

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroekologie a rostlinné produkce



**Vliv kvality biomasy silážní kukuřice na produkci
bioplynu**

Bakalářská práce

**Autor práce: Petra Konopáčová
Obor studia: Pěstování rostlin**

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

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**Vliv kvality biomasy silážní kukuřice na produkci bioplynu**" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 3. 5. 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala panu Ing. Pavlu Fuksovi, Ph.D. za odborné vedení, za všestrannou pomoc a čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky. Dále mé poděkování patří mému příteli, který mi byl velkou oporou a také své rodině za trpělivost a podporu, které se mi při psaní této práce dostávalo.

Vliv kvality biomasy silážní kukuřice na produkci bioplynu

Souhrn

Bakalářská práce byla zaměřena na vypracování literární rešerše zaměřené na poznatky o uplatnění silážní kukuřice pro produkci bioplynu. V jednotlivých kapitolách byla zpracována problematika výběru vhodného hybridu, termínu sklizně, podílu částí rostliny a dalších faktorů mající vztah ke kvalitě biomasy a produkci bioplynu.

Bioplyn se v České republice od roku 2014 drží v první pětici nejvýznamnějších zdrojů obnovitelné energie. Kvalitní biomasa je prekurzorem k získání velkého množství bioplynu, v potřebné kvalitě, z tuny na hektar vyprodukované biomasy.

Výběr správného hybridu je zásadním faktorem ovlivňujícím kvalitu a objem vyprodukovaného bioplynu, nicméně je důležité pohlížet na specifické geografické a klimatické podmínky daného prostředí, kde je kukuřice pěstována. Velmi důležité je zvolení správné agrotechniky, vhodného termínu setí i termínu sklizně. Bylo zjištěno, že hustota výsevu rostlin nemá významný vliv na množství vyprodukovaného bioplynu.

Složení vstupního substrátu do bioplynové stanice ovlivňuje následné množství a kvalitu vyprodukovaného bioplynu. Pozitivní korelace byla zjištěna mezi produkcí bioplynu a obsahem sušiny, škrobu, hemicelulózy a organických látek rozpustných v enzymech. Méně těsný vztah byl pozorován u lipidů, které však mají dvojnásobný metanový potenciál než sacharidy. Negativní korelace se projevila u rozpustných sacharidů a ligninu, kdy produkce metanu na jednotku biomasy klesala se zvyšujícím se obsahem ligninu a vláknitých frakcí. Proces silážování je významný z pohledu konzervace sklizené biomasy a způsobuje zvýšení výtěžnosti bioplynu až o 25 % oproti použití čerstvé hmoty.

Navzdory rozšířenému používání kukuřice na produkci bioplynu, není doposud vytvořen ucelený systém hodnocení kvality kukuřičné biomasy pro bioplynové účely.

Klíčová slova: hybridy kukuřice; kvalita biomasy; škrob; sacharidy; specifický výtěžek metanu

Effect of biomass quality of silage maize on biogas production

Summary

The bachelor's thesis was focused on the development of a literature search focused on knowledge about the use of silage corn for biogas production. In individual chapters, the issue of selecting a suitable hybrid, harvest date, share of plant parts and other factors related to biomass quality and biogas production was elaborated.

Since 2014, biogas has been pointed in the Czech Republic in the top five most significant sources of renewable energy. Quality biomass is a precursor to obtaining large quantities of biogas, at the adequate quality, from a ton per hectare of biomass produced.

Choosing the right hybrid is a crucial factor influencing the quality and volume of the biogas produced, however, it is important to look at the specific geographical and climatic conditions of the environment where maize is grown. In addition, is very important to choose the right agricultural technology, a suitable sowing date and harvest date. It was found that the density of plant sowing does not have a significant effect on the amount of biogas produced.

The composition of the input substrate to the biogas plant affects the subsequent quantity and quality of the biogas produced. The positive correlation was found between the production of biogas and the content of dry matter, starch, hemicellulose and organic substances soluble in enzymes. The less close relationship was observed with lipids, having twice the methane potential in comparison to carbohydrates. The negative correlation was observed for soluble carbohydrates and lignin, where methane production per unit of biomass decreased with increasing content of lignin and fibrous fractions. The ensiling process is important for conservation of harvested biomass and causes an increase in biogas yield by up to 25 % compared to the use of fresh material.

Despite the widespread use of maize for biogas production, a comprehensive quality assessment system for maize biomass for biogas has not yet been established.

Keywords: maize hybrids; biomass quality; starch; carbohydrates; specific methane yield

Obsah

1 Úvod.....	7
2 Cíl práce	8
3 Literární rešerše	9
3.1 Bioplynové stanice.....	9
3.1.1 Typy bioplynových stanic.....	9
3.1.2 Technologie výroby bioplynu	11
3.1.3 Batch testy.....	13
3.1.4 Složení substrátu	13
3.1.4.1 Polysacharidy	14
3.1.4.2 Lignin	14
3.1.4.3 Lipidy	14
3.1.4.4 Proteiny	15
3.2 Charakteristika silážní kukuřice	15
3.2.1 Hybridy kukuřice	15
3.2.2 Hlavní zásady při zakládání porostů.....	16
3.2.2.1 Vliv zpracování půdy	16
3.2.2.2 Vliv hnojení a půdní výživa	17
3.2.2.3 Termín setí	18
3.2.2.4 Výsevek a způsob pěstování	18
3.2.2.5 Škůdci a choroby kukuřice.....	19
3.2.2.6 Zaplevelení porostů kukuřice	20
3.3 Produkce bioplynu z kukuřice	22
3.3.1 Výběr hybridu k produkci bioplynu.....	22
3.3.2 Vliv hybridu na produkci bioplynu.....	23
3.3.3 Hustota výsevu.....	25
3.3.4 Termín sklizně	26
3.3.5 Podíl jednotlivých částí rostliny	27
3.3.6 Produkce bioplynu z jednotlivých částí rostlin.....	28
3.3.7 Řezanka kukuřice.....	29
3.3.8 Silážování.....	29
4 Závěr.....	31
5 Literatura.....	33

1 Úvod

Množství a kvalita bioplynu, který vzniká při anaerobní digesci, velmi úzce souvisí s kvalitou biomasy vstupující do tohoto procesu. Silážní kukuřice je v současné době nejvyužívanější plodinou pro produkci bioplynu díky jejímu vysokému výnosu, vysokému obsahu energie a dobré rozložitelnosti biomasy. Na rozdíl od krmného využití silážní kukuřice však není dosud vypracován ucelený systém hodnocení kvality kukuřičné biomasy pro bioplynové účely.

Produkce bioplynu v EU vzrostla v roce 2015 na 18 miliard m³, což představuje polovinu celosvětové produkce bioplynu. Přibližně 50 % celkové spotřeby bioplynu v Evropě bylo určeno na výrobu tepla. Dále je Evropa předním světovým výrobcem biometanu s využitím jako paliva pro automobily. Bioplyn lze využít i na výrobu elektřiny z různých druhů substrátů, kde největší podíl tvoří rostlinná biomasa (Scarlat et al. 2018). Například v Německu bylo v roce 2011 téměř 7 % orné půdy použito na výrobu substrátu pro bioplynové stanice; z toho 80 % byla kukuřice na bioplyn (Herrmann 2013). Bioplyn je charakteristický vyšší účinností využití energie a zdrojů než například bionafta nebo bioetanol (Börjesson & Mattiasson 2008).

Mezi další výhody výroby bioplynu, pomocí anaerobní digesce, patří: snížení emisí skleníkových plynů, inaktivace patogenů či recyklace živin. Bioplyn je zdrojem obnovitelné energie a snižuje závislost na fosilních palivech. Vznik nových bioplynových stanic může významně přispět k rozvoji venkovských oblastí a podpořit vytváření nových dodavatelských řetězců pro suroviny biomasy. Anaerobní fermentace poskytuje energii (elektřinu, teplo nebo paliva) pro použití na místní farmě nebo pro externí uživatele dodávané prostřednictvím elektřiny nebo dálkového vytápění (Herrmann 2013; Herrmann et al. 2016; Scarlat et al. 2018).

Kintl (2019) uvádí, že kukuřice je nejvíce pěstovanou rostlinou ve více státech než plodiny jiné. Největšími pěstiteli kukuřice jsou Spojené státy americké, Brazílie, Čína a země Evropské unie.

Kvalitní vypěstovaná biomasa je prekurzorem k získání vyššího množství kvalitního bioplynu. Kvalita a množství vyprodukované biomasy je ovlivněna mnoha faktory. Některé faktory nelze ovlivnit, jako například průběh počasí a vliv ročníku. Na druhou stranu některé faktory lze ovlivnit rozhodnutími a volbou vhodného hybridu, zpracováním půdy, termínem sklizně a dalšími důležitými opatřeními. Z uvedeného pohledu se jeví jako zásadní, věnovat problematice určitou pozornost a docílit tak vypěstování kvalitní biomasy.

2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bylo vypracovat literární rešerši zaměřenou na aktuální poznatky o uplatnění silážní kukuřice pro produkci bioplynu. Literární rešerše byla zaměřena na faktory ovlivňující množství a kvalitu vyprodukovaného bioplynu.

V úvodu bakalářské práce byla shrnuta technologie výroby bioplynu. Dále byl sepsán přehled o charakteristice silážní kukuřice a představeny hlavní zásady při zakládání porostů kukuřice. V jednotlivých kapitolách byla dále zpracována problematika výběru vhodného hybridu, termínu sklizně, podílu částí rostliny a dalších faktorů, majících vztah ke kvalitě biomasy a produkci bioplynu.

Podrobněji byly zpracovány kapitoly zaměřené na vztah mezi složením biomasy, množstvím a kvalitou bioplynu, jenž vzniká v procesu anaerobní digesce. Kvalitní biomasa je prekurzorem k získání většího množství kvalitního bioplynu z tuny na hektar vyprodukované biomasy.

3 Literární rešerše

3.1 Bioplynové stanice

Níže uvedená kapitola se zabývá popisem bioplynových stanic a technologií výroby bioplynu. Dle informací uvedených na internetových stránkách České bioplynové asociace (2021a, b), je na území České republiky, k datu 31. 12. 2019, umístěno a zprovozněno 574 bioplynových stanic.

Bioplyn se považuje za vysoce kvalitní zdroj obnovitelné energie. Podíl bioplynových stanic činí 22,9 % z celkových obnovitelných zdrojů energie a stanice mají celkový výkon 367 MW. V roce 2019 se bioplyn podílel 25 % na produkci elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE). V roce 2010 bioplyn zastupoval pouze 10% podíl na výrobě elektrické energie z OZE, lze sledovat značný nárůst využití bioplynu jako obnovitelné energie.

V České republice se nejvíce bioplynových stanic se nachází v okolí Humpolce, Vysočiny (17 stanic), Třebíče, Jihomoravského kraje (15 stanic), Tábora a Jihočeského kraje (8 stanic). Největší bioplynovou stanicí je Cukrovar Dobruška ve Středočeském kraji, nicméně v případě cukrovaru se jedná o průmyslovou bioplynovou stanici využívající zbytky z vlastního cukrovarnického průmyslu. Mezi tři největší zemědělské bioplynové stanice zpracovávající kukuřici na bioplyn patří Bioplynová stanice Králupy (2 795 kW), Zemědělská bioplynová stanice Žatec (2 378 kW) a BPS Bratčice II (2 160 kW). První zprovozněnou bioplynovou stanicí na českém území byla bioplynová stanice zpracovávající odpad – prasečí kejdu v roce 1974 v Třeboni (Kajan & Lhotký 2006; ERÚ 2020).

Dle dat z ERÚ (2020) byl bioplyn v první pětici nejvýznamnějších zdrojů elektrické energie České republiky za období od roku 2014 do roku 2019. Bioplyn se za rok 2019 podílel necelými třemi procenty na celkové produkci. Největším zdrojem elektrické energie je dlouhodobě hnědé uhlí (40 %) a jaderná energie (34 %).

Jako substrát do bioplynové stanice lze využít velkou řadu materiálů a zdrojů biomasy. Hlavní součástí složení substrátu však musí být sacharidy, bílkoviny, tuky, celulóza a hemicelulóza. Nejsou však vhodné organické materiály obsahující mnoho ligninu, například dřevo. Na produkci bioplynu lze cíleně pěstovat energetické plodiny, tj. kukuřice, žito nebo čirok. Také lze využít odpadní biomasu z rostlinné a živočišné výroby. Z živočišné výroby je nejpoužívanější hovězí a prasečí kejda, která se díky relativně nízkému obsahu sušiny dobře kombinuje s ostatními substráty. Zemědělsky obhospodařovatelné plochy jsou omezené a cílené pěstování rostlin na zpracování pro bioplynové stanice má nevýhodu v konkurenci s produkcí potravin a krmiv (Kratochvílová 2009; Demirel 2013; Herrmann 2013; Fuksa 2018).

3.1.1 Typy bioplynových stanic

V podmínkách České republiky se používá mnoho typů bioplynových stanic, které se od sebe vzájemně liší použitým vstupním substrátem pro produkci bioplynu. Rozdělují se podle převažujícího zpracovávaného substrátu (Kajan & Lhotký 2006). Česká bioplynová asociace (2021b) uvádí níže uvedené typy stanic:

- Komunální bioplynové stanice – využívají k produkci bioplynu biologicky rozložitelné odpady, odpady z jatek a odpady z kuchyní (Kajan & Lhotký 2006).
- Průmyslové bioplynové stanice – se používají k výrobě elektrické energie ze zbytků průmyslové výroby, např. zbytky z výroby cukru, piva, droždí, pektinu a farmaceutik. Většinou se nachází v blízkosti průmyslového objektu. Nevýhodou těchto stanic je sezónnost výroby bioplynu (Kajan & Lhotký 2006). Např. česká největší bioplynová stanice Cukrovar Dobruška zpracovává na výrobu bioplynu odpady vzniklé při zpracování cukrové řepy (ČBA 2021b).
- Zemědělské bioplynové stanice – jedná se o stanice, zpracovávající jak cíleně vyprodukovanou biomasu, zbytky rostlin tak také exkrementy hospodářských zvířat. Tj. zpracování kukuřice, čiroku, cukrovky, žita a dalších (Kajan & Lhotký 2006).
- Skládkový bioplyn – bioplynové stanice využívající k výrobě energie unikající metan ze skládky. Bioplyn je získáván z odpadu za pomoci sond (Kajan & Lhotký 2006). Z celkového objemu vyprodukované elektrické energie z bioplynu, tvoří skládkový bioplyn minoritní podíl (ERÚ 2020).
- Čističky odpadní vod (ČOV) – zužitkovávají kaly sbírané z odpadních vod a využívají je k produkci elektrické energie. První čistírny odpadních vod s anaerobní stabilizací kalu byly v České republice zprovozněny v první polovině minulého století. V dnešní době je téměř každá ČOV vybavena touto technologií (Kajan & Lhotký 2006). Největší ČOV zpracovávající kaly na produkci bioplynu je Ústřední čistírna odpadních vod Praha 6 s produkcí 5 402 kW, celkově se jedná o druhou největší bioplynovou stanici v České republice (ČBA 2021b). Z pohledu celkové vyprodukované elektrické energie z bioplynu, tvoří ČOV minoritní podíl na výrobě (ERÚ 2020).

Tabulka 1 uvádí přehled nejpoužívanějších substrátů z pohledu metanového výtěžku. Scarlat et al. (2018) a Seppälä et al. (2013) uvádějí, že nejvýhodnějším zdrojem se jeví použití komunálního odpadu, poté slámy nebo odpadu ze zeleniny. Je patrné, že komunální odpad má největší metanový potenciál ze všech uvedených substrátů, což je především způsobeno značnou různorodostí substrátu. Využití kukuřičné siláže je čtvrtým nejvýhodnějším substrátem z pohledu výtěžku metanu z kilogramu organické hmoty. Možné je i substráty vzájemně kombinovat, například kukuřici a kravský hnůj.

Tabulka 1 Přehled metanových výtěžků z různých substrátů pro výrobu bioplynu

	Sušina [%]	Organická hmota [% ze sušiny]	Metanový výtěžek [l CH ₄ /kg OH]	Metanový výtěžek [l CH ₄ /kg čerstvé hmoty]
Komunální odpad	35%	90-95 %	550-650	173-216
Sláma	85-90 %	80-90 %	200-250	136-202
Bioopad ze zeleniny	85-90 %	80-90 %	200-251	136-203
Kukuřičná siláž	30-40 %	90-95 %	250-450	68-170
Jeteloviny	20-25 %	90-95 %	300-500	57-118
Traviny	20-30 %	90-95 %	300-450	55-128
Brambory	20-30 %	90-95 %	280-400	54-128
Cukrová řepa	15-20 %	90-95 %	230-380	31-72
Organický odpad	10-40 %	75-90 %	350-450	26-180
Drůbeží hnůj	10-30 %	70-80 %	300-350	21-84
Kaly z odpadních vod	5-10 %	75%	300-400	11-30
Hovězí kejda	6-12 %	70-85 %	200-250	8-25
Prasečí kejda	3-8 %	70-80 %	250-350	6-22

Zdroj: vlastní zpracování na základě Scarlat et al. (2018)

3.1.2 Technologie výroby bioplynu

Bioplynové technologie lze rozdělit na několik typů, podle typu plnění se rozlišuje dávkový nebo průtokový postup. Následně se rozdělují podle stupňů procesu na proces jednostupňový nebo vícestupňový a dále podle vstupního substrátu, jde-li o substrát pevný nebo kapalný (Schulz & Eder 2004). V bioplynové stanici vzniká bioplyn procesem anaerobní digesce neboli anaerobní fermentace, probíhající za nepřístupu vzduchu a působením řady bakterií. Mikroorganismy rozkládají vstupní organickou hmotu za vzniku bioplynu a fermentovaných nerozložitelných zbytků organické hmoty neboli digestátu (Schulz & Eder 2004; Börjesson & Mattiasson 2008; Fuksa 2018).

Proces se rozděluje do čtyř fází:

- V první fázi hydrolytické bakterie rozkládají složitější makromolekulární organické látky (polysacharidy, lipidy, proteiny) na látky jednodušší, jako jsou sacharidy, aminokyseliny a voda (Schulz & Eder 2004).
- Ve druhé fázi, zvané acidogeneze, se v navazujícím procesu vzniklé produkty z první fáze rozkládají pomocí acidofilních bakterií na jednoduché organické látky, hlavně na nižší mastné kyseliny, alkoholy, oxid uhličitý a vodík (Straka et al. 2006).
- Následně proces postupuje do acetogeneze. Ve třetí fázi dochází pomocí acetogenních bakterií k oxidaci produktů z předchozí fáze, při které se tvoří kyselina octová, vodík a oxid uhličitý (Straka et al. 2006).
- V poslední, čtvrté fázi, v procesu zvaném metanogeneze, vzniká metan. Metanogenní bakterie zpracovávají kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý za vzniku metanu a zbytkového oxidu uhličitého (Demirel 2013).

Pro správné fungování procesu je nezbytné zajistit bakteriím anaerobní podmínky a správnou teplotu. S rostoucí teplotou vzrůstá rychlost všech procesů metanogeneze. Volba teploty ve fermentoru je závislá na režimu práce, ve kterém se fermentor momentálně nachází. Většina digestoří pracuje v úzkém rozpětí mezofilní oblasti teplot, tj. 35–40 °C, protože metanogenní bakterie jsou citlivé na výkyvy teplot (Dohányos 1996; House 2007).

Jelínek (2001), Brhel (2010) a Fuksa (2018) se shodují, že bioplyn se z největší části skládá z metanu, který je zastoupen ze 45 až 75 % a druhou nejvíce zastoupenou látkou je oxid uhličitý, mající podíl mezi 25 % a 48 %. Ostatní složky, tj. dusík, vodík, vodní páry a stopy sulfanu, tvoří minoritní podíl v celkové substanci. Kvalita bioplynu je určena poměrem metanu a oxidu uhličitého, kdy platí, že čím vyšší je podíl metanu, tím je bioplyn kvalitnější.

Kvalita a množství metanu z bioplynu je závislá na obsahu živin v substrátu (Schulz & Eder 2004). Pro efektivní produkci metanu je důležité fermentující bakterie optimálně zásobit přísunem substrátu a živin (Herrmann & Rath 2012). Nejpoužívanějším způsobem plnění fermentoru je semikontinuální systém plnění, tzn. zásobování fermentoru substrátem několikrát denně (Fuksa 2018). Semikontinuální plnění znamená, že do reaktorů je během dne mnohokrát přidáváno menší množství substrátu v součtu odpovídající denní dávce. Následně existuje diskontinuální způsob plnění, jež je charakteristický tím, že se fermentor kompletně zaplní čerstvým substrátem a vzduchotěsně utěsní (Kratochvílová et al. 2009).

Výtěžnost bioplynu v první řadě ovlivňuje biologická rozložitelnost substrátu, která je závislá na chemickém složení vstupního materiálu (Dohányos 2009). Složení substrátu ovlivňuje celkovou produkci bioplynu, která udává, kolik litrů bioplynu lze získat z jednoho kilogramu sušiny z jednotky plochy ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) a dále na celkovém výnosu sušiny ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$) (Fuksa 2018). S přibývajícím koncentrací sušiny v substrátu vzniká obtíž při promíchávání směsi, což může zapříčinit nedostatečné zásobení bakterií substrátem (Koutný 2008). Podle obsahu sušiny v substrátu se fermentace rozděluje na suchou a mokrou. Suchý typ fermentace se využívá při zpracování biomasy o obsahu sušiny 20–50 %. Mokrý typ je v praxi běžnějším typem fermentace, přičemž biomasa obsahuje sušinu do 14 % (Fuksa 2018).

Pro správný chod anaerobního procesu je také důležitý poměr uhlíku a dusíku (C:N). Za optimální poměr uhlíku a dusíku v procesu anaerobní fermentace považuje Dohányos (2009) poměr 30:1. Naproti tomu, autoři Herrmann et al. (2016) ve studii považují optimální poměr mezi 20:1 až 30:1. Autoři se shodují na skutečnosti, že nízký poměr C:N, tj. vysoký obsah bílkovin, způsobuje zvýšenou produkci amoniaku, která má za následek vysokou degradaci dusíkatých látek v procesu anaerobní fermentace. Vyšší koncentrace amoniaku v procesu fermentace působí na anaerobní bakterie toxicky, zejména na metanogeny. Je-li naopak poměr C:N vysoký, tj. nízký obsah bílkovin, dochází k deficitu dusíku, a tím k nedostatečné degradaci dusíkatých látek způsobující nízké výtěžky metanu.

Aby metanogeny mohly vykonávat své metabolické aktivity, potřebují optimální a vyrovnaný příjem živin. Například železo (Fe), nikl (Ni), kobalt (Co), molybden (Mo), selen (Se), a wolfram (W), které jsou nezbytné pro stabilní výkon digestoře k dosažení vysokého výtěžku bioplynu a výtěžku metanu. V pokusech bylo zjištěno, že přidání Ni zvyšuje tvorbu metanu během anaerobní fermentace až o 20 % (Demirel 2013).

Důležitým parametrem pro bakterie je také pH substrátu. Hodnota pH je hlavním parametrem ovlivňující funkci a růst bakterií anaerobní fermentace. Substrát pro anaerobní digesci musí mít pH mezi 6,8 až 7,3 to z důvodu, že většině bakterií vyhovuje hodnota pH

okolo 6,2–7,8 (Dobre et al. 2014). U kyselého substrátu, jako je siláž, se pH substrátu může upravovat použitím vápna, jež způsobuje zvýšení pH (Schulz & Eder 2004). V průběhu procesu se parametr mění. Straka et al. (2006) a Dobre et al. (2014) se shodují, že hodnota pH nesmí klesnout pod hodnotu 6. Pokles pH pod hranici šest se projeví inhibičními účinky na produkci metanu, jelikož dochází ke vzrůstu koncentrace neionizovaných mastných kyselin. Naopak přesáhne-li pH 7,6, jsou bakterie inhibovány kyselým prostředím a je omezena jejich správná funkce.

3.1.3 Batch testy

Batch testy označují dávkový postup plnění fermentoru. Znamená to, že se substrát do vyhnívací nádrže naplní najednou. Po ukončení procesu se vyhnívací nádrž najednou vyprázdní a v nádrži se ponechá 5 až 10 % vyhnílého kalu, v kterém se už nachází potřebné bakterie a novou dávku substrátu lze takto jimi naočkovat (Schulz & Eder 2004).

Batch testy neboli dávkovací testy označují také laboratorní jednorázové testy stanovující výtěžky bioplynu ze vzorků, za anaerobních podmínek (Fuksa 2018). Fuksa et al. (2020) prováděli testy ve skleněných lahvích o objemu 120 ml. Do skleněných lahví bylo nadávkováno 0,7 g suchého rostlinného materiálu spolu s 30 g inokulem (aktivní anaerobní organický substrát z bioplynové stanice). Na závěr bylo přidáno 80 g demineralizované vody. Lahve byly umístěny do termokomory temperované na $40\pm 1^\circ\text{C}$. Produkce bioplynu byla průběžně stanovována metodou objemového měření za pomoci plynoměrné byrety. Uvedená metoda je založena na principu, kdy se objem stanoví pomocí kapaliny vytlačené plynem. Čistá substrátová výtěžnost bioplynu z kukuřice ($1.\text{kg}^{-1}$) byla stanovena po odečtení výtěžnosti bioplynu, ze samotného inokulu, od sledovaných vzorků s biomasou. Následně byla zjištěna celková produkce bioplynu ($\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$) jako součin průměrné hodnoty substrátové produkce bioplynu a výnosu sušiny silážní kukuřice sledovaných variant.

3.1.4 Složení substrátu

Látky uložené v obsahu buněk (škrob, cukry) jsou rychle rozložitelné bakteriemi. Koncentrace bílkovin, sacharidů, tuků a poměr C:N hraje důležitou roli pro dosažení efektivní produkce metanu (Herrmann & Rath 2012). Rath et al. (2013) uvádějí, že významných pozitivních účinků na specifický výtěžek bioplynu dosahují látky: škrob, tuky, hemicelulóza a organické látky rozpustné v enzymech. Naproti tomu, negativní vliv byl zjištěn u ligninu a ve vodě rozpustných sacharidech. Složení bioplynu a jeho poměry byly především ovlivňovány obsahem bezdusíkatých látek a vláknitých frakcí (Herrmann et al. 2016). Bruni et al. (2010) zkoumali složení substrátu připraveného ze siláže šesti různě raných hybridů kukuřice. Bílkoviny, lipidy a kyselina octová tvořily 8,6, 2,7 a 1,7 % z celkové sušiny. Nejvyšší obsah bílkovin měly odrůdy Ravenna a Banguy, shodně 8,2 % z OH rostliny. Nejvíce vlákniny, 18,2 % měla odrůda Fantastic. Naproti tomu, nejméně, 13,6 %, měla odrůda Banguy. Největšího obsahu cukrů dosáhly odrůdy Graphic, 5,6 % a Ravenna, 5,3 %.

3.1.4.1 Polysacharidy

Polysacharidy jsou součástí veškeré rostlinné biomasy, do které náleží škrob, celulóza a hemicelulóza. Škrob se hydrolyzuje amylolytickými enzymy a je nejlépe rozložitelný bakteriemi. Celulóza je polymerem glukózy a je bakteriemi hůře rozložitelná. Pro hydrolyzu celulózy je nutná přítomnost celulolytických enzymů, které produkují hydrolytické bakterie. Z toho vyplývá, že rozkládání celulózy v substrátu na jednodušší cukry probíhá v první fázi technologie výroby bioplynu. Hemicelulózu tvoří rozvětvené řetězce polysacharidů a podléhá rychleji enzymatické hydrolyze než celulóza (Straka et al. 2006; Dohányos 2009). Schittenhelm (2008) uvádí, že metanový potenciál sacharidů činí $415 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$.

3.1.4.2 Lignin

Lignin neboli vláknina, je součástí každé rostlinné biomasy. Nachází se v buněčných stěnách rostlin, kde buňkám dodává pevnost a tuhost. Lignin zároveň slouží jako zpevňující látka, kdy bez ligninu by kukuřičné stéblo nemělo patřičnou oporu. Vyšší koncentrace ligninu se nachází hlavně ve spodní části stébla kukuřice (Dohányos 2009; Tyrolová 2021).

Schittenhelm (2008) prováděl své pokusy na území Německa. Autor uvádí, že s rostoucí zralostí kukuřice se zvyšuje podíl vegetativních částí rostlin (tj. listů a stonků), čímž se zvyšuje obsah ligninu. Nicméně z pohledu procesu anaerobní fermentace, lignin ve větším množství negativně ovlivňuje tento proces, jelikož není snadno odbouratelný bakteriemi, což zapříčiňuje snížení produkce metanu (Amon et al. 2007b; Herrmann et al. 2016). Vláknina je součástí biologicky nerozložitelné frakce organických látek ve stabilizovaném zbytku po anaerobní fermentaci neboli digestátu. Autoři se shodují, že lignin je nejdůležitější složkou rostlinné biomasy, která určuje specifické výtěžky metanu. Produkce metanu na jednotku biomasy, klesá se zvyšujícím se obsahem ligninu a vláknitých frakcí (Dohányos 2009; Herrmann & Rath 2012; Herrmann et al. 2016).

Mladší rostliny obsahují více jednoduchých cukrů, bílkovin a téměř žádný škrob, přičemž si zachovávají velmi vysokou rozložitelnost hmoty. Při procesu dozrávání rostlin postupně narůstá obsah škrobu a současně se snižuje obsah vodorozpustných sacharidů a bílkovin. V palicích se zvyšuje podíl škrobu a ve zbytku rostliny, tj. ve stéblech a listech, narůstá obsah vlákniny (celulózy, hemicelulózy a především téměř nedegradovatelného ligninu) (Fuksa 2018).

3.1.4.3 Lipidy

Do skupiny lipidů patří převážně estery vyšších mastných kyselin a alkoholy (Straka et al. 2006). Lipidy snadno podléhají enzymové hydrolyze, která probíhá v první fázi fermentace hydrolytickými bakteriemi (Schulz & Eder 2004; Dohányos 2009).

Vysoký obsah lipidů v substrátu má pozitivní vliv na výtěžek metanu na jednotku biomasy (Herrmann & Rath 2012). Ze substrátů obsahující dostatečné množství tuků lze vyprodukovat více metanu, než z látek bohatých na bílkoviny a sacharidy (Schulz & Eder 2004). Jak uvádí Schittenhelm (2008), metanový potenciál lipidů činí $1\,014 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$, což je více než dvojnásobek metanového potenciálu sacharidů. Autor dále konstatuje, že

koncentrace tuků se během vegetačního období průběžně změnila, ke konci vegetačního období kukuřice se koncentrace tuků z důvodu dozrávání palic zvýšila.

3.1.4.4 Proteiny

Proteiny jsou dobře biologicky rozložitelné látky vykazující vysoký potenciál výtěžku metanu, navíc obsahující síru a dusík (Dohányos 2009). Síra je, dle Dohányose (1996), významná pro růst metanogenních bakterií. Dusík je významný pro optimální poměr C:N. Velká část uhlíku se nachází v buněčné stěně v podobě celulózy, hemicelulózy a ligninu (Herrmann & Rath 2012). Vysoký obsah bílkovin vede k nízkým průměrům C:N v biomase plodin. Dusík se v procesu anaerobní fermentace přemění v amoniak. Vytváří se vyšší koncentrace amoniaku, která může působit v tomto procesu toxicky na bakterie a tím i snížit tvorbu metanu (Amon et al. 2007a; Dohányos 2009; Herrmann et al. 2016). Schittenhelm (2008) uvádí, že metanový potenciál bílkovin je $496 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$ (Herrmann & Rath 2012). Herrmann et al. (2016) ve své studii uvádějí, že bílkoviny a lipidy mohou přispívat k vyšším hladinám výtěžku metanu ve srovnání se sacharidy.

3.2 Charakteristika silážní kukuřice

Kukuřice setá (*Zea mays* L.) se v posledních letech stala významnou plodinou ve formě siláže jako objemné konzervované krmivo pro chov skotu, ale také jako biomasa pro bioplynové stanice (Smutný & Šedek 2017). Kukuřice patří do čeledi lipnicovitých (*Poaceae*), a také jako jiné rostliny z této čeledi se řadí mezi jednoděložné, krytosemenné a větrosrnné rostliny. Kukuřice má však svá specifika, neboť květenství, samčí i samičí, se nachází na jedné rostlině, označující se jako jednodomé neboli jednopohlavní rostliny. Samičí květenství, nazývané palice, vyrůstá z úžlabí listů a je obaleno mnoha listeny, které je chrání. Samčí květy jsou uspořádány z hustých lichoklasů v latu na vrcholu rostliny. Plodem kukuřice seté je obilka (Valíček et al. 2002; Hrouda 2010; Brant et al. 2020).

Dalším významným specifikem kukuřice je zařazení do skupiny C4 rostlin, označující způsob fotosyntézy. C4 cyklus, známý též Hatchův–Slackův cyklus, značí způsob fixace oxidu uhličitého (CO_2) probíhajícího v temnostní fázi fotosyntézy, za vzniku čtyřuhlíkatého oxalacetátu. Rostliny typu C4 jsou schopny rychlejší fotosyntézy a efektivnějšího využití sluneční energie, vody a živin na tvorbu výnosu, ve srovnání s C3 rostlinami, dva až třikrát efektivněji (Zimolka et al. 2008; Hrouda 2010; Vaněk et al. 2016).

3.2.1 Hybridy kukuřice

Na porost kukuřice a produkční parametry má zásadní vliv genetický základ daného hybridu. Celkem bylo k roku 2018 registrováno 395 hybridů kukuřice, z toho bylo 22 hybridů geneticky modifikováno na odolnost vůči škůdci, zavíječi kukuřičnému. Hybridy jsou šlechtěny za pomoci heterózního efektu (Fuksa 2018; Brant et al. 2020).

Mezi jedno z nejdůležitějších pěstitelských opatření patří správný výběr hybridu kukuřice. Při rozhodování je nutné zohlednit především směr pěstování, výrobní oblast, teplotní a půdní podmínky stanoviště (Fuksa & Kalista 2006). Hybridy jsou rozděleny do skupin podle tzv. čísla FAO, které charakterizuje ranost hybridu kukuřice a délku jeho

vegetace (Zimolka et al. 2008). Fuksa & Kalista (2006) uvádějí, že rozdíl FAO čísla o deset jednotek způsobí rozdíl v délce vegetace o dobu jednoho až dvou dnů, případně o 1–1,5 % obsahu sušiny zrna. Čím je číslo FAO vyšší, tím má hybrid delší vegetační dobu (Fuksa et al. 2017).

Dle Branta et al. (2020) jsou dlouhodobě nejvíce využívány rané hybridy kukuřice pro výrobu siláže a rovněž i pro sklizeň na zrno. V pěstování kukuřice na siláž, v podmínkách České republiky, převažují hybridy s číslem FAO 220 až 260, přičemž dle statistik z let 2002, 2008 a 2018 byly zastoupeny průměrně 54 %. Hybridy s FAO do 220, označované velmi rané, byly v roce 2002 zastoupeny 26 %, přičemž v roce 2018 byly zastoupeny pouze 13 %. Inverzní trend byl pozorován u hybridů s FAO 260 až 300, ze středně rané skupiny, kdy v roce 2002 zaujímal tato skupina 13 %, a v roce 2018 již 25 % (viz příloha A).

Rané hybridy mají kratší vegetační dobu, vyznačují se však vyšším podílem palic (i přes 60 %; vyjádřeno v sušině) ke zbytku rostliny (Fuksa 2018). Hybridy kukuřice s vyšším číslem FAO mají delší vegetační dobu, jsou vhodnější do teplotně příznivých oblastí a označují se jako pozdní hybridy. Pozdní hybridy v teplotně příznivých oblastech mají k dispozici delší období pro tvorbu biomasy. Délka vegetačního období hybridů pozitivně koreluje s počtem listů na rostlině. Pozdní hybridy mají větší listovou plochu a vyšší výnosový potenciál (Fuksa et al. 2017).

Z hlediska zastoupení listů se hybridy rozdělují na listové (leafy) a nelistové (non-leafy). Listové hybridy jsou šlechtěny pro vyšší produkci biomasy, resp. byly vyššího růstu a měly větší počet listů (osm a více), které zvyšují index listové plochy rostliny. Čím je index listové plochy větší, hybridy mohou využít větší zelené plochy na proces fotosyntézy. Škrob z listových hybridů se vyznačuje o 5–7 % větší stravitelností než z nelistových hybridů (Zsubori et al. 2013; Legend Seeds 2021).

3.2.2 Hlavní zásady při zakládání porostů

3.2.2.1 Vliv zpracování půdy

Dobře obhospodařovaná půda je základním předpokladem pro úspěšné a vysoké výnosy plodin. Zpracování půdy je velmi významné pro klíčení semen, jelikož ovlivňuje dostupnost vody a dostatek půdního kyslíku. Samotné zpracování půdy mění prostorové rozmístění půdní hmoty, velikostní složení půdních agregátů a rozhoduje o samotném vývoji kořenového systému v půdním prostředí. Pro správný růst, vývoj a rozvoj kořenového systému a celé rostliny kukuřice je důležité nezapomenout na správnou předset'ovou přípravu půdy, která zajišťuje vytvoření set'ového lůžka a srovnání povrchu půdy. Kukuřice vytváří bohatý svazčitý kořenový systém, který proniká do hloubky 1,5 až 3 metrů. Převážná část je však rozložena v orniční vrstvě (tj. do 20 cm), která je nejurodnější a vzniká zemědělskou činností na polích. Jarní příprava půdy před setím spočívá především v urovnání pozemku, zamezení ztráty vody a snížení zaplevelenosti pozemku. Kypření půdy před setím se provádí jen do hloubky výsevu, která se odvíjí od kalibrace osiva, termínu setí a půdního druhu. Pro stejnoměrné vzejití osiva je důležitá rovnoměrná hloubka setí. Osivo menší kalibrace, na těžší půdách a časném termínu setí, se doporučuje hloubka setí do 4 cm. Naopak pro lehké půdy, při

využití větší kalibrace a pozdějším termínu setí, se doporučuje hloubka kolem 6 cm (Prokeš 2001; Zimolka et al. 2008; Tomášek & Cihlár 2018; Brant et al. 2020).

Brant et al. (2020) uvádějí, že kukuřice setá zásadním způsobem nereaguje na rozdílné systémy zpracování půdy lišící se hloubkou či intenzitou zpracování půdního profilu. Rostliny kukuřice jsou úspěšně pěstovány i v technologiích setí do nezpracované půdy.

3.2.2.2 Vliv hnojení a půdní výživa

Využití kukuřice seté za účelem výroby siláže je spojeno se značným narušením bilance organické hmoty v půdě. Celé rostliny jsou sklizeny a odvezeny z pozemku, je tedy nutné pamatovat na stabilizaci bilance organické hmoty v půdě (Brant et al. 2020). Obsah živin v půdě je významným činitelem, jenž ovlivňuje růst rostliny a i kvalitu vyprodukované biomasy. Deficit i nadbytek makrobiogenních a mikrobiogenních prvků může negativně působit na porost a vývoj rostliny (Zimolka et al. 2008; Vaněk et al. 2016).

Běžně používanými hnojivy pro pěstování kukuřice jsou organická hnojiva. Kukuřice velmi dobře snáší hnojení pevnými i kapalnými statkovými hnojivy. Například využití kejdy, chlévského hnoje (do 40 t.ha⁻¹) nebo močůvky pro dodání dusíku do půdy (mezi 40–70 t.ha⁻¹) (Balík et al. 2001; Brant et al. 2020).

Pro hnojení kukuřice lze také využít digestát ze zemědělských bioplynových stanic. Složení digestátu je různorodé a závisí na vstupním materiálu do bioplynové stanice, průběhu digesce či době zpracování ve fermentoru. Vyšší podíl kukuřice na počátku procesu způsobí vyšší obsah fosforu a železa na konci zpracování. Digestát obsahuje vysoký podíl amoniakálního dusíku a je vhodné jej aplikovat před výsevem jařin a po podzimní sklizni (Kusá et al. 2019).

Z počátku růstu má kukuřice pomalý příjem živin, rostlina je citlivá na nízké teploty a má malou schopnost konkurovat jiným rostlinám. K výraznějšímu příjmu živin dochází asi měsíc po vzejití porostu v průběhu intenzivního růstu, kdy rostliny již mají lépe vyvinutý kořenový systém a přijmou 70–75 % všech živin. Zvláště příjem draslíku (K) a dusík (N) je zvýšený, jejich příjem rostlinou vrcholí v období počátku květu. Příjem fosforu (P) a hořčíku (Mg) je rovnoměrný během celé vegetace (Balík et al. 2001; Vaněk et al. 2016).

Jak uvádějí Tomášek & Cihlár (2018), dusíkaté hnojení je hlavním prvkem při výživě kukuřice. Nedostatek dusíku v půdě má, vlivem omezené tvorby chlorofylu a kořenového systému, za následek omezený růst rostliny. Dusíkaté hnojivo lze aplikovat před setím, v řepařské výrobní oblasti až do objemu 120 kg N.ha⁻¹, také lze přihnojit i během vegetace.

Porost kukuřice má vysoké nároky na fosfor. Může docházet k jeho nedostatku, na počátku růstu rostlin nebo za nepřízně počasí. Nejčastějším příznakem nedostatku fosforu u mladých rostlin je fialový nádech listů, způsobený vyšší tvorbou antokyanů. Fosfor se do půdy dodává před setím, nejčastěji společně s dusíkem ve formě NP hnojiva nebo prostřednictvím digestátu. Při velkém nedostatku fosforu se rostliny špatně vyvíjí a rostou (Balík et al. 2001; Zimolka et al. 2008; Vaněk et al. 2016).

Kukuřice má vyšší nároky na zinek, který se podílí na metabolismu dusíku. Zinek dále ovlivňuje tvorbu proteinů, aminokyselin v rostlině, průběh kvetení a vývoj generativních orgánů. Nedostatek zinku se projevuje žlutými až bílými skvrnami mezi žilnatinou listů. Objevují se nekrózy a deformace listů, tím se tedy snižuje efektivita fotosyntézy. Zinek je

nejlépe pro rostliny přijatelný v chelátové formě. Mezi významné rostlinné živiny rovněž patří bór, který zlepšuje kvalitu rostliny. Bór je nezbytný pro transport sacharidů a tvorbu bílkovin v rostlině, stabilizuje buněčné stěny a podporuje klíčivost pylu. Stejně jako při nedostatku zinku, taktéž při nedostatku boru dochází k deformaci a nekrotizaci listů. Při dlouhodobém nedostatku boru během vývoje rostliny, dochází k deformaci palic a nepravidelnému ozrnění (Zimolka et al. 2008; Vaněk et al. 2016; Tomášek & Cihlár 2018).

Během vegetace lze aplikovat podpůrné přípravky a listová hnojiva, která pomáhají při působení nepříznivého počasí, deficitu prvku v půdě či stresu rostlin. Přípravky jsou schopny zvýšit výnos a zmírnit pro rostlinu stresové situace při nedostatku vláhy (Tomášek & Cihlár 2018).

3.2.2.3 Termín setí

Kukuřice setá je teplomilná rostlina, vyžaduje relativně vysoká teplotní optima pro klíčení semen, vývoj rostliny a akumulaci sušiny. Rostlina je citlivá na chladné počasí, proto jsou důležité podmínky prostředí, ve kterém je pěstována a klimatické podmínky během celého růstového cyklu (Herrmann & Rath 2012; Seppälä et al. 2013).

Vliv ročníku a průběh počasí ovlivňuje teplotu půdy, tato hodnota je důležitá vzhledem k optimálnímu klíčení semen (Brant et al. 2020). Podle teploty půdy se volí termín setí. Autoři Zimolka et al. (2008) a Řeňč (2015) se shodují že, pro optimální klíčení semen by se měla teplota půdy pohybovat kolem 8–10°C v hloubce půdy 50 mm. Tomu v podmínkách České republiky odpovídá přibližně polovina dubna až začátek května. Zpozdí-li se termín zasetí (po desátém květnu) výnos se zpravidla sníží minimálně o 15 %.

Srážky a množství vody v prostředí ovlivňují kukuřici již od zasetí. Obecně se uvádí, že kontakt povrchu semene s půdními částicemi činí přibližně 10 %. V půdě pro semeno má významnější roli proudění vody než difuze. Semena mohou čerpat vodu i z půdního vzduchu, jehož vlhkost se optimálně pohybuje okolo 70 %, čím vyšší je tato hodnota, tím se zvyšuje klíčivost (Brant et al. 2020).

3.2.2.4 Výsevek a způsob pěstování

Kukuřice setá se dá efektivně pěstovat v monokulturách. Rostliny nejsou náročné na předplodinu v osevním postupu. Avšak kukuřice vyžaduje velké množství dusíku, je tedy vhodné kukuřici zařadit v osevním postupu po zlepšujících plodinách. Například po okopaninách, které jsou hnojeny organickými hnojivy nebo luskovinách, které díky bakteriím rodu *Rhizobium* dodávají dusík do půdy (Brant et al. 2020). Bez ohledu na směr využití pěstované kukuřice, má organizace a založení porostu významný vliv na kvalitu a tvorbu výnosu. Kukuřice je tradičně pěstována v systému širokých řádků, s meziřádkovou vzdáleností 70 až 75 cm, což při výsevku 80 000 až 90 000 jedinců na hektar odpovídá 14 až 17 cm vzdálenosti rostlin v řádku (Řeňč 2015; Smutný & Šedek 2017; Brant et al. 2020). Širokořádkové systémy pěstování jsou považovány za nejrizikovější ohledně eroze půdy, což může za nepříznivého počasí způsobit povrchový odtok vody a ztráty půdy erozí. Na pozemcích, jež jsou více ohroženy erozí, lze využít úzkořádkovou techniku výsevu, podsev v meziřadí a další půdoochranné technologie (Tippl et al. 2001).

Podle čísla FAO se upravuje výsevek na jednotku plochy. Pro Českou republiku je doporučována hustota porostu od 7 do 11 rostlin na 1 m² (Řeňč 2015). Fuksa (2018) a Řeňč (2015) ve svých pracích uvádějí, že pro rané hybridy silážní kukuřice (FAO 240 a méně) se obvykle doporučuje hustota porostu okolo 90 000 a více rostlin na hektar. Pro středně rané až středně pozdní druhy (FAO 240 až 350) od 80 000 do 90 000 rostlin na hektar a pro hybridy s FAO 350 a více se doporučuje hustota porostu do 80 000 rostlin na hektar. Doporučená hustota porostu zpravidla klesá s délkou vegetační doby hybridu. Jak uvádějí Amon et al. (2007b), hybridy s pozdním zráním produkují více biomasy než odrůdy se středním nebo časným zráním.

Při vysoké hustotě výsevu si rostliny konkurují o sluneční záření, vodu a živiny. V důsledku intenzivní soutěže o uvedené zdroje se zvyšuje stres rostlin, to má za následek pokles hmotnost jednotlivých rostlin a obsah sušiny. Avšak navyšování počtu rostlin na m² vede k nárůstu výnosu biomasy. Konkurenci mezi rostlinami lze snížit rovnoměrnějším uspořádáním porostu, například využitím alternativních meziřádkových vzdáleností (Jirmanová et al. 2016; Smutný & Šedek 2017; Fuksa et al. 2020). Fuksa (2018) ve svém článku tvrdí, že různé prostorové uspořádání porostu obvykle nemá výrazný vliv na kvalitu biomasy kukuřice. Naopak při snížení výsevku nedochází k vzájemné konkurenci mezi rostlinami. Za příznivých podmínek rostliny dosahují své maximální hmotnosti, avšak celkový výnos sušiny je nižší (Smutný & Šedek 2017; Fuksa 2018).

3.2.2.5 Škůdci a choroby kukuřice

Škůdců a chorob, které ovlivňují kvalitu a množství vyprodukované biomasy je mnoho. Rostliny jsou ohroženy po celou dobu své vegetace. K napadení může přispívat špatný průběh počasí, nesprávná příprava půdy pro zasetí a ponechání mnoha posklizňových zbytků na poli. Po celou dobu vegetace jsou rostliny kukuřice ohroženy obecnou snětivostí, která může přezimovat v posklizňových zbytcích na poli ponechaných na povrchu půdy. Jedná se o velmi rozšířený patogen *Ustilago maydis*, který se živí jak odumřelou, tak i živou organickou hmotou (Kazda et al. 2010; Tóth & Kmoch 2016). Obecná snětivost na rostlinách kukuřice způsobuje deformované útvary (tumory) na kterékoliv části rostliny, nejčastěji však vznikají na stoncích. Proti napadení kukuřice snětivostí je možné namoření osiva, nýbrž hlavním opatřením pro snížení tohoto patogenu je důkladné zapravení posklizňových zbytků do půdy orbou (Tóth & Kmoch 2016).

Posklizňové zbytky se mnohdy nepodaří zapravit zcela do půdy. Nerozložené části rostlin, které zůstávají na povrchu půdy, jsou ideálním místem pro šíření hub a hmyzu. Často je toto příčinou silného rozšíření škodlivých organismů (Kazda et al. 2010).

Palice kukuřice mohou být ve fázi časně mléčné zralosti napadeny houbami rodu *Fusarium* (Kazda et al. 2010). Pomocí mycelia přezimují v posklizňových zbytcích, pro rozvoj fuzariózy hraje významný vliv počasí. K rozvoji napomáhá teplé a vlhké počasí v období kvetení a srážky ke konci vegetace. *Fusarium* může způsobovat hnilobu palic, kořenů dokonce i stonků. Hniloba palic významně snižuje výnos a může být nebezpečná jak pro člověka, tak pro zvířata kvůli produkci mykotoxinů (Kazda et al. 2010; Tóth & Kmoch 2016).

Mykotoxiny se dostávají do silážní hmoty. Proběhne-li fermentační proces v pořádku, neměl by být obsah mykotoxinů ve finální siláži vyšší než v řezance vstupních rostlin. U zelené hmoty, která je výrazně napadená plísněmi neprobíhá fermentační proces správně, a je následně v bioplynové stanici velmi špatně zpracovatelná bakteriemi. Autoři studie doporučují pro zmírnění rizika výskytu patogenů se zaměřit na správný výběr hybridu pro danou lokalitu, vhodnou agrotechniku, vyrovnanou výživu rostlin a včasnou sklizeň (Nedělník & Strejčková 2019).

Obecná listová spála je napadení kukuřice způsobeno houbou *Setosphaeria turcica* a *Cochliobolus heterostrophus*, které přežívají v posklizňových zbytcích na poli. Spory těchto hub se šíří větrosnubně, podsevy a meziplodiny jsou tedy možnostmi, jak omezit jejich šíření (Brant et al. 2020). Houbám svědčí vlhké a teplé počasí. Infekce se projevuje šedými skvrnami na listech, které narušují a snižují plochu s fotosyntetickými pigmenty. Vzhledem k špatně probíhající fotosyntéze nevzniká dostatek asimilátů, což se projeví na velikosti zrna. Oslabené rostliny jsou pak více náchylné na další houbové patogeny, například na *Fusarium*. Opatřením proti spále listové je správný výběr hybridu, správné zapracování posklizňových zbytků do půdy a využití fungicidů (Tóth & Kmoch 2016).

Vážně poškodit rostliny kukuřice dokážou také zástupci hmyzu. Motýli zavíječe kukuřičného jsou vážnými škůdci kukuřice, jeho housenky vyžírají stébla a palice, díky tomuto mechanickému poškození vzniká vstupní brána pro houbové choroby. Při silném poškození se může rostlina zlomit (Kazda et al. 2010; Nedělník & Strejčková 2019).

Mezi další nebezpečné škůdce patří bázlivec kukuřičný, který se řadí mezi mandelinky (Kazda et al. 2010). Uvedená mandelinka mechanicky poškozuje kořeny, a tím vzniká vstupní brána pro houbové choroby (Zimolka et al. 2008).

Napadení škůdci lze eliminovat správnou agrotechnikou nebo použitím insekticidních prostředků. Řešení se rovněž nabízí v genovém inženýrství, kdy jsou rostliny kukuřice geneticky modifikovány (GMO) na rezistenci vůči těmto škůdcům. Nicméně legislativa prakticky neumožňuje v České republice pěstovat GMO rostliny v běžných provozech (Nedělník & Strejčková 2019).

3.2.2.6 Zaplevelení porostů kukuřice

Obvyklými plevely v porostu kukuřice jsou například merlíky, laskavce, rdesna a prosovité trávy. Trávovité plevele jsou velmi významnou skupinou plevelů, které se velmi dobře adaptují podmínkám prostředí. K plevelům patří ježatky, čiroky nebo například béry. Problémy však mohou tvořit i ostatní plevele, které se vyskytnou mezi řádky kukuřice. Ponechání pozemku bez regulace plevelů a umožnění tak plevelům se rozrůst, působí v mnoha ohledech negativně. Rostliny kukuřice mají na počátku růstu minimální konkurenční schopnost vůči plevelům, vzájemně si konkurují o vodu, živiny a sluneční světlo potřebné k růstu. Při zaplevelení porostu a absence regulace plevelů dochází k poklesu výnosu biomasy od 30 do 50 %, při extrémním zaplevelení se může výnos snížit až o 90 %. Mimo jiné zaplevelení negativně působí na kvalitu kukuřice, která je zejména důležitá u kukuřice určené na siláž. Může se stát, že silné zaplevelení bude způsobovat problémy při sklizni. (Kazda et al. 2010; Brant et al. 2020; Venclová 2020).

Brant et al. (2020) uvádějí, že ranější hybridy a hybridy s větším olistěním, jsou lépe schopny odolávat a konkurovat plevelům. Existuje více metod regulace plevelů v porostu kukuřice a to:

- Nepřímá metoda – vyznačuje se agrotechnickými postupy, které vytváří nevhodné podmínky pro růst a reprodukci plevelů, čímž se reguluje zaplevelení pozemku. Monokulturní pěstování kukuřice velmi podporuje zaplevelení pozemku. Hlavním postupem této metody je střídání plodin s plodinami vyznačující se vysokou konkurenční schopností, které rozvoj plevelů omezí.
- Plečkování – jedná se o mechanický způsob regulace plevelů, který přispívá k omezení využívání herbicidů. Kromě regulace plevelů dochází při plečkování k prokypření povrchu půdy mezi rostlinami kukuřice. Plečkování je nejvýhodnější konat na začátku vegetace plevelů, kdy jsou citlivé na mechanické poškození.
- Možnosti herbicidní ochrany – spektrum herbicidní ochrany je poměrně široké, avšak Evropská unie vede k omezení používání herbicidní ochrany, vzhledem k ochraně půdy a podzemních vod. Herbicidy lze aplikovat preemergentně či časné postemergentně s reziduálním působením v půdě.
 - Preemergentní ošetření – jedná se o ošetření pozemku herbicidy od výsevu do vzejití zaseté kukuřice. Preemergentní ošetření je orientováno na využití herbicidů proti jednoletým dvouděložným plevelům. Hlavní účinnou látkou je *terbuthylazin*, výhodou této látky je vysoká selektivita ke kukuřici. Avšak v posledních letech je nátlak ke snižování dávek půdních herbicidů. Od preemergentního ošetření se pomalu ustupuje z hlediska vysokého rizika selhání účinnosti v nepříznivých vláhových podmínkách (Jursík & Soukup 2019; Venclová 2020).
 - Časné postemergentní ošetření – jedná se o ošetření po vzejití kukuřice do fáze dvou až tří listů. Postemergentní herbicidy nejrychleji působí na již vzejité plevele (do čtyř pravých listů) jako kontaktní listové herbicidy, je tedy nutné dbát na správné načasování aplikace, aby ošetření bylo účinné (Jursík & Soukup 2019).
 - Klasické postemergentní ošetření – je vhodné jej aplikovat v aridních oblastech, za sucha nebo v případě přímého setí do nezpracované půdy. Výhodou ošetření je možnost zasažení širšího spektra vytrvalých plevelů. Klasické postemergentní ošetření proti plevelům se obvykle aplikuje ve fázi čtyř až šesti listů kukuřice, kdy je kukuřice nejméně citlivá k herbicidům (Brant et al. 2020; Venclová 2020).

Účinnost herbicidů je ovlivňována mnoha faktory, nejvýznamnějším faktorem je vlhkost půdy. Brant et al. (2020) uvádějí, že účinnost herbicidu stoupá se zvyšující se vlhkostí půdy. Plevelé přijímají herbicid převážně ve formě vodního roztoku, při nedostatku vody v půdním profilu, nejsou účinné látky herbicidu přijímány plevele, ale zůstávají poutány v půdě. Dále má významný vliv růstová fáze plevelů. S rostoucí růstovou fází plevele, klesá účinnost většiny výše uvedených herbicidů.

3.3 Produkce bioplynu z kukuřice

Honsová (2013) zmiňuje, že kukuřice je hlavní energetickou plodinou, která se využívá jako vstupní surovina do zemědělských bioplynových stanic. Rovněž podle Zimolky et al. (2008) je kukuřice ideální plodinou pro anaerobní fermentaci v bioplynových stanicích, a to ve formě kukuřičné siláže.

Co se týká České republiky, v roce 2020 se dle Českého statistického úřadu (2021) pěstovala kukuřice na siláž na 226 155 hektarech zemědělsky obhospodařovatelné půdy. Přičemž nejvíce pěstované plochy kukuřice zaujímala v kraji Vysočina (37 934 ha), ve Středočeském kraji (31 340 ha) a v Jihočeském kraji (31 077 ha). Nejmenší osevní plocha kukuřice byla v Hlavním městě Praha (257 ha). Část produkce byla zkrmena zvířaty a část využita bioplynovými stanicemi na produkci bioplynu.

Kukuřice na produkci bioplynu musí vynikat výbornou silážovatelností. Mezi další důležité faktory patří, co nejvyšší produkce rostlinné hmoty, vysoká koncentrace živin a jejich nízké ztráty při konzervaci a skladování. Kukuřice poskytuje kvalitní biomasu, která je dobře rozložitelná bakteriemi, což se dále promítá do produkce bioplynu. Kvalita biomasy se tvoří na poli, kde je po celou dobu růstu ovlivňována stanovištními podmínkami, průběhem počasí, škůdci a podobně (Šuk et al. 1998; Amon et al. 2003; Fuksa 2018).

Celková produkce bioplynu (z hektaru; m³) závisí především na výnosu sušiny kukuřice (t/ha). Je známé, že výnos sušiny je stěžejní pro celkovou produkci bioplynu z hektaru, ale kvalita biomasy je významným příspěvkem k celkové produkci bioplynu a vyššímu obsahu metanu v něm. Dále produkce závisí na termínu sklizně a zvoleném hybridu (Fuksa 2018; Fuksa et al. 2020). Výnos metanu je rovněž závislý na způsobu sklizně, zda jsou sklizeny celé rostliny nebo pouze palice (Amon et al. 2003). Demirel (2013) naměřil bioplynový potenciál kukuřice, který uvádí výtěžek bioplynu 560–650 m³.t⁻¹ OH, z toho obsah metanu činil 52 %. Pro porovnání u cukrovky bylo naměřeno 730–770 m³.t⁻¹ OH, obsah metanu byl 53 %. U čiroku bylo naměřeno méně výtěžku bioplynu, a to 520–580 m³.t⁻¹ OH, přičemž ale bylo dosaženo většího poměru metanu, a to 55 %.

3.3.1 Výběr hybridu k produkci bioplynu

Nové hybridy kukuřice jsou šlechtěny na vysoký obsah škrobu a také na vysokou stravitelnost buněčné stěny (Herrmann & Rath 2012). Schittenhelm (2008) doporučuje k výrobě bioplynu použít hybridy dozrávající nepatrně později (maximálně o 50 jednotek FAO) než běžně pěstovaná kukuřice pro krmné účely v dané oblasti.

Amon et al. (2007a) ve své práci uvádějí, že za vhodných klimatických podmínek lze dosáhnout výtěžku metanu 7 500 až 10 200 m³ na hektar u odrůd, s čísly FAO 300 až 600, sklizených při voskové zralosti zrna. Přes mírný genotypový vliv na výtěžek metanu na jednotku biomasy, při uvažování pouze vlivu sušiny, za jinak neměnných podmínek, je nesporné, že výroba kukuřice na bioplyn vyžaduje pro úspěšné silážování odrůdy s vysokým výnosovým potenciálem a s minimálním obsahem sušiny 28 % v celém objemu biomasy (Herrmann & Rath 2012).

Seppälä et al. (2012) prováděli své pokusy v jižním (Piikkiö) a středním (Laukaa) Finsku. Autoři se ve výzkumu výnosů zabývali kukuřicemi odrůd Francisco (FAO 270),

Amara (FAO 260), Marcello (FAO 260), Cerruti (FAO 210), MAS09A (FAO 160), KXA7251 (FAO>300), KXA7254 (FAO>300), Valdez (FAO 290) a Revolver (FAO 160). Tyto odrůdy byly zasety ve dvou různých časech, 17. a 29. května. Výnosy sušiny u kukuřice z doby setí 29. května nebyly významně odlišné od kukuřice zaseté k datu 17. května. Průměrný obsah sušiny kukuřice z prvního termínu sklizně byl 198 g.kg^{-1} a z druhého termínu sklizně 280 g.kg^{-1} . Obsah sušiny a organické hmoty odrůd kukuřic pěstovaných v Piikkio byly vyšší než u odrůd kukuřic pěstovaných v Laukaa.

U odrůd kukuřice Francisco, Amara, Marcello, Cerruti a MAS09A se vyskytovaly v průměru dvě palice na kukuřici. Pouze kukuřice druhu Revolver do okamžiku sklizně neprodukovala žádné palice. Průměrný počet listů bylo dvanáct kusů na rostlině kukuřice. Druhy Revolver, Cerruti a MAS09A dosahovaly četnosti pouze deset listů. Rostliny Amara, Valdez, KXA7251 a KXA7254 naopak měly více než třináct listů na jedné rostlině (Seppälä et al. 2012).

3.3.2 Vliv hybridu na produkci bioplynu

Co se týče vlivu hybridu na produkci metanu, Amon et al. (2007a) testoval na území Německa celkem šest hybridů (Baxter, Wexsil, DK532, Cecilia, Alisun, Doge) s čísly FAO mezi 380 až 600. Použité hybridy byly sklizeny ve voskové zralosti zrna. Výtěžek biomasy ranějších odrůd byl vyšší než výtěžek odrůd pozdních. Nejvyššího výnosu metanu ($12\,390 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$) na jeden hektar dosáhla odrůda Baxter s číslem FAO 380. Nejmenšího výnosu dosáhla odrůda Doge (FAO 600), kdy výnos činil $9\,800 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Nicméně odrůda Doge dosáhla nejvyššího specifického výtěžku metanu $422 \text{ l}_N.\text{kg}^{-1} \text{ OH}$, druhým nejvyšším specifickým výtěžkem metanu z testovaných druhů dosáhly odrůdy Baxter a DK532 ($412 \text{ l}_N.\text{kg}^{-1} \text{ OH}$) (viz příloha B). Specifickým výtěžkem metanu se rozumí podíl mezi vyprodukovanou biomasou kukuřice na hektar a výtěžkem metanu z vyprodukované biomasy na hektar. Specifický výtěžek metanu se uvádí v jednotkách $\text{l}_N.\text{kg}^{-1} \text{ OH}$. Specifický výtěžek metanu v hodnotě reflektuje kvalitu biomasy, jelikož nízký specifický výtěžek může značit i nízkou kvalitu biomasy, kdy z jejího velkého množství bylo získáno malé množství metanu (Amon et al. 2007a).

Výtěžek metanu na hektar byl ve středním Finsku o 50 % nižší než na jihu, kvůli kratší vegetační době a zároveň bylo dosaženo nižších výnosů sušiny. Naměřený výtěžek metanu na hektar se pohyboval od $2\,130$ do $9\,170 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Nejvyšší výnosy na hektar byly zjištěny u odrůd kukuřice Amara ($8\,270 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$), což bylo více než výnosy metanu u odrůd Francisco, Marcello, Amadeo, MAS09A a Cerruti v roce 2007. Výnosy metanu na hektar byly v roce 2007 v Piikkio vyšší než v roce 2008. Valdez měl vyšší výtěžek metanu na hektar ($5\,583 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$) ve srovnání s Amadeo, Ronaldinio a Amara v roce 2008 (Seppälä et al. 2012).

Schittenhelm (2008) prováděl své experimenty dva roky s pozdními hybridy kukuřice. Bylo zjištěno, že pozdní typ vykazoval nižší koncentraci tuků a bílkovin, ale vyšší koncentraci popela, detergentní vlákniny a ligninu ve srovnání se středně ranými hybridy.

Amon et al. (2007b) uvádějí, že maximální výtěžky metanu na hektar odrůd kukuřice s pozdním zráním se pohybovaly mezi $7\,100$ a $9\,000 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Rané a středně rané odrůdy přinesly při pěstování v příznivých oblastech $5\,300$ až $8\,500 \text{ m}^3.\text{ha}^{-1}$. Důležité je však podotknout, že tyto pokusy byly prováděny v Rakousku.

Kukuřice se střední raností (FAO 380 až 500) měla vyšší výtěžek biomasy a díky tomu poskytovala i vyšší výnos metanu na hektar než odrůdy pozdní. Nejvyšší hektarový výnos metanu měla odrůda s FAO 380 ($12\,390\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$). Na rozdíl od středně raných hybridů dosáhly pozdní hybridy k datu konečné sklizně jak maximálního specifického výtěžku metanu, tak maximálního výnosu metanu na hektar. Ukazuje se, že pozdní energetická kukuřice, která může plně využít vegetačního období, je vhodnější pro výrobu bioplynu za předpokladu, že koncentrace sušiny v celé rostlině je dostatečně vysoká, aby poskytla kvalitní siláž (Schittenhelm 2008).

Amon et al. (2007a) prováděli pokusy s hybridy Tonale, PR34G13 a LZM, všechny tyto hybridy byly pěstovány na stejném místě u města Haidershofen v Rakousku. U hybridů měřili specifický výtěžek metanu ($\text{l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$) a pozorovali rozdíly mezi termíny sklizně. U sledovaných odrůd se potvrdilo, že ve třetím termínu sklizně se u všech hybridů specifický výtěžek metanu výrazně snížil. Největší rozdíl mezi sklizněmi byl pozorován u hybridu PR34G13, kdy v první sklizni bylo naměřeno $366\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$, ve druhém termínu se hodnota snížila na $302\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$ a u třetí sklizně až na $268\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$.

Rath et al. (2013) stanovovali specifický výtěžek bioplynu rovněž pomocí batch testů. Své experimenty měřili v Německu po dva roky, v letech 2007 a 2008. V roce 2007 bylo testováno 49 genotypů kukuřice a v roce 2008 bylo testováno 42 genotypů kukuřice. Uvedený specifický výtěžek metanu pro siláž kukuřice byl v rozmezí od 195 do $700\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$. Výsledky hodnocené pomocí vícenásobné lineární regrese odhalily, že přispívajícími biochemickými složkami byly lipidy, hemicelulózy, lignin a ve vodě rozpustné sacharidy. Přičemž první dvě složky pozitivně korelovaly se specifickým výtěžkem bioplynu a poslední dvě vykazovaly negativní vztah k specifickému výtěžku bioplynu.

Rath et al. (2015) ve své studii porovnávali výsledky více autorů. Soubor validačních dat byl založen na experimentu s více místy, které poskytovaly velké genotypové variace v chemickém složení kukuřice. Hodnoty specifického výtěžku bioplynu, dosažené v batch testech, se pohybovaly mezi 612 a $826\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$. V průměru se však pohybovaly mezi 664 a $782\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$. Bioplyn byl charakterizován průměrným obsahem metanu $52,5\% \pm 1\%$. Střední hodnota specifického výtěžku metanu byla $373 \pm 28\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$. Obsah sušiny pro celou plodinu v testovaných vzorcích kolísal. Z první sklizně byl v průměru $31,7\%$ a při druhé sklizni dosahoval $34,2\%$. Obsah škrobu, jakožto hlavní složky buněčného obsahu v celé rostlině, se pro první sklizeň pohyboval okolo $37,3\%$ a v druhé sklizni dosahoval $33,9\%$. Analýza odhalila pozitivní vztahy mezi obsahem sušiny, škrobu, extrakty neobsahující dusík, enzymem rozpustné organické látky a metabolizovatelné energie. Méně těsný vztah byl zjištěn u tuku, zatímco negativní korelace se projeví u hrubé vlákniny.

Bruni et al. (2010) se zabývali studiem kukuřičné siláže a čerstvé kukuřice v Dánsku. Studie se zaměřovala na hodnocení využití čerstvé kukuřice na produkci výtěžku metanu. Autoři ve své studii použili 6 různě raných hybridů. Výnosový potenciál metanu byl stanoven za pomocí batch testů z celých rostlin. Pro účely studie byla kukuřice sklizena po 116 (časná sklizeň), 137 (střední sklizeň) a 157 dnech po setí (pozdní sklizeň). Všechny hodnocené hybridy měly odlišný obsah sušiny. Největší vliv na rozdílný obsah sušiny měla doba sklizně. Obecně vzato, obsah sušiny se zvyšoval s dozráváním kukuřice. Mezi zkoumanými hybridy nebyly v potenciálech metanu ($\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$) pozorovány významné rozdíly. Jedinou výjimkou byla odrůda Patrick, která vykazovala mírně rostoucí výtěžek metanu při různých dobách

sklizi (0,35±0,01, 0,35±0,01, 0,38±0,01 m³.kg⁻¹ OH při časném, středním a pozdním termínu sklizně). Výtěžek metanu z čerstvé hmoty kukuřice (m³.t⁻¹ čerstvé hmoty) vykazoval velké variace v závislosti na době sklizně. Výtěžek se zvýšil z 80±4 na 110±6 a 137±13 m³.t⁻¹ čerstvé hmoty na začátku, uprostřed a během pozdní sklizně (jedná se průměry výnosů čerstvé hmoty šesti hybridů). Čerstvá hmota kukuřice poskytla nejvyšší výtěžek metanu na hektar při pozdní sklizni, 6 270 m³.ha⁻¹. Nejvyššího výnosu metanu z čerstvé hmoty celé kukuřice bylo dosaženo při sklizni rostlin v pozdní fázi zralosti.

Zsubori et al. (2013) prováděli pokusy v Martonvásáru a testovali složení celých rostlin za období od roku 2010 do roku 2012, přičemž výroba bioplynu z hybridů byla zkoumána v letech 2009 a 2010. Autoři použili hybridy Limasil (FAO 380), Mv NK 333 (FAO 390), Mv Massil, Dumasil (FAO 390), Florencia (FAO 530), Mv 437 (FAO 480), Siloking (FAO 580) a Maxima (FAO 580). Hustota výsevu byla 80 000 rostlin na hektar. Největšího výtěžku sušiny dosáhla odrůda Siloking (28,27 t.ha⁻¹) a Maxima (28,18 t.ha⁻¹), přičemž u obou hybridů bylo sklizeno i největší množství čerstvé hmoty z testovaných odrůd. Autoři uvádějí, že obsah sušiny jednotlivých hybridů nebyl signifikantně ovlivněn rokem nebo genotypem. Rovněž platí, že později dozrávající hybridy neměly výrazně větší obsah rozložitelné sušiny než dříve dozrávající. Nejvyššího výnosu z rozložitelné sušiny dosáhl hybrid Siloking (19,18 t.ha⁻¹) a nejméně Mv 437 (16,49 t.ha⁻¹). Produkce bioplynu byla studována po dva roky a bylo zjištěno, že listové hybridy dosahovaly vyšších výnosů bioplynu anaerobní fermentací ze siláže (průměrně 640 l.kg⁻¹ sušiny) než konvenční hybridy (průměrně 606 l.kg⁻¹ sušiny). Nejvyššího výnosu bioplynu dosáhl hybrid Mv Massil (659 l.kg⁻¹ sušiny), přičemž měl i nejvyšší obsah škrobu (37,5 %) a ve vodě rozpustných sacharidů (5,6 %) (viz příloha D). Hlavním úkolem produkce bioplynu je dle autorů, dosažení vysoké koncentrace metanu v produktu po fermentaci. Kvalitní bioplyn obsahuje minimálně 60% podíl metanu. Nejvyšší koncentrace metanu dosahoval v roce 2010 hybrid Mv TC 437 (63,35 %) a v roce 2009 Limasil (63,13 %). Nicméně, nebyly odhaleny výrazné rozdíly mezi listovými a nelistovými hybridy z pohledu procentuálního zastoupení metanu ve výsledném produktu po fermentaci.

Zsubori et al. (2013) uvádějí, že výnos bioplynu závisí na chemickém složení biomasy. Nicméně nebyla zjištěna významná pozitivní nebo negativní korelace mezi chemickým složením biomasy a specifického metanového výnosu, což rozporuje závěry studie Schittenhelma (2008). Autoři uvádějí jako nejvýznamnější vliv, resp. existenci silné pozitivní korelace (0,61 pro listové a 0,59 pro nelistové hybridy) mezi výnosem bioplynu a procentuálním zastoupením škrobu v siláži. Středně silná, kladná korelace (0,41 pro listové a 0,31 pro nelistové hybridy) byla zjištěna mezi výnosem bioplynu a objemem vodorozpustných sacharidů. Na základně poznatků ze studií bylo zjištěno, že výnos bioplynu je negativně korelován s obsahem ligninu (-0,32 pro listové a -0,23 pro nelistové hybridy) a proteinu (-0,48 pro listové a -0,36 pro nelistové hybridy) v rostlině.

3.3.3 Hustota výsevu

Výnos biomasy kukuřice je určen počtem rostlin na jednotku pěstované plochy a hmotností jednotlivých rostlin. Je ovlivněn mnoha faktory, například volbou hybridu, podmínkami prostředí, intenzitou pěstování, hnojením, množstvím vláhy a zaplevelením

(Fuksa et al. 2017). Cílem studie Fuksy et al. (2020) bylo porovnat dvě různé hustoty výsevu rostlin kukuřice (90 000 a 130 000 rostlin.ha⁻¹), zda má vliv na výnos a produkci bioplynu či nikoliv. Autoři své pokusy prováděli v letech 2014 a 2015 na dvou místech ve Středočeském kraji České republiky. Z hodnocení vzájemného působení hustoty rostlin a podílu částí rostlin je patrné, že specifický výtěžek bioplynu palic a stonků nebyl hustotou rostlin významně ovlivněn, ale vzdálenost mezi rostlinami se zřetelně projevila morfologickým přizpůsobením rostlin, což bylo pozorováno zejména u palic.

Rostliny o standardní hustotě výsevu (90 000 rostlin.ha⁻¹) měly, ve srovnání s hustotou výsevu 130 000 rostlin na hektar, vyšší hmotnost. Vliv hustoty rostlin na výnos sušiny a hektarový výnos bioplynu nebyl významný. Vyšší hustota rostlin podporovala rychlejší dynamiku specifického výnosu bioplynu palic v obou letech a vyšší degradaci organické hmoty v roce 2014. Ve většině případů byl vyšší obsah metanu zjištěn ve vzorcích z výsevu o hodnotě 130 000 rostlin na jeden hektar. V roce 2014, vzorky pocházející z výsevu o hustotě 130 000 rostlin na hektar, ukázaly významně vyšší účinnost degradace organické hmoty, naproti tomu v roce 2015 nebyl zjištěn žádný účinek hustoty výsevu rostlin na výnos bioplynu. Vyhodnocení srovnání vlivu hustoty výsevu rostlin proti částem rostliny ukázalo, že výtěžnost bioplynu z palic, vyjádřená na hektar, nebyla hustotou rostlin významně ovlivněna (Fuksa et al. 2020).

3.3.4 Termín sklizně

Správný termín sklizně kukuřice pro energetické účely je určen kombinací výnosu sušiny z hektaru a maximálního výnosu metanu. Z pohledu celkové produkce bioplynu se Amon et al. (2003) a Schittenhelm (2008) shodují, že rané a polorané hybridy kukuřice je optimální sklízet ve fázi mléčně-voskové zralosti zrna. Co se týče pozdních hybridů kukuřice, je optimální termín sklizně ve fázi plné zralosti zrna.

Při produkci siláže hraje termín sklizně rovněž významnou roli. Pokud je sklizeň provedena příliš brzy, může docházet k tvorbě silážních šťáv způsobujících ztráty živin. Naopak pozdní termín sklizně způsobuje snížení výnosu, zvýšení obsahu sušiny a vláknitých frakcí, zvýšení nebezpečí plísní, jež způsobují nesprávný průběh procesu fermentace v kukuřičné siláži (Petříková 2006). Termín sklizně ovlivňuje obsah sušiny v rostlině, kdy její optimální rozsah se nacházel mezi 28–34 %. Uvedený obsah sušiny zajišťuje výnosové maximum rostlin, stabilitu siláže při její přípravě, vysokou degradaci siláže ve fermentoru a optimální průběh fermentace v zařízení pro výrobu bioplynu (Koutný 2008).

Amon et al. (2007a) zdůrazňují že, čas sklizně kukuřice je zásadní determinant vlivu na zisk metanu. Autoři prováděli pokusy s hybridem KWS 1393 o FAO 400, který byl sklizen postupně pětkrát v průběhu vegetačního období. Nejvyššího zisku biomasy a metanu na hektar bylo pozorováno 171 dnů po výsevu, ve vegetačním stádiu voskové zralosti, následně v období 186 dnů. Naopak nejvyššího specifického výtěžku metanu bylo dosaženo v období druhé a třetí sklizně (viz příloha C). Autoři dále prováděli pokusy s hybridy Tonale, PR34G13 a LZM, kdy všechny hybridy byly pěstovány na stejném místě u města Haidershofen v Rakousku. Na uvedených hybridech autoři měřili specifický výtěžek metanu a pozorovali rozdíly mezi sklizněmi. U všech hybridů bylo potvrzeno, že při třetím termínu sklizně se u všech hybridů specifický výtěžek metanu výrazně snížil. Největší rozdíl mezi sklizněmi byl

pozorován u hybridu PR34G13, kdy v první sklizni bylo měřeno $366 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$ a u druhé se tato hodnota snížila na $302 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$. U třetí sklizně vzrostl specifický výtěžek metanu až na $268 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$.

Schittenhelm (2008) prováděl své pokusy v letech 2004 a 2005 poblíž Braunschweigu v Německu. Autor ve svých výsledcích uvádí, že v prvním roce, mezi 124 a 180 dnem po zasetí, se průměrný výtěžek metanu u hybridů trvale zvyšoval z 311 na 369 l.kg^{-1} organické hmoty (OH). V roce 2005 se mezi 118 a 180 dnem po zasetí zvýšil z 309 na $342 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$.

Amon et al. (2007b) uvádějí, že u rostlin, které se blíží plné zralosti, klesá výtěžek metanu. U hybridů s pozdním zráním se výtěžky metanu pohybovaly mezi 312 a $365 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$ (mléčná zralost) a 268 až $286 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$ (plná zralost). Odrůdy s FAO 500, 550 a 600 byly v pokusech od autorů Amon et al. (2007a) sklizeny ve fázi mléčné zralosti zrna. Uprostřed voskové zralosti zrna byly sklizeny hybridy s FAO 380 a 560 a na konci voskové zralosti byl sklizen hybrid s FAO 500. Průměrný naměřený výtěžek metanu byl $398 \text{ l.kg}^{-1} \text{ OH}$. Mezi odrůdami kukuřice však nebyly žádné významné rozdíly.

3.3.5 Podíl jednotlivých částí rostliny

Palice je nejhodnotnější částí plodiny, nachází se v ní nejvyšší obsah rozložitelné organické hmoty, vyšší množství škrobu (okolo 90 %), ve vodě rozpustných sacharidů a tuku než v ostatních částech rostlin. Palice obsahuje nejnižší obsah ligninu a vlákniny, než je obsaženo ve zbytku rostliny. Podíl palic v substrátu velmi ovlivňuje celkovou výtěžnost bioplynu. Ve srovnání s celou rostlinou poskytují palice vyšší výtěžnost metanu (Amon et al. 2007b; Zsubori et al. 2013; Fuksa 2018). Fuksa (2018) uvádí, že podíl palic je dán hybridem kukuřice. Rané hybridy s kratší vegetační dobou se vyznačují vyšším podílem palic ke zbytku rostliny (i přes 60 %; vyjádřeno v sušině), ale celkový výnosový potenciál rostlin je oproti pozdějším hybridům nižší. Naopak, pozdní hybridy mohou v teplotně a půdně příznivých podmínkách dosahovat výrazně vyšších výnosů. Rostliny dorůstají vyšší výšky a dosahují vyšších hmotností oproti raným hybridům kukuřice. Faktorem je, že pozdější hybridy kukuřice obvykle dosahují nižšího podílu palic. Na množství a velikost palic má během růstu velký vliv také počasí a podmínky prostředí během růstu. Uvedené podmínky nicméně ovlivňují jak složení zrna i složení celého výchozího substrátu, který je určen k anaerobní digesti.

Nižší podíl palic ovlivňuje složení vstupního substrátu do anaerobní digestce a následně množství a kvalitu vyprodukovaného bioplynu. Klesající podíl škrobu a bílkovin, který je ve velké míře obsažen v palicích, způsobuje nižší kvalitu silážní hmoty. Proto na produkci kvalitní siláže nejsou vhodné rostliny s podílem palic pod 45 %. U rostlin s podílem palic pod zmíněné procento je podstatné, na kolik případně vyšší výnos biomasy při vyšších výsevcích kompenzuje pokles podílu palic, z hlediska celkové produkce bioplynu na jednotku plochy (Šuk a kol. 1998; Fuksa 2018). Brant et al. (2020) uvádějí, že na podíl palic a výnos sušiny má velmi patrný vliv efekt ročníku. Hmotnostní podíl palic na rostlině je výrazně vázán na konkrétní hybrid, ale nepříznivé podmínky prostředí jej mohou negativně ovlivnit.

Střední až vysoký podíl zrna v substrátu lze považovat za zásadní, s ohledem na požadavky na dosažení dostatečně vysokého obsahu sušiny, aby se zajistilo úspěšné silážování (Herrmann & Rath 2012).

Sušina palic se na celkové sušině kukuřice podílí 55–65 %. Dle Šuka et al. (1998) by v siláži měl podíl zrna dosahovat 40 % v mléčně voskové zralosti a ve zralosti voskové až plné zralosti minimálně 45 %. Fuksa et al. (2020) prováděli pokusy v letech 2014 a 2015. Vyšší výtěžek sušiny z palic, v porovnání se zbytkem rostliny, byl pozorován v obou sledovaných letech. Pro rok 2014 činil 11,8 t.ha⁻¹, v roce 2015 činil 7,1 t.ha⁻¹. Ve zbytku rostliny bylo v roce 2014 stanoveny 7,3 t.ha⁻¹ a 6,6 t.ha⁻¹ v roce 2015.

Celkový obsah dusíku (na základě sušiny) v různých částech kukuřice byl v průměru 7,5; 28,5 a 14,1 g.kg⁻¹ ve stoncích, v listech a v palicích. Když druhy kukuřice dorostly do sklizňové zralosti, celkový obsah dusíku poklesl v listech ($p < 0,05$) a zůstal stabilní ve stoncích a v palicích. Celkový obsah dusíku v různých částech rostlin se od sebe lišil v každé době setí a sklizně ($p < 0,05$). Průměrné zastoupení částí rostlin v obou termínech sklizně bylo hodně podobné, stonky činily 39 %, listy byly zastoupeny 15% podílem a 46% podíl z rostliny připadal na palice. Stanovená koncentrace sušiny ve stoncích byla v průměru 200 g.kg⁻¹ a během zrání rostlin se významně nezměnila. Celkové výnosy sušiny pro listy byly nejvyšší (833 g.kg⁻¹) ve druhé sklizni, kdy listy u země již stárnuly. Když palice vyzrály, obsah sušiny se zvýšil ze 172 na 297 g.kg⁻¹ (Seppälä et al. 2012).

3.3.6 Produkce bioplynu z jednotlivých částí rostlin

Fuksa et al. (2020) hodnotil palice a zbytek rostliny (listy a stéblo) vzhledem k produkci bioplynu zvlášť. Specifický výtěžek bioplynu z palic a stonků kukuřice byl hodnocen batch testy. V obou letech došlo k významně vyššímu výtěžku sušiny, degradaci organické hmoty a obsahu metanu v bioplynu z palice ve srovnání se zbytkem rostliny. Během batch testů palice produkovaly více bioplynu než zbytek rostliny, s výjimkou období od čtvrtého do jedenáctého dne, kdy byl specifický výtěžek bioplynu ze zbytku rostliny vyšší.

Specifický výtěžek bioplynu z palic byl výrazně vyšší, kdy se pohyboval od 5 039 do 8 962 m³.ha⁻¹ a výnos ze zbytku rostliny byl mezi 3 943 až 4 865 m³.ha⁻¹, z čehož vyplývá, že výtěžek bioplynu z palic byl 1,3–1,8 krát vyšší než ze zbytku rostliny. Vyšší výnosy bioplynu z hektaru, ve výši 8 962 m³.ha⁻¹ v roce 2014 a 5 039 m³.ha⁻¹ v roce 2015, byly získány z palic než ze zbytku rostliny. Ze zbytku rostliny bylo v roce 2014 získáno 4 865 m³.ha⁻¹ a v roce 2015 3 943 m³.ha⁻¹. Na začátku batch testů byl získán bioplyn ze zbytku rostliny s výrazně vyšším obsahem metanu. Specifický výtěžek bioplynu ze zbytku rostliny byl vyšší v první fázi (do čtvrtého dne). Po tomto bodu palice znovu produkovaly více bioplynu než zbytek rostliny. Stabilnějších výsledků bylo dosaženo při zpracování rostlin ve druhé fázi (do jedenáctého dne), kdy následně byl ze vzorků palic získán vyšší obsah metanu než ze zbytku rostliny. Nejnižší hodnoty byly stanoveny u všech vzorků třetí den trvání batch testů (Fuksa et al. 2020).

Specifické výtěžky metanu z jednotlivých částí rostlin se značně lišily. Stonky, listy a palice vyprodukovaly průměrně 372, 334 a 421 l.kg⁻¹ OH, pokud byly zahrnuty všechny doby sklizně a setí. Při zohlednění doby sklizně byly specifické výnosy metanu různých částí rostlin odlišné. Pozdnější doba sklizně zvýšila podíl na výtěžcích metanu palic z 35 % na 51 % a podíl výtěžku metanu stonků se snížil z 50 % na 36 %. Listy vyprodukovaly nejmenší množství metanu (15 % z celkového výnosu metanu na hektar). Pozdější sklizeň

vyprodukovala celkem více metanu na hektar ($7\,337\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$) než první sklizeň ($6\,440\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$). Odrůdy kukuřice v Piikkio produkovaly v obou kultivačních letech dvojnásobné množství metanu na hektar než odrůdy kukuřice v Laukaa ($p < 0,05$). Specifické výtěžky metanu se pohybovaly od 366 do $491\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$ v roce 2007 a od 296 do $373\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$ v roce 2008. Pěstování kukuřice pro výrobu bioplynu se zdá být proveditelné pouze v jižním Finsku a to díky příznivým ziskům metanu. Naproti tomu ve středním Finsku byly výsledky výrazně nižší a ekonomicky nerentabilní (Seppälä et al. 2012).

3.3.7 Řezanka kukuřice

Velikost řezanky má přímý dopad na kvalitu siláže. Při výrobě siláže se obvykle využívá velikost řezanky v rozmezí 4–8 mm. Velikost částic řezanky ovlivňuje množství výtěžku metanu z jednotky biomasy. Zpracování substrátu na menší velikost částic má pozitivní vliv na produkci metanu. Zmenšením částic řezanky sklizené kukuřice na 4 mm docílíme zvýšení specifického výtěžku metanu okolo 10 %. Větší povrch jemnějšího substrátu je pro bakterie lépe přístupný, a tím i lépe zpracovatelný (Weiss & Brückner 2008; Herrmann 2010; Herrmann & Rath 2012; Rath et al. 2015). Velikost řezanky nad 20 mm se vzhledem k negativnímu vlivu na výtěžek metanu z tohoto substrátu nedoporučuje (Herrmann 2010).

Bruni et al. (2010) zjistili, že mechanické předzpracování kukuřice může zvýšit výtěžek metanu o $0,04 \pm 0,01\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$. Metanový potenciál kukuřičné siláže vyrobené z velkých částic byl $0,37 \pm 0,01\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$ (bez zmenšení velikosti) a $0,41 \pm 0,01\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\text{ OH}$ pro kukuřičnou siláž z malých částic. Během prvních deseti dnů inkubace byla pozorována pomalá rychlost degradace a velikost částic nevykazovala žádný vliv na kinetiku konverze. Po této počáteční fázi se rychlost degradace zvýšila a kukuřičná siláž z malých částic vykazovala vyšší kinetiku přeměny. Konečných výtěžků metanu bylo dosaženo přibližně po čtyřech týdnech inkubace.

3.3.8 Silážování

Cílem procesu silážování je snížení pH rostlinného materiálu na optimální hodnotu pro mikroorganismy (Herrmann et al. 2016). Kukuřice patří mezi snadno silážovatelné plodiny. Silážování, jakožto proces konzervace biomasy kukuřice, zvyšuje výtěžnost bioplynu oproti čerstvé hmotě až o 25 %. Také tvorbu bioplynu zrychluje a má za následek vyšší obsah metanu v bioplynu během prvních deseti dnů fermentace. Během procesu silážování se snadno rozložitelné sacharidy v substrátu přeměňují na organické kyseliny. S uvedenou přeměnou je spjata i ztráta sušiny (Amon et al. 2007b; Herrmann & Rath 2012).

Během silážování vzniká řada látek: kyselina mléčná, kyselina octová, kyselina mravenčí a alkoholy, jež jsou důležité pro další technologický postup (Amon et al. 2007b; Fuksa 2018). V procesu silážování má významný dopad, na specifický výtěžek metanu a odhad metanu v siláži, akumulace kyseliny máselné a alkoholů. Akumulace uvedených látek má pozitivní vliv na fermentaci siláže a může zvyšovat obsah metanu ve vyrobeném produktu bioplynové stanice. Pozitivní účinek se ztrácí při vysokých koncentracích kyseliny octové, kyseliny máselné a etanolu (Schittenhelm 2008; Herrmann et al. 2011; Herrmann et al. 2016).

Kyselina máselná, vyšší těkavé mastné kyseliny a alkoholy jsou spojeny s vysokými teoretickými výtěžky metanu na základě jejich elementárního složení (Herrmann et al. 2011).

Při procesu silážování se mění koncentrace živin obsažených v čerstvé kukuřici. Seppälä et al. (2013) ve své studii uvádějí, že čerstvá kukuřice obsahovala 534 mg síry v kilogramu sušiny a procesem silážování se tato hodnota změnila na 990 mg síry v kilogramu sušiny, tj. nárůst o 85 %. Síra s fosforem, byly jediné dva zkoumané prvky, jejichž objem se po procesu silážování zvýšil. Dané studie exaktně neuvádí, čím je změna způsobena. U ostatních zkoumaných prvků (hořčík, draslík, sodík, železo a vápník) se objem v kilogramu sušiny snížil. Nejvýraznější pokles byl u draslíku, kdy čerstvá kukuřice obsahoval 19 327 mg v kilogramu sušiny, nicméně po siláži se objem snížil na 8 000 mg v kilogramu sušiny, tj. pokles o 59 %.

4 Závěr

Bioplyn v České republice se od roku 2014 drží v první pětici nejvýznamnějších zdrojů obnovitelné energie. Kukuřice se stala v současné době nejvyužívanější hospodářskou plodinou pro produkci bioplynu, a to díky svému vysokému výnosu biomasy, který je dobře rozložitelný bakteriemi v procesu anaerobní digesce. Celková produkce bioplynu závisí především na výnosu sušiny kukuřice, je známé, že kvalita biomasy je významným příspěvkem k celkové produkci bioplynu a vyššímu obsahu metanu ze substrátu. Kvalita a množství bioplynu je ovlivněna mnoha faktory, přičemž některé lze ovlivnit správnou volbou. Naproti tomu, zbylé faktory pěstitel nemá možnost ovlivnit, tím je například průběh počasí. Ze studií vyplývá, že některé faktory mají na množství a kvalitu bioplynu významnější vliv a některé menší.

Agrotechnika sama o sobě má velmi významný vliv pro pěstování všech zemědělských plodin. Správnou agrotechnikou lze docílit omezení škůdců a chorob, které mohou napadnout rostliny kukuřice, a tím snížit výnos biomasy. Dále je důležité dbát na regulaci plevelů, které mohou při extrémním zaplevelení snížit výnos až o 90 %.

Využití kukuřice seté za účelem výroby siláže, je spojeno se značným narušením bilance organické hmoty v půdě, celé rostliny se odváží z pozemku, je tedy nutné myslet na dodávání živin do půdy.

Vše začíná již předseťovou přípravou půdy, která je potřebná pro správný růst, vývoj a rozvoj kořenového systému a celé rostliny. Aby osivo po zasetí optimálně vyklíčilo, je důležité hlídat teplotu půdy, která by se měla pohybovat kolem 8–10°C v hloubce půdy 50 mm. Kukuřice setá je citlivá na chladné počasí, zpozdí-li se termín zasetí, výnos biomasy se zpravidla sníží minimálně o 15 %.

Bylo zjištěno, že hustota výsevu nemá významný vliv na výtěžnost bioplynu. Menší vzdálenost rostlin mezi sebou se projevila morfologickým přizpůsobením rostlin, což bylo pozorováno zejména sníženým podílem palice.

Výběr hybridu je hlavním faktorem, který ovlivňuje množství a kvalitu vypěstované biomasy, která následně putuje do bioplynové stanice. V České republice jsou nejvíce využívané hybridy kukuřice pro následné zpracování na siláž s číslem FAO od 220 do 260, nazývané rané hybridy. Dále je důležité respektovat specifický vliv geografických a klimatických podmínek na jednotlivé hybridy, ve kterých jsou pěstovány.

Z pohledu celkové produkce bioplynu, má také významný vliv termín sklizně. Hybridy kukuřice je optimální sklízet ve fázi mléčně-voskové zralosti zrna, kdy dosahují nejvýznamnějších výtěžků metanu. Termín sklizně ovlivňuje obsah sušiny, obecně vzato platí, že obsah sušiny se zvyšuje s dozráváním kukuřice.

Analýzy substrátů do bioplynové stanice odhalily pozitivní vztahy mezi obsahem sušiny, škrobu, extrakty neobsahující dusík, enzymy rozpustnými organickými látkami a metabolizovatelnou energií na produkci bioplynu. Méně těsný vztah byl zjištěn u lipidů. Lipidy však mají dvojnásobný metanový potenciál než sacharidy. Negativní korelace se projevila u rozpustných sacharidů a ligninu, kdy produkce metanu na jednotku biomasy klesá se zvyšujícím se obsahem ligninu a vláknitých frakcí.

Palice jsou nejhodnotnější částí plodiny, protože se v nich nachází výrazně vyšší množství škrobu, sacharidů a tuku než v ostatních částech rostlin. Palice také obsahují

nejnižší podíl ligninu, který však ve velkém množství působí problémy při výrobě bioplynu. Z látek obsahující dostatečné množství tuků se vyrobí více metanu než z látek bohatých na bílkoviny a sacharidy

Na produkci kvalitní siláže jsou vhodné rostliny s podílem palic nad 45 %. Vyšší výtěžky bioplynu z hektaru byly získány z palic než ze zbytku rostliny. Palice obsahují vysoký obsah sušiny z celkového podílu sušiny z celé rostliny kukuřice.

Pro zvýšení výtěžku metanu z kukuřice, lze zmenšit velikost řezanky. Zvětšený povrch jemnějšího substrátu je pro bakterie lépe přístupný, a tím i lépe zpracovatelný. Proces silážování konzervuje biomasu kukuřice a zvyšuje výtěžnost bioplynu oproti čerstvé hmotě až o 25 %. Pozitivní vliv na proces fermentace i na specifický výtěžek metanu má akumulace kyseliny máselné a alkoholů.

Z přehledu literatury vyplývá, že kvalita biomasy silážní kukuřice má na produkci bioplynu významný vliv. Na rozdíl od krmného využití silážní kukuřice, však není dosud vypracován ucelený systém hodnocení kvality kukuřičné biomasy pro bioplynové účely. Je zřejmé, že je zapotřebí dalšího výzkumu na řadě území s ohledem na velké rozdíly v podmínkách prostředí.

5 Literatura

- Amon T, Amon B, Kryvoruchko V, Zollitsch W, Mayer K, Gruber L. 2007b. Biogas production from maize and dairy cattle manure - Influence of biomass composition on the methane yield. *Agriculture, Ecosystems & environment* **118**(1-4):173-182.
- Amon T, et al. 2007a. Methane production through anaerobic digestion of variol energy crops grown in sustainable crop rotations. *Bioresource Technology* **98**:3204-3212.
- Amon Th, Kryvoruchko V, Amon B, Zollitsch, W, Mayer K, Buga S, Amid A. 2003. Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von fruh- bis spatreifen Maissorten. Bericht über die 54. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute. Österreichs.
- Balík J, Černý J, Tlustoš P. 2001. Principy hnojení kukuřice. Profi Press, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/principy-hnojeni-kukurice/> (accessed March 2021).
- Börjesson P, Mattiasson B. 2008. Biogas as a resource – efficient vehicle fuel. *Trends Biotechnol.* **26**(1):7-13.
- Brant V, Fuksa P, Josef Hakl J, Jursík M, Kroulík M, Prokinová E, Škeříková M, Šmöger J, Zábranský P. 2020. Efektivní hospodaření s vodou a eliminace degradace půdy v pěstebních systémech kukuřice seté. Praha: Agrární komora České republiky. ISBN 978-80-88351-13-9.
- Brhel O. 2010. Metody výpočtu produkce bioplynu v bioplynových stanicích [bakalářská práce]. Mendelova univerzita v Brně, Česká republika.
- Bruni E, Jensen AP, Pedersen ES, Angelidaki I. 2010. Anaerobic digestion of maize focusing on variety, harvest time and pretreatment. *Applied Energy* **87**: 2212-2217.
- Česká bioplynová asociace. 2021a. Česká bioplynová asociace, České Budějovice. Available from <http://www.czba.cz/> (accessed February 2021).
- Česká bioplynová asociace. 2021b. Mapa bioplynových stanic. Česká bioplynová asociace, České Budějovice. Available from <http://www.czba.cz/> (accessed February 2021).
- Český statistický úřad. 2021. Plocha, hektarový výnos a sklizeň vybraných zemědělských plodin. Český statistický úřad, Praha. Available from <https://www.czso.cz/> (accessed April 2021).
- Demirel B. 2013. Major pathway of methane formation from energy crops in agricultural biogas digesters. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* **44**:199-222.
- Dobre P, Nicolae F, Matei F. 2014. Main factors affecting biogas production – an overview. *Romanian Biotechnological Letters* **19**: 9283-9296.
- Dohányos M, Zábranská J, Jeníček P. 1996. Anaerobní technologie v ochraně životního prostředí. Praha: Ministerstvo životního prostředí ČR. ISBN 80-85368-90-0.

- Dohányos M. 2009. Zvyšování efektivity fermentace - nejnovější poznatky ve výzkumu a praxi. CZ Biom - České sdružení pro biomasu, Praha. Available from: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zvysovani-efektivita-fermentace-nejnovejsi-poznatky-ve-vyzkumu-a-praxi> (accessed March 2021).
- Energetický a regulační úřad (ERÚ). 2020. Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2019. Energetický a regulační úřad, Praha. Available from https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc (accessed April 2021).
- Fuksa P, Hakl J, Šantrůček J. 2017. Vliv hybridu a výsevu na výnos silážní kukuřice. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/osivo-a-sadba-1/vliv-hybridu-a-vysevu-na-vynos-silazni-kukurice> (accessed March 2021).
- Fuksa P, Hakl J, Míchal P, Hrevušová Z, Šantrůček J, Tlustoš P. 2020. Effect of silage maize plant density and plant parts on biogas production and composition. *Biomass and Bioenergy* **142**: 105770.
- Fuksa P, Kalista J. 2006. Výběr hybridů kukuřice v roce. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/osivo-a-sadba-1/vyber-hybridu-kukurice-v-roce-2006> (accessed December 2020).
- Fuksa P. 2018. Vliv organizace porostu silážní kukuřice na produkci bioplynu. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. **13**(7): 99-103.
- Herrmann A, Rath J. 2012. Biogas production from maize: Current state, challenges and prospects. 1. Methane yield potential. *Bioenergy Research* **5**:1027-1042.
- Herrmann A. 2013. Biogas production from maize: Current state, challenges and prospects. 2. Agronomic and environmental aspects. *Bioenergy Research* **6**:372-387.
- Herrmann C, Heiermann M, Idler C. 2011. Effects of ensiling, silage additives and storage period on methane formation of biogas crops. *Bioresource Technology* **102**(8): 5153-5161.
- Herrmann C, Idler C, Heiermann M. 2016. Biogas crops grown in energy crop rotations: Linking chemical composition and methane production characteristics. *Bioresource Technology* **206**:23-35.
- Herrmann C. 2010. Ernte und Silierungspflanzlicher Substrate für die Biomethanisierungsprozessgrundlagen und Bewertung [Doctoral thesis]. Humboldt-Universität Berlin, Germany.
- Honsová H. 2013. Pěstování kukuřice na výrobu bioplynu. Praha: CZ Biom - České sdružení pro biomasu. ISSN: 1801-2655.
- House H. 2007. Alternative energy sources – biogas production. Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs, Ontario. Available from

http://www.energybc.ca/cache/biofuels/www.londonswineconference.ca/proceedings/2007/LSC2007_HHouse.pdf (accessed December 2020).

- Hrouda L. 2010. Trávy a jejich příbuzní napříč biotopy I. Systematika, fylogeneze, morfologie. *Živa* **1/2010**: Available from <https://ziva.avcr.cz/files/ziva/pdf/travy-a-jejich-pribuzni-napric-biotopy-i-systemati.pdf> (accessed March 2021).
- Jelínek A. 2001. Hospodaření a manipulace s odpady ze zemědělství a venkovských sídel. Praha: Agrospoj. ISBN 80-239-4234-4.
- Jirmanová J, Fuksa P, Hakl J, Brant V, Šantrůček J. 2016. Effect of different plant arrangements on maize morphology and forage quality. *Pol'nohospodárstvo*: Available from <https://doi.org/10.1515/agri-2016-0007> (accessed March 2021).
- Jursík M, Soukup J. 2019. Nové strategie v regulaci plevelů v kukuřici, *Agromanuál*. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/plevele/nove-strategie-v-regulaci-plevelu-v-kukurici> (accessed April 2021).
- Kajan M, Lhotský R. 2006. Možností zvýšení výroby bioplynu na stávajících zařízeních. ENKI, Třeboň. Available from <https://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf> (accessed April 2021).
- Kazda J, Mikulka J, Prokinová E. 2010. Encyklopedie ochrany rostlin: polní plodiny. Praha: Profi Press. ISBN 978-80-86726-34-2.
- Kintl A. 2019. Kukuřice až na prvním místě, *Agromanuál*. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/kukurice-az-na-prvnim-miste> (accessed January 2021).
- Koutný T. 2008. Metody laboratorních kvanti-kvalitativních analýz bioplynových transformací [bakalářská práce]. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita Brno, Česká republika.
- Kratochvílová Z, Habart J, Sladký V, Jelínek F, Rosenberg T, Stupavský V, Dvořáček T. 2009. Průvodce výrobou a využitím bioplynu. CZ Biom - České sdružení pro biomasu, Praha. Available from https://www.mpoefekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobu_vyuzitim_bioplynu_2.pdf (accessed December 2020).
- Kusá H, Růžek P, Vavera R. 2019. Využití digestátu při hnojení kukuřice. *Agromanuál*. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vyuziti-digestatu-pri-hnojeni-kukurice> (accessed March 2021).
- Legend Seeds. 2021. Legend Seeds. De Smet. Available from <https://legendseeds.net/products/silage-corn> (accessed April 2021).
- Nedělník J, Strejčková M. 2019. Hodnocení kvality kukuřičné siláže a zrna z hlediska obsahu mykotoxinů. *Agromanuál*. Kurent, České Budějovice. Available from

- <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/choroby/hodnoceni-kvality-kukuricne-silaze-a-zrna-z-hlediska-obsahu-mykotoxinu> (accessed February 2021).
- Petríková V. 2006. Energetické plodiny. 1. vydání. Praha: Profi Press. ISBN 80-86726-13-4.
- Prokeš K. 2001. Zakládáme porosty kukuřice. Profi Press, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/zakladame-porosty-kukurice/> (accessed January 2021).
- Rath J, Heuwinke H, Taube F, Herrmann A. 2015. Predicting specific biogas yield of maize-validation of different model approaches. *Bioenergy Research* **8**:832-842.
- Rath J, Heuwinkel H, Herrmann A. 2013. Specific biogas yield of maize can be predicted by the interaction of four biochemical constituents. *Bioenergy Research* **6**:939-952.
- Řeňč J. 2015. Setí, základ úspěchu pěstování kukuřice. Profi Press, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/seti-zaklad-uspechu-pestovani-kukurice/> (accessed March 2021).
- Scarlat N, Dallemand JF, Fahl F. 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy* **129**:457-472.
- Seppälä M, Pyykkönen V, Laine A, Rintala J. 2012. Methane production from maize in Finland – Screening for different maize varieties and plant parts. *Biomass and Bioenergy* **46**: 282-290.
- Seppälä M, Pyykkönen V, Väisänen A, Rintala J. 2013. Biomethane production from maize and liquid cow manure – Effect of share of maize, post-methanation potential and digestate characteristics. *Fuel* **107**:209-216.
- 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: *Biogas – Praxis*. Rastede: ökobuch Verlag GmbH. ISBN 80-86167-21-3.
- Smutný V, Šedek A. 2017. Úzkořádková technologie pěstování kukuřice na siláž. *Agromanuál. Kurent, České Budějovice*. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/technologie/uzkoradkova-technologie-pestovani-kukurice-na-silaz> (accessed February 2021).
- Straka F, Dohányos M, Zábranská J, Jeníček P, Dědek J, Malijevský A, Novák J, Oldřich J, Kunčarová M. 2006. *Bioplyn [příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových stanic]*. Praha: GAS s.r.o. ISBN: 80-7328-090-6.
- Šuk J, Balík J, Jakobe P, Jambor V, Kohout V, Loučka R, Táborský V, Vrzal J. 1998. *Kukuřice*. Kněževes: VP Agro. ISBN 80-86153-99-1.
- Tippl M, Janeček M, Bohuslávěk J. 2001. Protierozní agrotechnika zlepšuje půdní vlastnosti a chrání půdu před erozí. Profi Press, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/protierozni-agrotechnika-zlepsuje-pudni-vlastnosti-a-chrani-pudu-pred-erozi/> (accessed February 2021).

- Tomášek J, Cihlář P. 2018. Porovnání různých způsobů výživy a podpurných přípravků u kukuřice. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/listova-hnojiva/porovnaní-různych-zpusobu-vyzivy-a-podpurnych-pripravku-u-kukurice> (accessed December 2020).
- Tóth P, Kmoch M. 2016. Významné choroby kukuřice. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/ochrana-rostlin-a-pestovani/choroby/vyznamne-choroby-kukurice> (accessed February 2021).
- Tyrolová Y. 2021. Co ovlivňuje kvalitu kukuřice pro siláž. Agromanuál. Kurent, České Budějovice. Available from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/sklizen-a-skladovani/sklizen-1/co-ovlivnuje-kvalitu-kukurice-pro-silaz> (accessed March 2021).
- Valíček P, et al. 2002. Užitkové rostliny tropů a subtropů. Praha: Academia Praha: 87-88, ISBN: 80-200-0939-6.
- Vaněk V, Balík J, Pavlík M, Pavlíková D, Tlustoš P. 2016. Výživa a hnojení polních plodin. Praha: Profi Press, ISBN 978-80-86726-79-3.
- Venclová B. 2020. Možnosti herbicidní regulace plevelů v kukuřici. Profi Press, Praha. Available from <https://www.uroda.cz/moznosti-herbicidni-regulace-plevelu-v-kukurici/> (accessed April 2021).
- Weiss D, Brückner C. 2008. Aufarbeitung landwirtschaftlicher Biomasse für den Vergärungsprozess. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 19/2008. Available from <http://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/14185/documents/16740> (accessed December 2020).
- Weissbach F, Strubelt C. 2008. Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Maissilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik **63**:354–355.
- Zimolka J, et al. 2008. Kukuřice: hlavní a alternativní užitkové směry. Praha: Profi Press, ISBN 978-80-86726-31-1.
- Zsubori ZT, Pintér J, Spitkó T, Hegyi Z, Martone CL. 2013. Yield and chemical composition of plant parts of silage maize (*Zea mays* L) hybrids and their interest for biogas production. Martonvásár: Agricultural Institute, Centre for Agricultural Research, Hungarian Academy of Sciences. ISSN: 2279-8013.

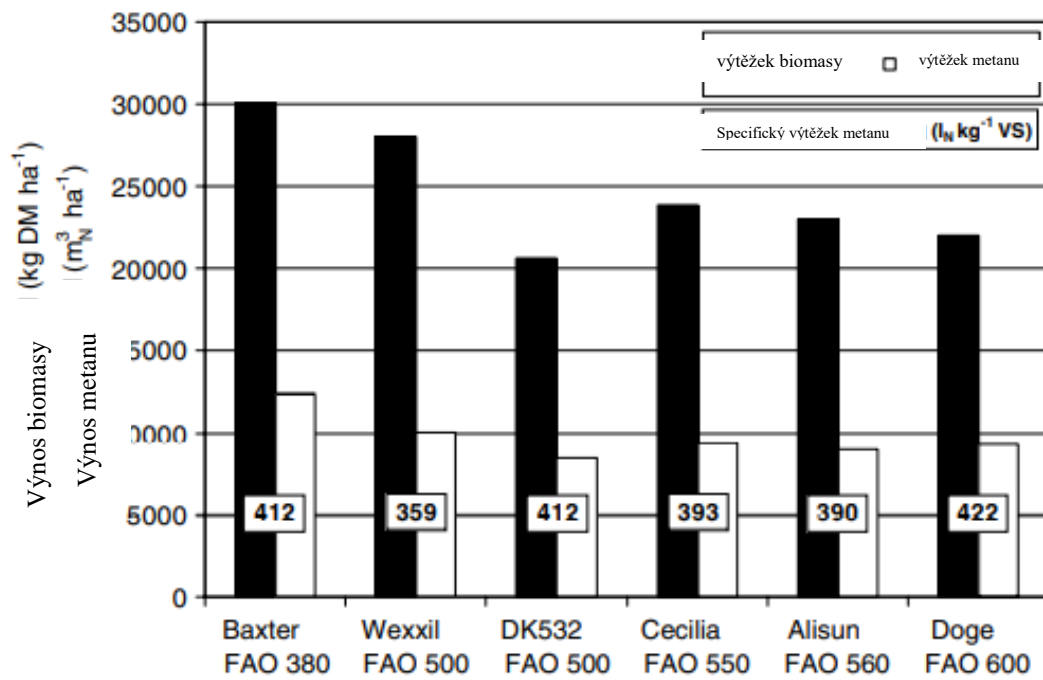
Samostatné přílohy

Příloha A: Změna zastoupení jednotlivých skupin ranosti hybridů kukuřice na siláž a na zrno

skupina ranosti	hybridy na siláž				hybridy na zrno			
	číslo FAO	rok			číslo FAO	rok		
		2002	2008	2018		2002	2008	2018
		%				%		
velmi rané	do 220	26	23	13	do 250	33	32	32
rané	220-260	54	54	53	250-300	45	43	46
středně rané	260-300	13	12	25	300-350	13	11	14
středně pozdní	nad 300	7	11	9	nad 350	9	14	8
celkem		100	100	100		100	100	100

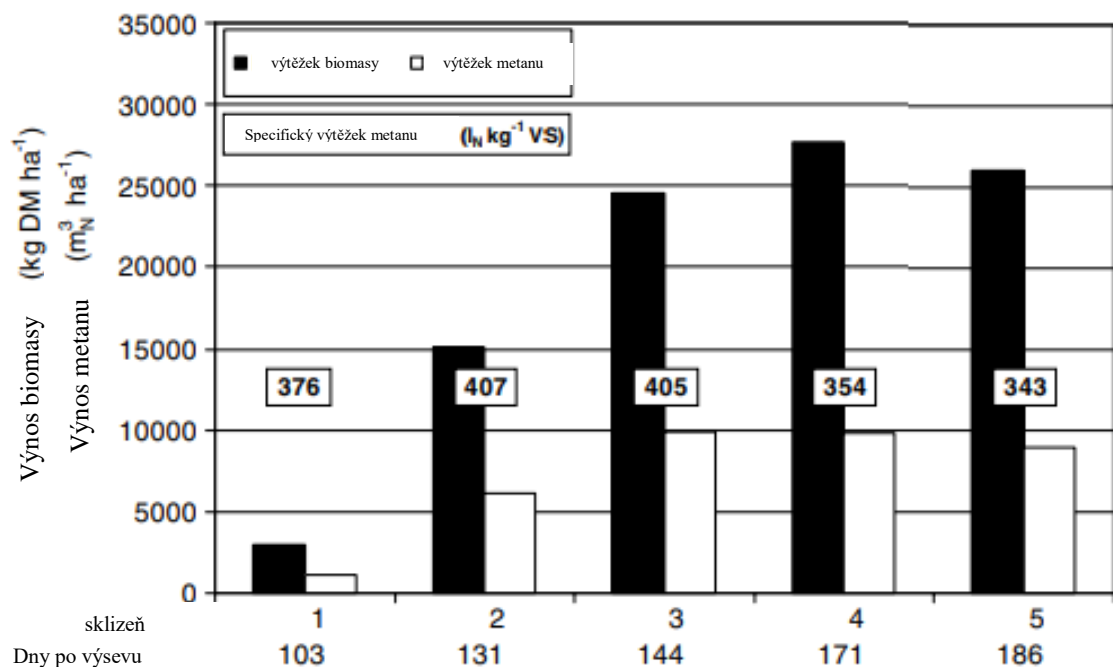
Zdroj: Brant et al. 2020

Příloha B: Výnosy biomasy a metanu z různých hybridů kukuřice



Zdroj: Amon et al. 2007a

Příloha C: Výnosy biomasy a metanu v závislosti na době sklizně kukuřice



Zdroj: Amon et al. 2007a

Příloha D: Složení testovaných hybridů kukuřice a jejich výnos bioplynu

Nelistové hybridy	Bioplyn [l.kg ⁻¹ sušiny]	Škrob [%]	Protein [%]	Lignin [%]	Vláknina s neutrálním pH [%]	Ve vodě rozpustné sacharidy [%]
MvMaros	601,50	36,56	8,80	4,44	53,60	5,41
MvNK	546,00	32,93	9,70	4,24	53,40	5,48
MvTC	633,00	34,33	8,50	4,15	54,48	5,36
Maxima	642,50	35,60	9,70	4,23	53,00	5,75
Průměr	605,75	34,86	9,18	4,27	53,62	5,50
Korelace		0,59	-0,36	-0,23	0,17	0,31

Listové hybridy	Bioplyn [l.kg ⁻¹ sušiny]	Škrob [%]	Protein [%]	Lignin [%]	Vláknina s neutrálním pH [%]	Ve vodě rozpustné sacharidy [%]
Limasil	629,50	36,18	8,90	4,27	54,75	5,04
Dunasil	630,50	36,50	9,49	4,02	54,80	5,57
Mv Siloking	640,50	35,40	8,82	4,21	53,17	5,95
Mv Massil	659,00	37,50	8,87	4,07	55,36	5,60
Průměr	639,88	36,40	9,02	4,14	54,52	5,54
Korelace		0,61	-0,48	-0,32	0,26	0,41

Zdroj: vlastní zpracování na základě Zsubori et al. 2013