                     |

## 5.2 Produkce bioplynu

V tabulce č. 4 jsou prezentovány výsledky relativní kumulativní produkce bioplynu ze silážní kukuřice. V tabulce jsou uvedeny hodnoty ze 7 vybraných dnů měření produkce bioplynu.

Z výsledků je patrné, že hustota výsevku měla statisticky průkazný vliv na rychlost produkce bioplynu. Vyšší hodnoty byly od 3. do 30. dne zaznamenány u výsevku 90 000 rostlin/ha.

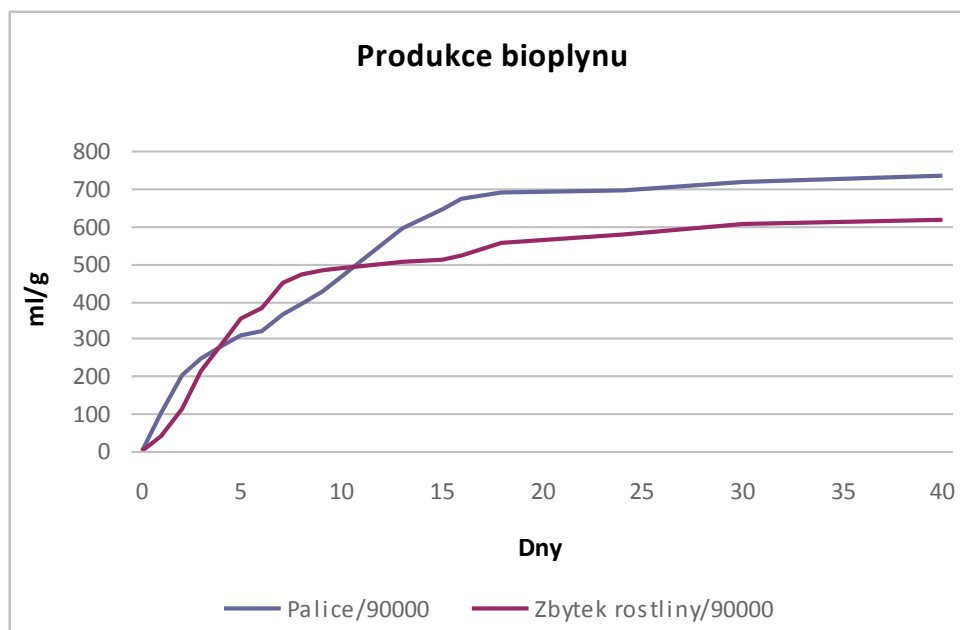
Další výsledky ukazují, že statisticky průkazný vliv na rychlost tvorby bioplynu měla i část rostliny. Palice během prvního dne vykazovaly větší produkci bioplynu než zbytek rostliny. Tyto rozdíly jsou průkazné i mezi 6. a 9. dnem, kdy ale naopak vyšší hodnoty byly zaznamenány u zbytku rostliny. K 15. dni však palice opět vykazovala vyšší hodnotu produkce bioplynu.

Z dalších výsledků vyhodnocení interakce výsevku a části rostliny je patrné, že hustota výsevku u palic má vliv na produkci bioplynu na začátku měření, kdy nižší hustota výsevku vykazuje větší produkci bioplynu. Zhruba 50 % bioplynu bylo vytvořeno během 6. dne a zhruba 80-90 % bioplynu bylo vyprodukováno do 15. dne. U zbytku rostliny má hustota výsevku vliv na produkci bioplynu, kdy při nižším výsevku zbytek rostliny produkuje více bioplynu během 3. až 9. dne měření.

Tabulka 4: Relativní kumulativní produkce bioplynu (%) silážní kukuřice ve vybraných dnech v závislosti na částech rostliny a hustotě výsevu (Červený Újezd, 2015)

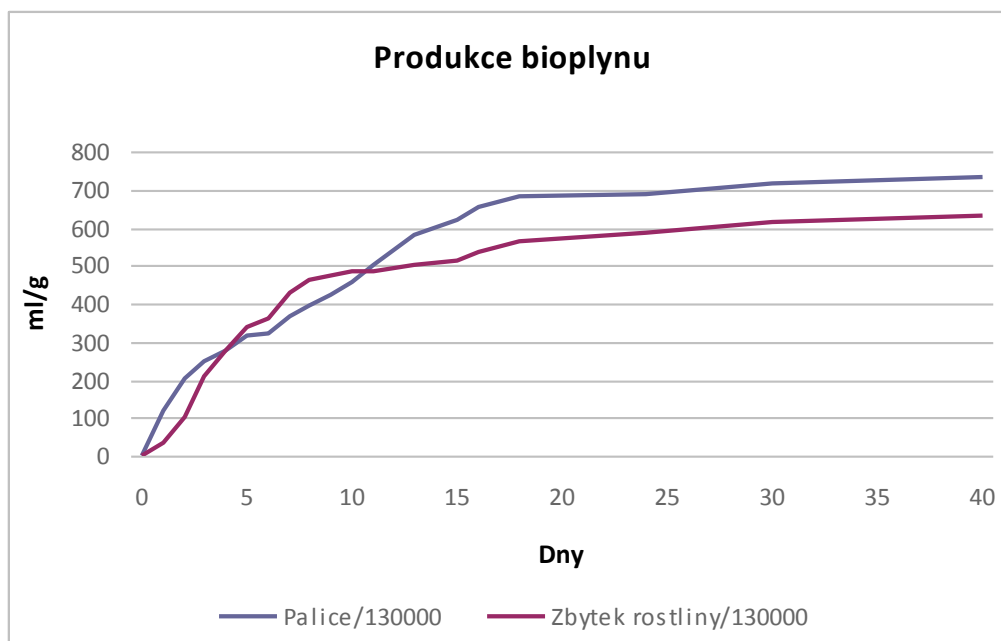
| Výsevek<br>(ks/ha) | Část<br>rostliny   | Den               |                   |                   |                   |                   |                    |     |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|-----|
|                    |                    | 1                 | 3                 | 6                 | 9                 | 15                | 30                 | 40  |
| 90 000             |                    | 10,4              | 34,4 <sup>b</sup> | 52,4 <sup>b</sup> | 68,1 <sup>b</sup> | 87,9              | 97,8 <sup>b</sup>  | 100 |
| 130 000            |                    | 10,6              | 33,3 <sup>a</sup> | 50,9 <sup>a</sup> | 66,8 <sup>a</sup> | 86,9              | 97,4 <sup>a</sup>  | 100 |
| <i>P</i>           |                    | <i>0,468</i>      | <i>0,010</i>      | <i>0,006</i>      | <i>0,033</i>      | <i>0,102</i>      | <i>&lt;0,000</i>   |     |
|                    | Palice             | 14,9 <sup>b</sup> | 33,8              | 43,8 <sup>a</sup> | 58,0 <sup>a</sup> | 90,4 <sup>b</sup> | 97,7               | 100 |
|                    | Zbytek<br>rostliny | 6,1 <sup>a</sup>  | 33,9              | 59,5 <sup>b</sup> | 76,9 <sup>b</sup> | 84,5 <sup>a</sup> | 97,6               | 100 |
|                    | <i>P</i>           | <i>&lt;0,000</i>  | <i>0,938</i>      | <i>&lt;0,000</i>  | <i>&lt;0,000</i>  | <i>&lt;0,000</i>  | <i>0,119</i>       |     |
| 90 000             | Palice             | 14,0 <sup>b</sup> | 33,9 <sup>a</sup> | 43,4 <sup>a</sup> | 58,0 <sup>a</sup> | 91,7 <sup>c</sup> | 97,9 <sup>b</sup>  | 100 |
| 130 000            | Palice             | 15,8 <sup>c</sup> | 33,8 <sup>a</sup> | 44,2 <sup>a</sup> | 58,1 <sup>a</sup> | 89,2 <sup>b</sup> | 97,5 <sup>a</sup>  | 100 |
| 90 000             | Zbytek<br>rostliny | 6,7 <sup>a</sup>  | 34,9 <sup>b</sup> | 61,4 <sup>c</sup> | 78,2 <sup>c</sup> | 84,2 <sup>a</sup> | 97,7 <sup>ab</sup> | 100 |
| 130 000            | Zbytek<br>rostliny | 5,5 <sup>a</sup>  | 32,8 <sup>a</sup> | 57,5 <sup>b</sup> | 75,5 <sup>b</sup> | 84,7 <sup>a</sup> | 97,4 <sup>a</sup>  | 100 |
| <i>P</i>           |                    | <i>0,001</i>      | <i>0,012</i>      | <i>&lt;0,000</i>  | <i>0,026</i>      | <i>0,0149</i>     | <i>0,683</i>       |     |

V grafu č. 1 je srovnání výtěžnosti bioplynu z palice a ze zbytku rostlin při hustotě výsevu 90 000 rostlin/ha. Palice při hustotě výsevu 90 000 rostlin/ha vykazovaly větší výtěžnost bioplynu než zbytek rostliny při tomtéž výsevu během prvních 4 dnů trvání batch testů. Po 4. dni začíná větší výtěžnost vykazovat druhý vzorek (zbytek rostliny při hustotě výsevu 90 000 rostlin/ha) a tato výtěžnost stoupá až do 10. dne, poté už na křivce nejsou pozorovány významnější změny a další přírůstek je již nízký. U palice byl zaznamenán menší přírůstek bioplynu během 5. - 10. dne, než u zbytku rostliny, ale produkce u palice i po 10. dni stoupala a křivka začíná být ustálenější až po dni 15. Z tohoto grafu je možné odvodit, že větší celková produkce bioplynu je zaznamenána u palice.



Graf 1: Porovnání produkce bioplynu z palice a zbytku rostliny při hustotě výsevu 90 000 rostlin/ha

V grafu č. 2 je porovnáván zbytek rostliny při hustotě výsevu 130 000 rostlin/ha a palice při stejné hustotě výsevu. Palice při hustotě výsevu 130 000 rostlin/ha první 4 dny vykazovaly větší produkci bioplynu. Zbytek rostliny od 4. dne vykazoval větší produkci bioplynu než palice, ale od 10. dne je produkce bioplynu menší než u palice. U palice je produkce bioplynu během 4. - 10. dne nižší než u zbytku rostliny, ale stále narůstá i po 10. dni experimentu, nicméně kolem 15. dne se již příliš nemění a další přírůstky jsou zanedbatelné. U obou variant je tedy možné říci, že hustota výsevu na produkci bioplynu neměla vliv, ale co se týče části rostliny, je jednoznačné, že palice produkovala více bioplynu.



Graf 2: Porovnání produkce bioplynu z palice a zbytku rostliny při hustotě výsevku 130 000 rostlin/ha

### 5.3 Obsah metanu v bioplynu

V tabulce č. 5 jsou prezentovány výsledky týkající se obsahu metanu v bioplynu v průběhu tvorby bioplynu. V tabulce je srovnání pěti měření.

Výsevek vykazoval průkazný vliv pouze 3. den, kdy při hustotě výsevku 130 000 rostlin/ha byl obsah metanu v bioplynu vyšší než při hustotě výsevku 90 000 rostlin/ha. Nejvíce obsah metanu v bioplynu narůstal mezi 3. a 9. dnem, poté už je přírůstek nepatrný.

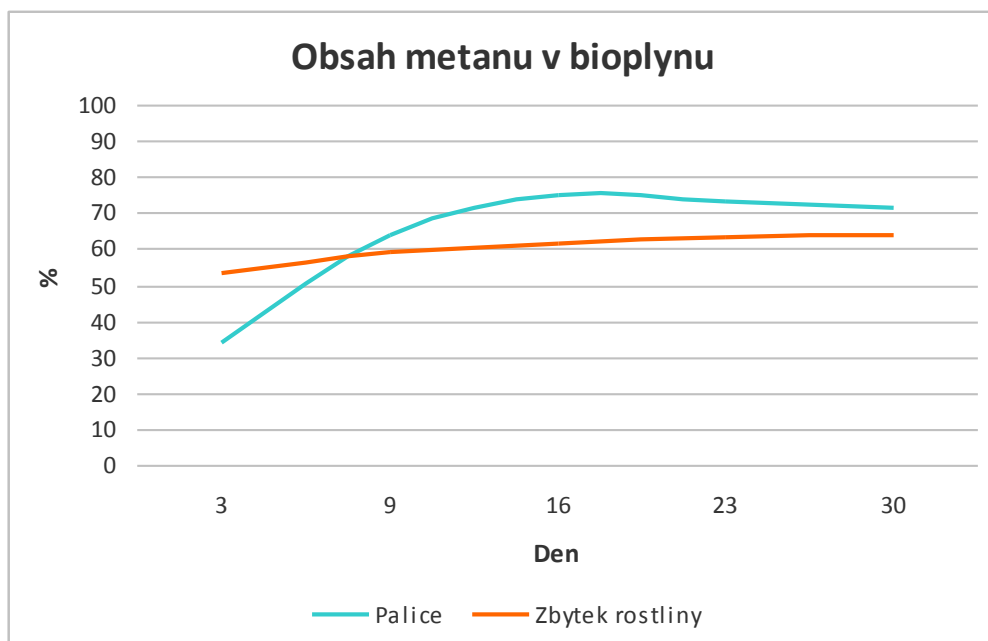
Rozdíly mezi palicí a zbytkem rostliny byly průkazné. Palice jednoznačně vykazovala větší obsah metanu v bioplynu než zbytek rostliny s výjimkou třetího dne testů. Během měření byl pozorován značný přírůstek obsahu metanu v bioplynu z palice, kdy nárůst byl největší mezi 3. a 9. dnem a svého maxima dosáhl den 16. U zbytku rostliny jsou přírůstky od 9. dne velmi nízké. V grafu č. 3 jsou zobrazeny přírůstky metanu v bioplynu pro jednotlivé části rostliny v průběhu trvání batch testů.

Z vyhodnocení interakce výsevek a část rostliny jsou zřejmé průkazné rozdíly mezi palicí při hustotě výsevku 90 000 rostlin/ha a 130 000 rostlin/ha během 3. dne, kdy palice při vyšší hustotě výsevku vykazovala větší obsah metanu v bioplynu. V dalším období již nebyl rozdíl mezi výsevky u palice průkazný. Zbytek rostliny nevykazoval po celou dobu trvání batch

testů statisticky významné rozdíly mezi sledovanými výsevkami. Obsah metanu v bioplynu byl u zbytku rostlin 3. den vyšší než u palice, ale od 9. dne až do konce trvání testů byly hodnoty nižší.

Tabulka 5: Obsah metanu v bioplynu (%) ze silážní kukuřice v závislosti na části rostliny a hustotě výsevku (Červený Újezd, 2015)

| Výsevek<br>(ks/ha) | Část<br>rostliny   | Den               |                   |                   |                   |                    |
|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
|                    |                    | 3                 | 9                 | 16                | 23                | 30                 |
| 90 000             |                    | 42,6 <sup>a</sup> | 61,3              | 68,0              | 67,9              | 68,3               |
| 130 000            |                    | 44,7 <sup>b</sup> | 61,5              | 68,3              | 67,9              | 66,8               |
| <i>P</i>           |                    | 0,002             | 0,777             | 0,658             | 0,943             | 0,265              |
|                    | Palice             | 33,8 <sup>a</sup> | 63,9 <sup>a</sup> | 74,9 <sup>a</sup> | 72,9 <sup>a</sup> | 71,5 <sup>a</sup>  |
|                    | Zbytek<br>rostliny | 53,5 <sup>b</sup> | 58,8 <sup>b</sup> | 61,4 <sup>b</sup> | 63,0 <sup>b</sup> | 63,7 <sup>b</sup>  |
|                    | <i>P</i>           | <0,000            | 0,001             | <0,000            | <0,000            | 0,002              |
| 90 000             | Palice             | 32,1 <sup>a</sup> | 64,2 <sup>a</sup> | 74,2 <sup>a</sup> | 71,8 <sup>a</sup> | 71,6 <sup>a</sup>  |
| 130 000            | Palice             | 35,4 <sup>b</sup> | 63,7 <sup>a</sup> | 75,7 <sup>a</sup> | 73,9 <sup>a</sup> | 71,4 <sup>a</sup>  |
| 90 000             | Zbytek<br>rostliny | 53,1 <sup>c</sup> | 58,4 <sup>b</sup> | 61,8 <sup>b</sup> | 64,0 <sup>b</sup> | 65,0 <sup>ab</sup> |
| 130 000            | Zbytek<br>rostliny | 53,9 <sup>c</sup> | 59,2 <sup>b</sup> | 60,9 <sup>b</sup> | 61,9 <sup>b</sup> | 62,3 <sup>b</sup>  |
| <i>P</i>           |                    | 0,015             | 0,331             | 0,135             | 0,029             | 0,338              |



Graf 3: Porovnání obsahu metanu v bioplynu ze silážní kukuřice – srovnání palice a zbytku rostliny (Červený Újezd, 2015)

## 6. DISKUSE

V prováděném polním pokusu byly zkoumány jednotlivé faktory, které by mohly případně ovlivnit produkci bioplynu z biomasy silážní kukuřice. Sledovanými faktory byly jednotlivé části rostlin a různá hustota výsevu. Během testování byly zjištěny produkční parametry, produkce bioplynu ze silážní kukuřice i obsah metanu v bioplynu. Zjištěné hodnoty byly následně vyhodnoceny a zpracovány za pomoci jednofaktorové a vícefaktorové analýzy rozptylu v programu Statistica 12.

V experimentu byly srovnávány jednotlivé části rostlin. Cílem bylo ověřit, zda palice produkuje více bioplynu než zbytek rostliny, zjistit jeho kvalitu, a také u které části jsou lepší výnosové parametry. Po ukončení experimentu bylo zjištěno, že palice vykazuje lepší výsledky než zbytek rostliny. Je to zapříčiněno tím, že palice obsahuje největší podíl škrobu, který je snadno rozložitelný a při produkci bioplynu zásadní. Palice rostlin kukuřice také sestávají z hemicelulózy a celulózy, s nízkými procenty ligninu a popela, a tak představují materiál s vysokým energetickým potenciálem v případě jejich využití při anaerobní digesti, neboť substráty obsahující lignin jsou pro výrobu bioplynu nevhodné z důvodu, že jejich bakterie produkující bioplyn nedokáží rozložit (Blandino et al., 2016). Zbytek rostliny se skládá přibližně z 70 % celulózy a hemicelulózy a 15 až 20 % ligninu (Glassner et al., 1998). Složení zbytku rostliny se může také lišit v závislosti na způsobu a termínu sklizně a shromážděných frakcích. Horní část kukuřice, palice, je obecně méně lignifikována a více stravitelná než zbytek rostliny. Jako taková je proto žádoucí pro výrobu bioplynu.

U substrátové produkce bylo možné jednoznačně říci, že produkce u palice byla větší než u zbytku rostliny. U palice také dochází k většímu rozkladu organické hmoty, než je tomu u zbytku rostliny. V publikaci Negri et al. (2016) uvádějí, že palice kukuřice vykazují nejvyšší účinnost rozkladu, která může dosahovat až 98 %. Naopak je tomu v našem experimentu u výnosu, který je větší u zbytku rostliny. To je možné připsat nepříznivému průběhu klimatických podmínek v průběhu vegetačního období, a to zejména nedostatku srážek. V roce 2015 činil úhrn srážek za vegetační období 207 mm, což je jen 64 % srážkového normálu. Současně byla oproti normálu (14,2 °C) také vyšší průměrná teplota vzduchu (16 °C). Průběh počasí v roce 2015 se negativně projevil zejména na hmotnostním podílu palice, který ve sledovaném pokusu činil 44 – 45 %, což je o 10 – 20 % méně oproti běžně dosahovaným hodnotám. Šuk et al. (1998) uvádí, že pěstitelským cílem je minimálně 50 % palice z celkové hmoty kukuřice. Během 6. až 9. dne produkce bioplynu ale palice vykazovala



menší produkci bioplynu než zbytek rostliny. To souvisí s rychlostí rozkladů jednoduchých cukrů. Mezi 9. a 15. dnem byl u palice zaznamenán přírůstek bioplynu o více než 30 %. Škrob v palici je snadno rozložitelný, a proto zde dochází k větším přírůstkům bioplynu. Ve zbytku rostliny je více zastoupena celulóza a hemicelulóza, která je hůře rozložitelná, a to má za následek postupné uvolňování bioplynu. Negri et al. (2016) uvádějí, že pro všechny silážní obiloviny je degradace, stejně jako výroba bioplynu, nejrychlejší na počátku anaerobní digesce. Dále tito autoři uvádějí, že u palice je také kvalita bioplynu lepší, jelikož obsahuje více metanu než zbytek rostliny, což je v souladu s naším experimentem.

Nicméně jako nejefektivnější se ukazuje využívání celých rostlin kukuřice, jak uvádějí Bruni et al. (2010), Amon et al. (2004) a Seppälä et al. (2012). Zbytek rostliny tvoří zhruba polovinu výnosu kukuřice. I Amon et al. (2007) uvádějí, že při produkci metanu pouze z palic je dosaženo přibližně o 50 % nižšího výnosu metanu než oproti produkci bioplynu z celé rostliny. Pokud bude chtít být dosaženo maximální efektivity a minimalizace odpadů je možné využít i odpady z kukuřice, které byly zkoumány v práci Eze and Ojike (2012), kde také vykazovaly značný potenciál při produkci bioplynu. Negri et al. (2014) uvádějí, že nejdůležitější částí rostliny kukuřice je palice, která je díky vysokému obsahu škrobu charakterizována vyšší produkcí bioplynu ve srovnání se zbytkem rostliny. Současně ale zdůrazňují, že sklizeň celé rostliny kukuřice je nejproduktivnějším řešením.

Další sledovaný faktor v tomto pokuse byly dvě odlišné hustoty výsevků: standardní (90 000 rostlin/ha) a navýšený výsevek (130 000 rostlin/ha). Cílem bylo zjistit, zda bude u vyšší hustoty výsevku dosaženo i vyššího výnosu biomasy či zda bude mít vyšší hustota výsevku negativní vliv na výnos. Dále také zda má zvýšená hustota výsevku vliv na produkci bioplynu a obsah metanu v bioplynu. Avšak neexistuje žádné jednotné doporučení pro všechny podmínky, protože optimální hustota výsevku se liší v závislosti na téměř všech faktorech životního prostředí, stejně jako na kontrolovaných faktorech jako je půdní úrodnost, výběr hybridu či datum setí (Sangoi, 2000).

Z výsledků je patrné několik závěrů. Hustota výsevku zde neměla výrazný vliv na produkční parametry. Abuzar et al. (2011) byly zaznamenali největší výnosy u nižších hustot výsevku, tj. 60 000 rostlin/ha. Podle Šuka et al. (1998) v hustém porostu dochází k horšímu zahřívání povrchu půdy a také listy ztrácejí fotosyntetickou aktivitu. Projevuje se nedostatek živin a dochází ke snížení výnosu. Z výsledků práce Andrade et al. (1991) vyplývá, že při zvýšených hustotách výsevku byl počet zrn kukuřice na jednotku plochy výrazně snížen, přestože množství slunečního záření zachycené plodinou nebylo ovlivněno. Kukuřice by měla zachytit nejméně 80 % slunečního světla. Sluneční světlo je často dobrým ukazatelem, zda je

hustota výsevu adekvátní. Přehušnění porostu má také za následek pozdější nástup sklizňové zralosti, zpomalení vývoje a v neposlední řadě také zbytečně navýšené náklady na osivo. Hustota výsevu zásadním způsobem ovlivňuje budoucí strukturu porostu, ale pokud dojde k postupnému navýšení, je zde i možnost vyššího výnosu. Jestliže ale dosáhne určitého hraničního bodu, začne se projevovat negativní konkurence zmíněná výše. Sangoi (2000) uvádí jako optimální navýšení hustoty výsevu o 5 000 až 7 500 rostlin/ha, aby se dosáhlo maximalizace výtěžku. Naopak Novacek (2011) uvádí, že hustota výsevu má na výnos zanedbatelný vliv, což koresponduje s výsledky, který byly dosaženy v našich pokusech. Z uvedeného je zřejmé, že efekt hustoty výsevu je výrazně vázán na stanoviště a průběh počasí v konkrétním roce.

U produkce bioplynu vykazuje ve sledovaných pokusech lepší výsledky hustota výsevu 90 000 rostlin/ha. Vliv hustoty výsevu byl také zaznamenán u rychlosti produkce bioplynu, ale hustota výsevu neměla vliv na kvalitu bioplynu, jelikož obsah metanu v bioplynu nevykazoval statisticky významné rozdíly. Zvýšená hustota výsevu někdy zhoršuje kvalitu v důsledku snížení podílu palic a někdy i horšího ozrnění a díky tomu palice může obsahovat nižší množství škrobu. To, že zvýšená hustota výsevu má vliv na některé morfologické znaky publikuje i Turgut et al. (2005). S tím souhlasí i Berzsényi and Dang (2007), kteří uvádějí, že hustota výsevu má vliv na produkci sušiny, a také měla vliv na růstové parametry celé rostliny a její jednotlivé části. Navýšení hustoty výsevu snížilo růst především palic a došlo i ke snížení výnosu zrna. S rostoucí hustotou výsevu ale významně vzrostl index listové plochy.

Dalším zkoumaným faktorem byla interakce hustoty výsevu a části rostliny. Z experimentu bylo zjištěno, že interakce různých hustot výsevků u různých částí rostlin nevykazovala významné rozdíly u produkčních parametrů. U palice ani u jednoho z výsevků nebyly pozorovány významnější rozdíly u produkce bioplynu. Největší nárůst vyprodukovaného bioplynu je u obou hustot výsevu u zbytku rostliny mezi 3. až 6. dnem, kdy vzrostl téměř o 30 % a poté již další přírůstky nebyly významné. U palic při standardní i zvýšené hustotě výsevu je to pak mezi 9. a 15. dnem, kdy je nárůst zhruba také o 30 %. Tyto interakce neměly významný vliv ani na kvalitu bioplynu, kdy pouze 3. den měření vykazovala palice z varianty s vyšší hustotou výsevu vyšší produkci metanu. Současně během produkce bioplynu vykazoval zbytek rostliny nižší obsah metanu v porovnání s palicí.

Interakce hustoty výsevu a části rostlin měla ve sledovaných pokusech zanedbatelný vliv na většinu sledovaných charakteristik. Je však nutné brát ohled i na další faktory, které nelze ovlivnit, z nichž je nejvýznamnější úhrn srážek a teplota v průběhu vegetace.

## 7. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zpracována s cílem popsat substrátovou produkci bioplynu ze silážní kukuřice a v praktické části měla za cíl zhodnotit vybraná pěstitelská opatření ve vztahu k produkci bioplynu. Byly testovány dva faktory: odlišná hustota výsevu a produkce bioplynu z jednotlivých částí rostlin kukuřice.

Po zhodnocení získaných výsledků sledovaných ukazatelů je možné konstatovat, že:

Statisticky významný **vliv části rostliny** byl zaznamenán na:

- Substrátovou produkci bioplynu (palice: 716 ml/g, zbytek rostliny: 586 mg/l)
- Výnos (palice: 5,8 t/ha, zbytek rostliny: 7,3 t/ha)
- Rozklad OH (palice: 81,8 %, zbytek rostliny: 73,9 %)
- Obsah metanu v bioplynu (palice 3. den: 33,8 % CH<sub>4</sub> a 30 den: 71,5 % CH<sub>4</sub>; zbytek rostliny 3. den: 53,5 % CH<sub>4</sub>, a 30. den: 63,7 % CH<sub>4</sub>)

Dále byl zaznamenán statisticky významný **vliv hustoty výsevu** na:

- Relativní kumulativní produkci bioplynu (vyšší hodnoty u výsevu 90 000 rostlin/ha ve srovnání s výsevem 130 000 rostlin/ha)

Ve vztahu k testovaným hypotézám lze konstatovat, že část rostliny má vliv na substrátovou produkci bioplynu i na kvalitu bioplynu. Naopak rozdílná hustota výsevu neměla průkazný vliv na produkci bioplynu.

Z vyhodnocení dosažených výsledků je patrný vliv ročníku, a proto by bylo vhodné doporučit sledování ve více letech a na více stanovištích, aby bylo možné objektivně zhodnotit sledované faktory.

## 8. POUŽITÁ LITERATURA

- Abassi, T., Tauseef, S., M., Abassi, S., A. 2011. *Biomass Energy*. Springer Science and Business Media. p. 169. ISBN 1461410401.
- Abuzar, M., R., Sadozai, G., U., Baloch, M., S., Baloch, A., A., Shah, I., H., Javaid, T., Hussain, N. 2011. Effect of plant population densities on yield of maize. *The Journal of Animal and Plant Science*. 21 (4). 692-695.
- Amon, T., Amon, B., Kryvoruchko, V., Zollitsch, W., Mayer, K., Gruber, L. 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 118 (1-4). 173-182.
- Amon, T., Kryvoruchko, V., Amon, B., Zollitsch, V., Pötsch, E. 2004. Biogas production from maize and clover grass estimated with the methane energy value system. *Konference Engineering the Future*. Leuven. Belgium. Book of Abstracts. 230-231.
- Andrade, F., H., Uhart, S., A., Frugone, M., I. 1991. Intercepted Radiation at Flowering and Kornel Numer in Maize: Shade versus Plant Density effects. 33 (3). *Crop Science*. 482-485.
- Aremu, M., O., Agarry, S., E. 2013. Enhanced biogas production from poultry droppings using corn-cob and waste papers as co-substrate. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 5 (2). 247 – 253.
- Arodudu, O., T., Helming, K., Voinov, A., Wiggering. 2017. Integrating agronomic factors into energy efficiency assessment of agro-bioenergy production – A case study of ethanol and biogas production from maize feedstock. *Applied Energy*. 198. 426-439.
- Arshad, M. 2017. *Perspectives on Water Useful for Biofuels Production: Aquatic Contamination and Climate Change*. Springer. p. 121. ISBN 3319664085.

- Balkcom, K., S., Satterwhite, J., L., Arriaga, F., J., Price, A., J., Santen, E. V. 2011. Conventional and glyphosate-resistant maize yields across plant densities in single- and twin-row configuration. *Field Crops Research*. 120 (3). 330-337.
- Berzsenyi, Z., Dang, Q., L. 2007. Study of the effect of plant density on the growth of maize (*Zea mays* L.) hybrids using the richards function. *Acta Agronomica Hungarica*. 55 (4). 417-436.
- Bíro, D., Gálik, B., Juráček, M., Šimko, M., Michálková, J., Gyöngyová, E., Taška, M. 2008. Fermentation process characteristics of different maize silage hybrids. *Journal Central European Agriculture*. 9. 463-468.
- Blandino, M., Fabbri, C., Soldano, M., Ferrero, C., Reyneri, A. 2016. The use of cobs, a by-product of maize grain, for energy production in anaerobi digestion. *Italian Journal of Agronomy*. 11 (3). 195-198.
- Bruni, E., Jensen, A., P., Pedersen, E., S., Angelidaki, I. 2010. Anaerobi digestion of maize focusing on variety, harvest time and pretreatment. *Applied Energy*. 87 (7). 2212-2217.
- Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., Adani, F. 2016. Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total biomethane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*. 34 (8). 1289-1304.
- Deublein, D., Steinhauser, A. 2011. *Biomass from Waste and Renewable Resources: An Introduction*. John Wiley and Sons. p. 578. ISBN 3527643710.
- Eze, J., I., Ojike, O. 2012. Anaerobi production of biogas from maize wastes. *International Journal of the Physical Science*. 76. 982 – 987.
- Fuksa, P., Hakl, J., Kocourková, D. 2006. Produkční charakteristiky různě raných hybridů kukuřice. *Úroda*, 3: 24-26.
- Glassner, D., A. Hettenhaus, J., R., Schechinger, T., M. 1998. Corn stover collection stover. *Bioenergy '98: Expanding BioEnergy Partnerships*. 1100-1110.

Halford, N., G., Karp, A. 2011. Energy Crops. Royal Society of Chemistry. p. 426. ISBN 1849730326.

Hermann, A., Rath, J. 2012. Biogas Production from Maize: Current State, Challenges, and Prospects. 1. Methane Yield Potential. Bioenergy Research. 5 (4). 1027-1042.

Hromádka, J. 2012. Speciální spalovací motory a alternativní pohony. Grada Publishing a.s. p. 158. ISBN 8024744554.

Hruška, J. 1962. Monografie o kukuřici. SZN v Praze.

Hutňan, M. 2016. Maize Silage as Substrate for Biogas Production. Intech. 9. 173-196.

Hutňan, M., Špalková, V., Bodík, I., Kolesárová, N., Lazor, M. 2010. Biogas Production from Maize Grains and Maize Silage. Polish Journal of Environmental Studies. 19. 323-329.

Jacobs, A., Bauer-Siebrecht, W., Christen, O., Götze, P., Koch, J. H., Rücknagel, J., Märlander, B. 2016. Silage maize and sugar beet for biogas production in crop rotations and continuous cultivation – energy efficiency and land demand. Field Crops Research. 196. 75-84.

Jonáš, J., Petříková, V. 1988. Využití exkrementů hospodářských zvířat. Státní zemědělské nakladatelství Praha. p. 184.

Menardo, S., Airoidi, G., Cacciatore, V., Balsari, P. 2015. Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains. Biosystems Engineering. 129. 352-359.

Míchal, P., Švehla, P., Plachý, V., Tlustoš, P. 2016. Anaerobic digestion of grass: the effect of temperature applied during the storage of substrate on the methane production. Environmental technology. 1-10.

Mital, K., M. 1997. Biogas Systems: Policie, Progress and Prospects. Taylor and Francis. p. 278. ISBN 8122411045.

Murtinger, K., Beranovský, J. 2011. Energie z biomasy. Computer Press EkoWATT o.s. p. 106. ISBN 9788025129166.

Negri, M., Bacenetti, J., Fiala, M., Bocchi, S. 2016. Evaluation of anaerobic degradation, biogas and digestate production of cereal silages usány nylon-bags. Bioresource Technology. 209. 40-49.

Negri, M., Bacenetti, J., Manfredini, A., Lovarelli, D., Fiala, M., Maggiore, T., M., Bocchi, S. 2014. Evaluation of methane production from maize silage by harvest of different plant portions. Biomass and Energy. 67. 339-346.

Nordic Council of Ministers. 2008. Manure and Energy Crops for Biogas Production: Status and Barriers. Nordic Council of Ministers. p. 51. ISBN 9289316969.

Nová, D. 1982. Bioplyn - zdroje a možnosti praktického využití. Ústředí vědeckých, technických a ekonomických informací. p. 72.

Novacek, M., J. 2011. Twin-row Production and Optimal Plant Population for Modern Maize Hybrids. Doctoral Dissertation. University of Nebraska-Lincoln.

Novák, J., Skalický, M. 2008. Botanika: cytologie, histologie, organologie a systematika. Powerprint Praha. 294-301.

Oslaj, M., Mursec, B., Vindis, P. 2010. Biogas production from maize hybrids. Biomass and Bioenergy. 34 (11). 1538-1545.

Petříková, V., Weger, J. 2015. Pěstování rostlin pro energetické a technické využití: biomasa, bioplyn, krmiva. Vydavatelství Profi Press s.r.o. p. 147. ISBN 9788086726694.

Procházka, J., Dohányos, M., Kajan, M., Diviš, J. 2013. Produkce bioplynu z kukuřice. Doktorská práce. Vysoká škola chemicko-technologická Praha.

Pullen, T. 2015. *Anaerobic Digestion – Making Biogas – Making Energy: The Earthscan Expert Guide*. Routledge. Oxon. p. 200. ISBN 978-0-415-71348-1.

Sangoi, L. 2000. Understanding plant density effects on maize growth and development: and important issue to maximize grain yield. *Ciencia Rural, Santa Maria*. 31 (1). 159-168.

Seppälä, M., Pyykkönen, V., Laine, A., Rintala, J. 2012. Methane production from maize in Finland – Screenin for different maize varieties and plant parts. *Biomass and Bioenergy*. 46. 282-290.

Schittenhelm, S. 2008. Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. *European Journal of Agronomy*. 29. 72-79.

Schulz, H., Eder, B. 2004. *Bioplyn v praxi Teorie - projektování - stavba zařízení - příklady*. HEL. p. 168. ISBN 8086167216.

Straka, F., Dohányos, M., Zábranská, J., Jeníček, P., Dědek, J., Malijevský, A., Novák, J., Oldřich, J., Kunčarová, M. 2006. *Bioplyn. GAS*. Praha. 706 s. ISBN 80-73228-090-6.

Sun, Ch., Cao, W., Banks, J. CH., Heaven, S., Liu, R. 2016. Biogas production from undiluted chicken manure and maize silage: A study of ammonia inhibition in high solids anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 218. 1215-1223.

Šuk, J., Balík, J., Jakobe, P., Jambor, V., Kohout, V., Loučka, R., Táborský, V., Vrzal, J. 1998. *Kukuřice*. VP AGRO spol. s.r.o. p. 131. ISBN 8086153991.

Švec, J., Kára, J., Váňa, J., Pastorek, J., Machálek, E. 2010. *Využití obnovitelných zdrojů, energie v zemědělství, zemědělské bioplynové stanice. Vodní zdroje EKOMONITOR spol. s.r.o., Chrudim 2010*. p 72. ISBN 9788086832494.

Turgut, I., Duman, A., Bilgili, U., Acikgoz, E. 2005. Alternate row spacing and plant density effects on forage and dry matter yield of corn hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*. 191 (2). 146-151.



Tyšer, L. 2010. Kategorizace zemědělského území České republiky. Dostupné z <http://docplayer.cz/170034-Kategorizace-zemedelskeho-uzemi-ceske-republiky-ing-ludek-tyser-phd.html>

Vervaeren, H., Hostyn, K., Ghekiere, G., Willems, B. 2010. Biological ensilage additives as pretreatment for maize to increase the biogas production. *Renewable Energy*. 35. 2089-2093.

Wellinger, A., Murphy, J., D., Barter, D. 2013. *The Biomas Handbook: Science, Production and Applications*. Elsevier. p. 512. ISBN 0857097415.

Wiyo, K., A., Kasomekera, Z., M., Feyen, J. 1999. Variability in ridge and furrow size and shape and maize population density on small subsistence farms in Malawi. *Soil and Tillage Research*. 51. 113-119.

Wu, X., Yao, W., Zhu, J., Miller, C. 2010. Biogas and CH<sub>4</sub> productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. *Bioresource Technology*. 101 (11). 4042-4047.

Zhang, W., Z., Z., Luo, Y., Sun, S., Qiao, W., Xiao, M. 2011. Effect of biological pretreatments in enhancing corn straw biogas production. *Bioresource Technology*. 102. 11177-11182.

**Internetové a jiné zdroje:**

<http://www.oppik.cz/dotacni-programy/eko-energie-obnovitelne-zdroje>

[http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bioplynove\\_stanice&site=odpady](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bioplynove_stanice&site=odpady)