

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Návrh technologie pro koncové využití bioplynu  
v bioplynové stanici Krásná Hora**

Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Maláček, Ph.D.

Autor: Bc. Ondřej Sirotek

PRAHA 2020

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Ondřej Sirotek

Technologická zařízení staveb

Název práce

**Návrh technologie pro koncové využití bioplynu v bioplynové stanici Krásná Hora**

Název anglicky

**Design of technology for biogas end-use in biogas station Krásná Hora**

---

### Cíle práce

Cíle diplomové práce vycházejí z literární rešerše současné problematiky technologických zařízení pro zpracování biologicky rozložitelných odpadů v provozech bioplynových stanic. Hlavním cílem práce je návrh technologie pro koncové využití bioplynu. K tomuto cíli předcházejí dílčí cíle jako je analýza technických zařízení pro zpracování vedlejších produktů rostlinné a živočišné produkce a vlastností těchto surovin. Analýza kvantity a kvality bioplynu s následným návrhem možností jejich využití. Analýza současných technologií pro koncové využití bioplynu pro pohon motorových vozidel. Metodický postup práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců vstupních a finálních produktů, charakteristiky legislativy v dané oblasti hospodářství, popis a návrh technologie a techniky vhodné k využití bioplynu v bioplynové stanici pro pohon motorových vozidel.

Praktická část práce zahrnuje analýzu technických zařízení pro koncové využití bioplynu. Popis stávající technologie využívané ve stávajícím provozu bioplynové stanice a následný návrh technologie s ekonomickým posouzením. Student vypracuje posouzení návrhu s ohledem na fyzikálně-chemické vlastnosti bioplynu v bioplynové stanici Krásná Hora.

### Metodika

Diplomová práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Výchozí podmínky řešení
5. Návrh řešení a dosažené výsledky
6. Diskuse a závěry
7. Seznam literatury
8. Přílohy

**Doporučený rozsah práce**

50 – 60

**Klíčová slova**

biomasa, fermentor, bioplyn, kogenerační jednotka

---

**Doporučené zdroje informací**

Juchelková, D.; Fibinger, V.; Mika, J.: Metody nakládání s odpady. 1. vydání. Ostrava: VŠB TU Ostrava, 1996. 62 s. ISBN 80-7078-309-5

Juchelková, D.: Likvidace a využití odpadů. Ostrava, VŠB TU Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-747-3

Malaťák, J.; Vaculík, P.: Zpracování biologicky rozložitelných odpadů. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 168 s., ISBN: 978-80-213-1747-5

Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5

Směrnice Evropského Parlamentu a Rady 2009/28/EC o podpoře užívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES. Štrasburk, 23.4.2009 (OR. en)

Straka, F.; a kolektiv.: Bioplyn. GAS s.r.o., Říčany 2003, s. 517, ISBN 80-7328-029-9

---

**Předběžný termín obhajoby**

2019/2020 LS – TF

**Vedoucí práce**

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 7. 1. 2019

**doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 04. 10. 2019

---

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Návrh technologie pro koncové využití bioplynu v bioplynové stanici Krásná Hora vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

V Praze dne.....

.....  
Ondřej Sirotek

## Poděkování

Rád bych zde poděkoval všem, kteří mi poskytli informace a pomoc při vypracování této diplomové práce. Zejména děkuji doc. Ing. Janu Malatřákovi, Ph.D., z Katedry technologických zařízení staveb České zemědělské univerzity v Praze, za odborné konzultace, připomínky a cenné rady v průběhu psaní této práce. Také děkuji panu Ing. Jiřímu Švastalovi a Ladislavu Žákovi z bioplynové stanice Krásná Hora, za poskytnutí podkladů k vypracování praktické části.

**Abstrakt:** Tato diplomová práce seznamuje s problematikou bioplynových stanic a zpracování biologicky rozložitelného odpadu za pomoci metody anaerobní fermentace. První dvě kapitoly se věnují obecnému úvodu a samotným cílům, kterých se tato práce snaží dosáhnout. V následující části jsou čtenáři představeny nejdůležitější legislativní předpisy platné v České republice a v Evropské unii, charakteristika a proces vzniku biomasy, metoda zpracování biologicky rozložitelných materiálů pomocí anaerobní fermentace a v závěru jsou uvedeny technologické a technické prvky, používané v provozech zemědělských bioplynových stanic. Nechybí ani popis bioplynu a metody jeho čištění na čistotu zemního plynu. V praktické části, které jsou věnovány čtvrtá a pátá kapitola, je uvedeno krátké seznámení s vybranou bioplynovou stanicí v Krásné Hoře nad Vltavou. Zásadním oddílem této části práce je návrh technologického zařízení na nový způsob zpracování bioplynu, v případě této práce se jedná o inovaci v podobě zařízení na čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu a následné stlačování a čerpání do dopravních prostředků. Vyčištění spočívá v odstranění nežádoucích příměsí z bioplynu, po kterém vznikne biometan o čistotě minimálně 96 %. Vyčištěním dojde také ke zvýšení výhřevnosti z  $21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ , kterou má bioplyn o čistotě 51,9 %, až na hodnotu  $34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ , která je specifická právě pro zemní plyn. V rámci výběrového řízení na pak vybrána technologie na čištění a stlačování od firmy Farmtec, a to za cenu 12 120 000 Kč. Na závěr je navržená inovace ekonomicky zhodnocena, a to s kladným výsledkem.

**Klíčová slova:** biomasa, fermentor, bioplyn, kogenerační jednotka

**Summary:** This diploma thesis introduces the problems of biogas plants and the processing of biodegradable waste using the anaerobic fermentation method. The first two chapters are devoted to the general introduction and the aims that this work seeks to achieve. The following section introduces the most important legislative regulations valid in the Czech republic and the European Union, characterization and process of biomass generation, method of processing of biodegradable materials by anaerobic fermentation and the technological and technical elements used in agricultural biogas plants. The i also a description of biogas and methods of its purification to the purity of natural gas. In the practical part, which are devoted to the fourth and fifth chapters, there is a brief introduction to the selected biogas plant in Krásná Hora nad Vltavou. The fundamental section of this part is the design of technological equipment for a new way of biogas processing, in the case of this work it is an innovation in the form of biogas purification equipment for natural gas quality and subsequent compression and pumping into vehicles. The cleaning consists in removing undesirable impurities from the biogas, after which the biomethane with a purity of at least 96% is produced. The cleaning will also increase the calorific value from  $21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ , which has a biogas with a purity of 51.9%, up to the value of  $34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ , which is specific to natural gas. Farmtec's cleaning and compression technology was selected for the price of CZK 12,120,000. In conclusion, the proposed Innovation is economically evaluated, with a positive result.

**Key words:** biomass, fermenter, biogas, cogeneration unit

## Obsah

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Úvod .....   | 1  |
| 2     | Cíl práce a metodika.....                                  | 3  |
| 3     | Přehled poznatků z literatury.....                         | 4  |
| 3.1   | Legislativa týkající se bioplynových stanic.....           | 4  |
| 3.1.1 | Právní předpisy České republiky .....                      | 4  |
| 3.1.2 | Právní předpisy Evropské unie .....                        | 6  |
| 3.2   | Biomasa.....   | 6  |
| 3.2.1 | Definice biomasy a její vznik .....                        | 6  |
| 3.2.2 | Složení biomasy.....                                       | 7  |
| 3.2.3 | Energeticky využitelná biomasa.....                        | 8  |
| 3.2.4 | Možnosti energetického využití biomasy .....               | 11 |
| 3.3   | Zpracování biomasy metodou anaerobní fermentace .....      | 12 |
| 3.3.1 | Suroviny vhodné pro anaerobní fermentaci.....              | 12 |
| 3.3.2 | Vlastnosti surovin zpracovávané anaerobní fermentací ..... | 13 |
| 3.3.3 | Ovlivňování anaerobní fermentace .....                     | 15 |
| 3.3.4 | Fáze anaerobní fermentace .....                            | 17 |
| 3.3.5 | Typy technologických systémů v BPS.....                    | 19 |
| 3.3.6 | Technologické sestavy v BPS.....                           | 23 |
| 3.3.7 | Bioplyn .....  | 27 |
| 3.4   | Biometan.....  | 30 |
| 3.4.1 | Co je biometan .....                                       | 30 |
| 3.4.2 | Výroba biometanu – možnosti, technologie, technika.....    | 30 |
| 4     | Výchozí podmínky řešení .....                              | 35 |
| 4.1   | Popis BPS Krásná Hora nad Vltavou.....                     | 35 |
| 4.1.1 | Pohyb substrátů .....                                      | 36 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.1.2 | Plynové hospodářství.....   | 41 |
| 4.1.3 | Kogenerační jednotka .....  | 42 |
| 5     | Návrh řešení a dosažené výsledky .....                                    | 44 |
| 5.1   | Analýza složení a množství bioplynu .....                                 | 44 |
| 5.2   | Zvýšení produkce bioplynu .....   | 45 |
| 5.3   | Výběrové řízení na jednotku na čištění bioplynu a kompresní stanici ..... | 46 |
| 5.4   | Ekonomické vyhodnocení navrhované technologie.....                        | 50 |
| 5.4.1 | Náklady .....   | 50 |
| 5.4.2 | Očekávaný roční zisk.....   | 54 |
| 6     | Diskuse a závěry .....  | 55 |
| 7     | Citovaná literatura .....   | 57 |
| 8     | Přílohy.....  | 1  |
| 8.1   | Příloha 1 – výroba .....  | 1  |
| 8.2   | Příloha 2 - analýza plynu .....   | 13 |
| 8.3   | Příloha 3 - vstupní suroviny .....  | 25 |



### **Seznam použitých zkratk**

- EBA ... European Biogas Association
- CNG ... Stlačený zemní plyn
- BPS ... Bioplynová stanice
- POH ... Plán odpadového hospodářství
- OZE ... Obnovitelné zdroje energie
- BRKO ... Biologicky rozložitelný komunální odpad
- SKO ... Směsný komunální odpad
- ŽP ... Životní prostředí
- ČOV ... Čistírna odpadních vod
- MEŘO ... Metylester řepkového oleje
- LNG ... Zkapalněný zemní plyn
- KGJ ... Kogenerační jednotka

### **Seznam tabulek**

- Tabulka 1 - Produkce bioplynu, obsah metanu a výhřevnost bioplynu pro určité látky [18]
- Tabulka 2 - Hodnoty základních vlastností materiálů vhodných k anaerobní fermentaci [36]
- Tabulka 3 - Poměr C:N některých substrátů [15]
- Tabulka 4 - Přehled vybraných parametrů zmíněných technologií [47]
- Tabulka 5 - Popis Obrázku 7 – Bioplynová stanice Krásná Hora
- Tabulka 6 - Přehled vstupních surovin [49]
- Tabulka 7 - Technické parametry kogenerační jednotky [49]
- Tabulka 8 - Oblasti měření čidel [50]
- Tabulka 9 – Stanovené průměrné hodnoty kvality a množství bioplynu
- Tabulka 10 - Shrnutí produkce bioplynu a biometanu
- Tabulka 11 – Posuzované parametry nabídek
- Tabulka 12 - Bodové hodnocení
- Tabulka 13 - Parametry navrhované technologie

Tabulka 14 - Výchozí hodnoty pro výpočty nákladů

Tabulka 15 - Shrnutí nákladů na čištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu a následnou kompresi

Tabulka 16 - Souhrn jednotkových nákladů

### **Seznam obrázků**

Obrázek 1 - Schéma anaerobní digesce [15]

Obrázek 2 - Schéma strojní linky anaerobní fermentace organických tekutých materiálů [31]

Obrázek 3 - Způsoby míchání materiálu ve fermentoru [31]

Obrázek 4 - Možnosti zapojení fermentorů do soustav [32]

Obrázek 5 - Zjednodušené schéma membránové separace [47]

Obrázek 6 - Schéma bioplynové stanice

Obrázek 7 - Bioplynová stanice Krásná Hora

Obrázek 8 - Zásobník dávkovače pevných substrátů

Obrázek 9 - Fermentor

Obrázek 10 - Válcový separátor

Obrázek 11 - Plynojem

Obrázek 12 - KGJ na BPS Krásná Hora

Obrázek 13 - Technologická sestava [51]

Obrázek 14 - Schéma produkce bioCNG [51]

### **Seznam příloh**

Příloha č. 1 – výroba

Příloha č. 2 – analýza plynu

Příloha č. 3 – vstupní suroviny

# 1 Úvod

V roce 2009 byla Evropským parlamentem a Radou vydána směrnice 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů, která apeluje na členské státy Evropské unie, aby v roce 2020 bylo v rámci celé unie minimálně 20 % elektrické energie získáváno z obnovitelných zdrojů. [1]

Evropské země tak mimo jiné od roku 2009 budují bioplynové stanice. Z výroční zprávy European Biogas Association (EBA) z roku 2018 vyplývá, že jejich počet od roku 2009, kdy jich na území Evropské unie bylo 6227, vzrostl na 17783 (stav k roku 2017). Během pouhých 8 let se tedy počet bioplynových stanic v rámci EU navýšil skoro trojnásobně. A jejich počet stále, i když výrazněji pomalu, než tomu bylo po vydání výše zmíněné směrnice, roste. [2]

Množství energie, které bylo v Evropské unii vyrobeno z obnovitelných zdrojů, se mezi roky 2007 až 2017 celkově zvýšilo o 64,0 %. To se rovná průměrnému přírůstku 5,1 % ročně. Samotný bioplyn se pak v roce 2017 na energii z obnovitelných zdrojů vyrobené v Evropské unii podílel 7,4 %. [3]

Podíl obnovitelné energie na hrubé finální spotřebě v EU vzrostl v roce 2017 na 17,5 %. Česku, stejně jako dalším deseti státům, se již v tomto roce podařilo dosáhnout cílů, uvedených v prvním odstavci této kapitoly, a to získávat v roce 2020 z obnovitelných zdrojů 20 % z celkově vyrobené energie. Cílem pro rok 2020 byl pro Česko podíl 13 % z obnovitelných zdrojů, ale již v roce 2017 byl podíl 14,8 %. Samotný bioplyn pak ze všech obnovitelných zdrojů tvořil 24 % část. [4] [5] [6]

Podle současných plánů by v roce 2030 mělo v Česku být vybudováno 200 bioplynových stanic upravených pro výrobu biometanu. Tento plyn by měl být využíván jak k pohonu vozidel na CNG, tak i jako ekologičtější náhražka zemního plynu ve 25 % českých domácností. [7]

V říjnu roku 2019 byla v Česku spuštěna první BPS, která má technologii na čištění bioplynu na vlastnosti zemního plynu. Vyrobený biometan je vtlačěn do plynárenské soustavy, která ho dopraví na místo spotřeby. [8]

Pro další výrobu biometanu z bioplynu bude potřeba upravit technologii na současných bioplynových stanicích, případně vybudování nových stanic. Tato diplomová práce se bude

zabývat první možností, a to návrhem technologie na čištění a stlačování bioplynu na již vybudované zemědělské bioplynové stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Na té se v současnosti bioplyn zpracovává pouze v kogenerační jednotce za účelem výroby elektřiny a tepla. Část elektřiny spotřebovává sám podnik a zbytek dodává do sítě. Teplo se zde používá k ohřevu teplé vody a v zimě k vytápění kancelářských prostor a dílen.

## 2 Cíl práce a metodika

Hlavním cílem práce je navrhnout použití nové technologie na koncové zpracování bioplynu, a to na základě zhodnocení vlastností a množství bioplynu, vytvářeného na zkoumané bioplynové stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Inovace spočívá v návrhu technologického zařízení na čištění bioplynu na kvalitu zemního plynu s následným stlačováním a distribucí jako paliva pro pohon motorových vozidel. Samotnému návrhu předchází stanovení výchozích podmínek řešení pro bioplynovou stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Dalším dílčím cílem je naměřit a vyhodnotit kvalitu bioplynu, který bude zpracováván navrhovanou technologií. Po určení kvantity a kvality bioplynu, určenému k čištění, je uskutečněno výběrové řízení na dodavatele technologického celku. V posledním je provedeno ekonomické zhodnocení celé investice.

Cílem teoretické části této diplomové práce je zejména seznámit se základní legislativou, týkající se provozů bioplynových stanic a nakládání s biologicky rozložitelnými materiály. Dále definovat druhy biomasy, které lze používat ke zpracování metodou anaerobní fermentace v provozech zemědělských bioplynových stanic. Dalším úkolem je popsání problematiky týkající se samotných provozů zemědělských bioplynových stanic, používaných technologických a technických zařízení a dále také procesu a fází anaerobní fermentace.

Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců vstupních surovin a finálního bioplynu z bioplynové stanice a charakteristiky souvisejících právních předpisů, technologie a techniky bioplynových stanic a legislativních podmínek.

Pro výpočty a návrh inovace bioplynové stanice poslouží výsledky z měření kvality a množství bioplynu, získaného v průběhu roku 2019 na bioplynové stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Z výběrového řízení, zprostředkovaného na základě vypočtených požadovaných parametrů na nové zařízení, bude vybrán dodavatel technologie. Po zvolení nejvhodnějšího dodavatele bude provedeno ekonomické zhodnocení celé investice a bude zhodnocena její výhodnost.

## 3 Přehled poznatků z literatury

### 3.1 Legislativa týkající se bioplynových stanic

Stejně jako na další průmyslová odvětví, tak i na problematiku bioplynových stanic, zpracování biologicky rozložitelných odpadů (BRO), výrobu bioplynu a následného získávání energie z něj a zpracování zbytků anaerobní fermentace, se vztahují určité legislativní předpisy. Vzhledem k jejich množství v této práci zmíním jen ty nejdůležitější.

#### 3.1.1 Právní předpisy České republiky

##### **Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů**

Tento zákon je hlavním právním předpisem týkající se odpadového hospodářství v České republice. V samotném počátku tohoto zákona je řečeno, že odpady se rozdělují podle Katalogu odpadů do různých skupin. Katalog odpadů je uveden v příloze vyhlášky č. 93/2016 Sb., Vyhláše o katalogu odpadů. V zákonu je dále uvedeno, jak nakládat s vyprodukovanými odpady, a to samozřejmě s dodržáním ochrany životního prostředí a zdraví všech živých organismů. Uvádí rovněž o předcházení samotnému vzniku odpadů a v neposlední řadě se v něm dozvíme, že je dána jasná přednost materiálovému nebo energetickému zpracování odpadů před jejich zlikvidováním – ať už spálením nebo uložením na skládku. [9] [10]

##### **Nařízení vlády č. 352/2014 Sb., o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 – 2024**

Plán odpadového hospodářství (POH) má čtyři primární cíle: udržitelný vývoj společnosti, předcházení samotnému vzniku odpadů, snižování měrné produkce odpadů, co největší zmírnění nežádoucích dopadů na zdraví lidí, zvířat a rostlin při vzniku odpadů a jejich zpracování a v neposlední řadě přiblížení se k evropským hodnotám recyklace, tedy co nejvyššímu znovupoužití odpadů namísto primárních zdrojů. Rozlišujeme tři plány odpadového hospodářství – POH České republiky, POH krajů a POH obcí. [11]

##### **Vyhláška 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady**

Vyhláška uvádí seznam bioodpadů, spolu s požadavky na jakost rozložitelných odpadů, které vstupují do technologií je zpracovávajících. Dále jsou uvedeny nároky na techniku a

provoz těchto zařízení, v závislosti na objemu druhu zpracovávaných biologicky rozložitelných odpadů. Primárními způsoby, jak lze zpracovávat bioodpady, jsou kompostování a anaerobní digesce. Bioplynové stanice fungují na principu druhé uvedené možnosti – je v nich tedy uplatněno kontrolovatelné a řízené mikrobiální rozkládání organických látek bez přístupu vzduchu. Pro započítání samotné digesce je nejprve nutno dosáhnout minimální teploty bioodpadu 55 °C a tuto teplotu následně nepřerušovaně udržovat po dobu alespoň 24 hodin. Nezbytná doba probíhající anaerobní digesce je určeno na minimálně 30 dní. [12]

Z vyhlášky se rovněž dozvíme kritéria a požadavky na hodnocení a kontrolu materiálů vycházejících ze zařízení, jež zpracovává bioodpady. Jsou uvedeny limitní obsahy vybraných nebezpečných a rizikových látek, znaky jakosti digestátu (vlhkost, obsah dusíku a pH) a nechybí ani metody, pomocí kterých lze stanovit mikrobiologické ukazatele. [12]

#### **Zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů**

Uvádí možnosti a podmínky pro podporu výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie (OZE), při splňování podmínek ochrany životního prostředí. Tento zákon dále říká, že energie vzniklá ze zpracování biomasy a následného spalování vzniklého bioplynu, patří mezi OZE a tudíž má nárok na podporu. V zákonu je taktéž uvedeno, že provozovatelé distribučních či přenosových soustav musí k těmto soustavám přednostně připojit taková zařízení, kde dochází k výrobě energie z OZE. Výkupní cena je určena Energetickým regulačním úřadem vždy za jeden kalendářní rok. [13]

#### **Zákon č. 458/2000 Sb., o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon)**

Udává nejdůležitější podmínky pro podnikání v průmyslových odvětvích týkajících se energetiky. Pro účely tohoto právního předpisu se jimi rozumí plynárenství, elektro-energetika a teplárenství, a taktéž související práva a povinnosti jednotlivých osob v těchto odvětvích podnikajících. Obecná část zákona je společná pro všechna tři výše zmíněná odvětví a řeší podmínky podnikání v nich. Po obecné části následuje zvláštní část, která už je rozdělena podle jednotlivých odvětví (elektroenergetika, plynárenství, teplárenství) a řeší záležitosti týkající se jich samotných. [14]

### 3.1.2 Právní předpisy Evropské unie

#### **Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/28/ES o podpoře využívání energie a obnovitelných zdrojů**

Jak již bylo uvedeno v úvodu této práce, zmíněná směrnice stanovuje pro země EU cíle, které spočívají v dosažení minimálního objemu 20 % konečné hrubé spotřeby energie z obnovitelných zdrojů, a to v roce 2020. Pro Českou republiku byla tato minimální hodnota stanovena na 13 %, nicméně tato hodnota byla dosažena již v roce 2017. Česká republika tedy splnila cíl stanovený touto směrnicí s tříletým předstihem. [1]

### 3.2 Biomasa

#### 3.2.1 Definice biomasy a její vznik

Pod názvem biomasa se skrývá veškerý organický materiál nacházející se na naší planetě, který se účastní koloběhu živin v biosféře. Definuje se jako hmota biologického původu, což jsou těla všech živých i mrtvých organismů, od největších druhů až po ty mikroskopické (živočichové, rostliny, houby, bakterie a sinice). Tento organický materiál je buď cíleně získávaný jako výstup výrobní činnosti, případně se může jednat o odpad, využitý z potravinářské, zemědělské nebo lesní výroby, z komunálního hospodářství a z péče o krajinu. Z energeticko-hospodářského pohledu je klíčová jen biomasa, ze které lze získat určité množství energie. Základním stavebním kamenem buněk veškeré živé hmoty je uhlík a jeho vazby obsahující energii, díky čemuž lze teoreticky získávat energii ze všech forem organického materiálu. [15] [16] [17]

Na celém povrchu Země, a samozřejmě i v její atmosféře, dochází k fyzikálně-chemickému oběhu sloučenin a prvků. Tyto biochemické reakce zajišťují nepřetržitý cyklus biogenních prvků a přeměňují energii pocházející ze Slunce na energii chemickou. Hlavními činiteli jsou pak fotochemické reakce a fotosyntéza. [15]

Za biomasu energetickou tedy častěji považujeme rostliny právě proto, že dokážou využívat energii ze Slunce k fotosyntéze. Při tomto procesu se za využití elementárních anorganických látek (oxid uhličitý a voda) k vytváření sloučenin bohatých na energii – sacharidů. Jednoduše by se dalo říct, že se energie uvolňovaná slunečním zářením ukládá v rostlinách. [16]



### 3.2.2 Složení biomasy

#### **Sacharidy**

U surovin zpracovávaných k výrobě biomasy, což jsou nejčastěji rostlinné suroviny a odpady, se nejvíce setkáváme se celulózu, hemicelulózu a škrobem. Celulóza je z hlediska ustáleného procesu anaerobní fermentace důležitější než škrob. Ačkoliv totiž hydrolyzuje pomaleji, má vyšší výtěžnost bioplynu. Naopak škrob je oproti celulóze snadněji rozložitelný, neboť je hydrolyzován pomocí amylotických enzymů. [18]

#### **Tuky**

Do skupiny tuků spadají i všechny estery vyšších mastných kyselin, nacházející se v tkáních rostlin a živočichů. Lze je najít především v odpadech z gastro provozů, z provozů zpracovávajících olejiny a v pokrutinách. Tuky mají vůbec největší výtěžnost bioplynu, spolu s nejvyšším obsahem metanu. [18]

#### **Bílkoviny**

Patří sem  $\alpha$ -aminokyseliny a vysokomolekulární polymery, vzájemně propojené pomocí peptidických vazeb. Jsou to lehce rozložitelné látky s kvalitní výtěžností metanu. Jsou ovšem zdrojem prvků, jež mají na svědomí vznik nežádoucí látky – amoniak, sulfan, atd.. Uvedené sloučeniny totiž způsobují zpomalování procesu biozplynování a mají ještě další nežádoucí účinky. Doporučuje se tedy dodržovat určitou obezřetnost při dávkování materiálů s vyšším obsahem bílkovin. [18]

Z předchozích tří odstavců vyplývá, že každá ze tří základních složek biomasy má různý vliv na produkci bioplynu a obsah metanu v něm. Pro lepší pochopení následuje Tabulka 1, která uvádí objem uvolněného bioplynu, obsah metanu a výhřevnost zvlášť pro sacharidy, tuky i bílkoviny.

Tabulka 1 - Produkce bioplynu, obsah metanu a výhřevnost bioplynu pro určité látky [18]

| Látka     | Specifická produkce bioplynu [litr.kg <sup>-1</sup> rozložené sušiny] | Obsah metanu v bioplynu [% objemu] | Průměrná výhřevnost bioplynu [MJ.m <sup>-3</sup> ] |
|-----------|---|------------------------------------|--|
| Tuky      | 1120 - 1580   | 71 - 84                            | 24,9   |
| Sacharidy | 760 - 890   | 50 - 54                            | 17,8   |
| Bílkoviny | 560 - 780   | 62 - 67                            | 23,4   |

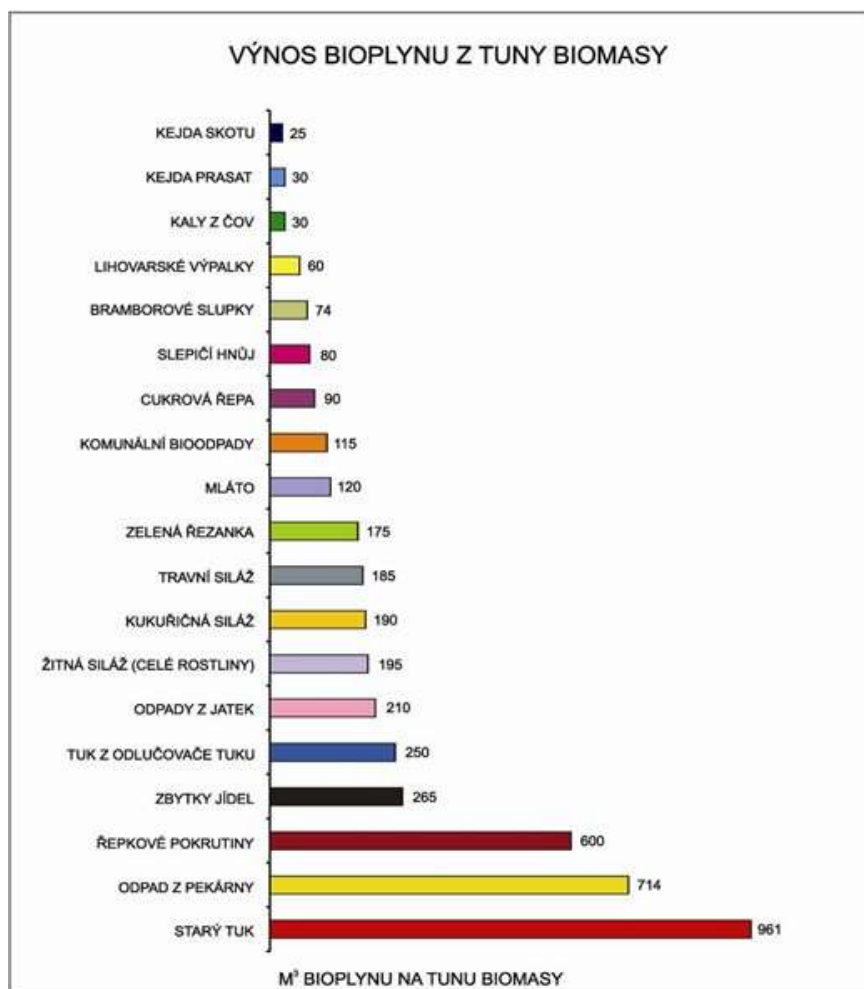
### 3.2.3 Energeticky využitelná biomasa

Energeticky využitelnou biomasu můžeme rozdělit do několika částečně se překrývajících kategorií. Mezi biomasu se řadí biopaliva (pevná, kapalná, plynná), biologicky rozložitelný odpad, odpadní biomasa, cíleně pěstovaná biomasa (zejména byliny a rychle rostoucí dřeviny), dendromasa (stromy speciálně), fytomasa (hmota rostlin obecně). [17] [19]

Aby bylo docíleno co nejvyšší produkce bioplynu, nepoužívá se při fermentaci pouze jeden materiál, ale bývá jich smícháváno více, a to v určitém poměru. Tomuto procesu se poté říká kofermentace – dochází totiž k anaerobnímu kvašení homogenizační směsi, kterou nejčastěji bývají cíleně pěstovaná biomasa z rostlin, kejda a případně ještě další látky. [18] [20]

Produkce bioplynu z jednotlivých druhů materiálů vstupujících do BPS se výrazně liší, což je patrné z Grafu 1. Skutečné hodnoty závisí na kvalitě vstupní suroviny a na použité technologii. Na fermentor, ve kterém probíhá proces anaerobní fermentace, se lze s určitým nadhledem dívat jako na žaludek, v němž jsou za činnosti mnoha druhů mikroorganismů vstupující materiály zpracovány až na konečnou produkci bioplynu. Tento proces je tedy citlivý na kvalitu a na změny ideálních podmínek (hlavně stálá hodnota pH a teplota). Nesprávné dávkování surovin proto mohou vést ke snížení výnosu bioplynu, případně až k zastavení celého procesu. Pro optimální chod je potřeba držet co nejvíce stejné složení vstupujících materiálů a přechody mezi rozdílnými surovinami provádět jen pomalu a v řádu několika měsíců. [21] [22] [23]

Graf 1 - Výnos bioplynu některých materiálů [21]



### 3.2.3.1 Cíleně pěstovaná biomasa

Cíleně pěstovaná biomasa je takový druh biomasy, který je uvedený v kategorii 1 v příloze č. 1 k Vyhlášce č. 477/2012 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu. Dále se jedná o takovou biomasu, která nemá původ z určených rostlin a energetických dřevin, které jsou uvedeny v příloze č. 4 uvedené vyhlášky a pěstuje se jenom na určeném území České republiky s doložením této podmínky. [24]

Výhody biomasy pěstované s energetickým záměrem je její lehký výsev, krátká doba vegetace a schopnost být využita i pro neenergetické účely. Takové plodiny ukazují vysoké hektarové výnosy, nejčastěji mezi 33 a 55 tunami na hektar, a to proto, aby byly zaručeny přívětivé ekonomické zisky. Jejich sklizeň by měla probíhat za pomoci v zemědělství klasicky

používaných strojů, aby nebylo potřeba kupovat nové speciální, které by byly dlouhý čas v roce nevyužity. Cíleně pěstovaná biomasa by měla co nejšetrněji hospodařit s vodou a hnojivy na bázi dusíku, a by bylo zabezpečeno jejich rychlé vzrůstání, produkce zelené hmoty a s ní spojená velmi dobrá úroveň fotosyntézy. Od těchto rostlin se rovněž očekává kvalitní odolnost proti zvěři, nemocem a přírodním vlivům. [16] [25]

Jako cíleně pěstovaná biomasa je nejčastěji používáno obilí, cukrová řepa, olejniny, konopí, cukrová třtina a různé energetické dřeviny, jako akáty, topoly a vrby. [15]

### 3.2.3.2 Odpadní biomasa

Odpadní biomasa tvoří významnou část z celkového množství veškeré biomasy používané jako OZE. Vzniká při různých činnostech a zpravidla je lehce dostupným zdrojem energie, který nelze využít nějakým jiným způsobem. [26]

Lze ji získat z mnoha odvětví lidské činnosti. Jedná se kupříkladu o odpady z rostlinné výroby – zde se jedná o zbytky zemědělské prvovýroby, odpady ze sadů a vinic, řepková či kukuřičná sláma a odpady z údržby krajiny. Takový materiál je zapotřebí nejprve zbavit kamenů a dalších nežádoucích materiálů. [16] [18]

Odpadní biomasu také tvoří odpady z potravinářského průmyslu. Mají ovšem svá specifika, která jsou dána atypičností provozu, sezónní výrobou, různorodostí surovin a širokým sortimentem výrobků. Potravinářský průmysl také zpracovávají rychle se kazící suroviny jako je maso, ovoce, zelenina, mléko a tuky. Tyto suroviny je z energetického hlediska ekonomicky náročné využívat, proto se nezpracovávají tak často a používají se spíše ke krmení nebo kompostování. Pro výrobu bioplynu se pak častěji řadí odpady z výroby piva, sladu, zpracování mléka, výroby škrobu, lihovarnictví, výroby vína, olejů, tuků a cukru. [27]

Do substrátů ze zemědělství se řadí hlavně exkrementy hospodářských zvířat (kejda, chlěvská mrva, močůvka), rostlinné odpady a samozřejmě také, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, cíleně pěstovaná biomasa. Nejvhodnějším substrátem k výrobě bioplynu jsou již zmíněné exkrementy hospodářských zvířat, neboť jsou primárním zdrojem metanogenních bakterií. Z tohoto důvodu jsou velmi využívány i napříč tomu, že nepatří mezi materiály s vysokou měrnou produkcí bioplynu, viz Graf 1. Jako nejpoužívanější materiál řadí se mezi zvířecí exkrementy je kejda – je řídká a tím pádem snadno čerpatelná a lze pomocí ní ředit látky s vysokým obsahem sušiny, nejčastěji kukuřičnou siláž. [16] [28]

Samostatnou skupinou jsou biologicky rozložitelné komunální odpady (BRKO), které jsou důležitou součástí celkové produkce odpadů v České republice. Tvoří asi 45 % část z komunálního odpadu a v jeho obsahu je nejvíce zastoupen odpad z údržby zeleně. Mají různorodé vlastnosti, a proto je jejich sběr, zpracování a odstraňování problematické. Mají i negativní vliv na ŽP – jde hlavně o vytváření skleníkových plynů a kyselých výluhů při hydrologických procesech. Ve směsném komunálním odpadu (SKO) je asi 40 % biologickým způsobem rozložitelných složek. [29] [30]

Posledním možným odpadním materiálem, z něhož lze získat energii pomocí bezkyslíkové fermentace jsou kaly z čističek odpadních vod (ČOV). Jejich vhodnost je určena především jejich vysokým obsahem tuků. Nevýhodou ovšem je, že obsahují i nežádoucí látky, jež dokážou být nebezpečné pro ŽP. Těmito látkami mohou být jak mikroorganismy, tak i těžké kovy, které způsobují nežádoucí účinky při procesu metanizace. Řešením je použití určitých technologických procesů při zpracování kalů, které tyto nechtěné látky zničí, případně oddělí. [31]

#### 3.2.4 Možnosti energetického využití biomasy

Způsob získání energie z biomasy závisí zejména na jejích fyzikálněchemických vlastnostech. Důležitým ukazatelem je vlhkost neboli zastoupení sušiny v biomase. Nejčastěji udávaná hranice mezi suchými a mokrymi procesy je 50 % obsah sušiny. Jestliže biomasa obsahuje méně jak 50 % sušiny, je zpracovávána suchými procesy. V případě že obsahuje více než 50 % sušiny, pak jde o procesy mokré. [15]

Biomasa ze zemědělského odvětví se zpracovává zpracováním v BPS, případně je využita k výrobě paliv, a to buď kapalných biopaliv nebo pevných, tvarovaných paliv. [32]

V bioplynových stanicích je biomasa zpracovávána a fermentována bez přístupu vzduchu za pomoci několika druhů bakterií, jejichž působením se z biomasy uvolňuje bioplyn. Základní složkou bioplynu je metan, jehož obsah činí nejčastěji 50 – 75 % celkového objemu bioplynu. Bioplyn je následně spalován v kogenerační jednotce za účelem kombinované výroby energie v podobě elektřiny a tepla. [32]

V ČR jsou hlavními surovinami pro výrobu kapalných biopaliv řepka olejná, cukrová řepa a obiloviny. Jejich zpracováním vznikají biopaliva, která lze přimíchávat do konvenčních

paliv. Takovými nejběžnějšími biopalivy používanými v ČR jsou metylester řepkového oleje (MEŘO) a bioetanol. [32]

V největší míře je biomasa využívána ke spalování, a to především ve formě palivového dřeva, stále častěji ovšem také v podobě slisovaných malých částí dřeva nebo rostlin – briket nebo pelet. Mezi další možnosti, jak získat z biomasy energii spalováním, se řadí zplyňování či pyrolýza, což jsou, stejně jako uvedené spalování, suché procesy. [16] [32]

### 3.3 Zpracování biomasy metodou anaerobní fermentace

Pod pojmem anaerobní fermentace se skrývá velmi složitý biochemický proces, jenž je složením mnoha dílčích, na sebe vzájemně navazujících biologických, fyzikálních a fyzikálně-chemických reakcí. Zmíněný proces probíhá i samovolně v přírodě, například v bažinách, na dně jezer nebo na skládkách komunálního odpadu. Tato metoda zpracování biomasy je shledávána jako jedna z těch náročnějších, a to hlavně kvůli jejím požadavkům na stavební a technické vybavení. Jejím výsledným produktem je digestát, ale především bioplyn – plyn produkovaný anaerobními mikroorganismy, které patří mezi nejdéle se vyskytující organismy na Zemi. Existují zde ještě z dob, kdy Zemská atmosféra neobsahovala kyslík – ten na ně totiž působí jako prudký jed. Pro správnou funkčnost procesu anaerobní fermentace je tedy důležité udržovat zpracovávaný materiál v hermeticky uzavřeném prostoru bez přístupu vzduchu a kvalitně ho homogenizovat. [15] [33] [34] [35]

#### 3.3.1 Suroviny vhodné pro anaerobní fermentaci

Obecně lze říct, že ke zpracování anaerobní fermentací za účelem výroby energie je možné používat veškerý materiál, který nazýváme biomasou. Při anaerobní digestaci běžně dostupných organických surovin získáváme metan rozkladem tuků, bílkovin a polysacharidů. Nejvyšší výtěžnosti metanu se dosahuje rozkládáním tuků, nicméně jejich obsah nebývá v běžně zpracovávaných materiálech příliš vysoký. Při rozkladu normálně dobře rozložitelných bílkovin se bohužel uvolňují i sirné sloučeniny, například sulfan  $H_2S$ , které je nutno před konečnou spotřebou bioplynu odstranit. Zásadním zdrojem látek pro produkci metanu jsou nejčastěji polysacharidy nacházející se v rostlinné hmotě. [15]

V BPS provozovaných zemědělskými podniky se nejčastěji zpracovávají produkty z živočišné a rostlinné výroby, protože jsou nejsnadněji dostupné. Z živočišné výroby se zpracovávají exkrementy hospodářských zvířat – obsahují totiž velké množství biologicky lehce

rozložitelných látek, které metanogenní mikroorganismy potřebují ke svému životu. Mezi zmíněné použitelné substráty patří kejda, případně i slamnatý hnůj. Co se týče rostlinné výroby, tak lze zpracovávat rostlinné zbytky, pro které by jinak neexistovalo jiné využití. Takových zbytků ovšem není dostatek na pokrytí požadovaného množství surovin, a tak podniky cíleně pěstují rostliny, nejčastěji kukuřici, šťovík, konopí nebo některé druhy trav. V komunálních BPS se pak fermentují například zbytky potravin získané ze školních či nemocničních jídelen nebo z restaurací. V mnohých bioplynových stanicích se pak využívají kaly z ČOV a zbytky z údržby zeleně, nebo také odpadní látky z výroben potravin a nápojů, z pivovar, cukrovarů, a nebo z výroben papíru. [33] [36] [37]

### 3.3.2 Vlastnosti surovin zpracovávané anaerobní fermentací

Dalo by se říci, že jakákoliv surovina přírodního původu, jejíž obsah sušiny nedosahuje hodnoty 50 % a která obsahuje velké množství těkavých látek, lze použít k výrobě bioplynu pomocí anaerobní fermentace. Nicméně z důvodu efektivního zpracování je žádoucí, aby určité vlastnosti zpracovávaných surovin byly mezi určenými optimálními hranicemi, z kterých ty nejzákladnější jsou zmíněny v Tabulce 2. V případě, že vlastnosti nejsou vyhovující, lze je ovlivnit úpravou před vstupem do technologie BPS. Další možností je vytvoření směsi více různých organických materiálů, takzvané vsázky. [38]

*Tabulka 2 - Hodnoty základních vlastností materiálů vhodných k anaerobní fermentaci [38]*

| Organické látky [% suš.] | Sušina [%] | Poměr C:N | pH        |
|--------------------------|------------|-----------|-----------|
| nad 50                   | 5 – 35     | 20 – 40:1 | 6,5 – 7,5 |

#### Hodnota pH

Hodnota pH je důležitý faktor, který má vliv na hladký průběh metanogenní fermentace. Při vstupu do celého procesu je za ideální hodnotu pH považována hodnota mezi 7 – 7,8, tedy víceméně neutrální hodnota. Parametr pH však nelze udržet na konstantní hodnotě, neboť se v průběhu celého procesu mění. Na začátku procesu, kdy největší aktivitu vykazují acidogeny, může pH klesnout až na 4 až 6. Při hodnotách pH nižších než 5 se začínají projevovat inhibiční účinky na určité druhy metanogenních bakterií. Při dosažení příznivých podmínek může nicméně dojít k jejich rozvoji a přičemž jejich aktivita na vliv na zvýšení pH zpátky na hodnotu 7. Druhy některých bakterií podílejících se na tvorbě metanu jsou schopné

rozvoje i ve velmi zásaditém prostředí, kdy je dosahováno hodnot pH 8 - 9. Provozovatelé BPS ve snaze udržet co nejlépejší hodnotu pH upravují obsah fermentoru alkalickými přísadami a dostatečnou homogenizací vstupních materiálů. [15]

### **Obsah sušiny**

V případě tekutých odpadů je ideální obsah sušiny v rozsahu od 8 do 14 %, u pevných odpadů pak v rozmezí 22 a 25 %. V případě tekutých odpadů, vyznačujících se obsahem sušiny do 3 %, probíhá anaerobní fermentace s negativní energetickou bilancí. To lze vysvětlit tak, že proces je udržován na provozní teplotě dobou tepla z externího zdroje. Pozitivní energetické bilance lze dosáhnout až při překročení 4 % hodnoty obsahu sušiny. U tekutých odpadů se musí uvažovat horní hranice obsahu sušiny, a to z důvodu čerpatelnosti materiálu. Jako absolutní hranice obsahu sušiny, nad kterou už neprobíhá proces anaerobní fermentace, se obecně uvádí hodnota 50 %. [15]

### **Poměr uhlíku a dusíku**

Důležitým parametrem vhodnosti substrátů ke zpracování anaerobní fermentací je poměr uhlíkatých a dusíkatých látek, přičemž za optimální je považován poměr C:N = 30:1. Zvýšené množství dusíkatých látek v materiálu by mohlo způsobovat zhoršenou kvalitu výsledného bioplynu, v němž by se mohlo vyskytovat minoritní množství plynů jako jsou oxid dusný nebo amoniak. Nízkým obsahem dusíku se vyznačují rostlinné produkty a materiálem, ve kterém je naopak dusíku více, jsou exkrementy hospodářských zvířat. Jak jsou na tom různé materiály se zmiňovaným poměrem uhlíku a dusíku lze vyčíst z Tabulky 3. V praxi se potom ideálního poměru C:N dosahuje směřováním různých surovin o různém poměru. [15]

*Tabulka 3 - Poměr C:N některých substrátů [15]*

| <b>Materiál</b>   | <b>Poměr C:N</b> |
|-------------------|------------------|
| Močůvka           | 2 : 1            |
| Kejda skotu       | 10 : 1           |
| Drůbeží trus      | 10 : 1           |
| Odpad ze zeleniny | 13 : 1           |
| Odpad z kuchyně   | 12 až 20 : 1     |
| Posekaná tráva    | 12 až 25 : 1     |



| Materiál        | Poměr C:N       |
|-----------------|-----------------|
| Odpad ze zahrad | 20 až 60 : 1    |
| Listí           | 30 až 60 : 1    |
| Obilná sláma    | 60 až 100 : 1   |
| Dřevěná štěpka  | 100 až 150 : 1  |
| Kůra            | 120 : 1         |
| Piliny          | 500 : 1         |
| Papír, karton   | 350 až 1000 : 1 |

### Popeloviny a další nežádoucí látky

Vhodný materiál by měl v sobě obsahovat určité množství anorganických látek, tzv. popelovin. S obsahem nežádoucích příměsí se naopak vhodnost materiálu snižuje. Mezi tyto nechtěné látky patří zejména látky omezující vývoj organismů, například antibiotika. Ty se podávají buď zvířatům jako léčiva, případně je lze nalézt v krmných směsích pro mladou drůbež. Taktéž materiály, u nichž byl započnut hnilobný rozklad nelze považovat za vhodný materiál pro anaerobní fermentaci. To platí i pro substráty narušené předchozí manipulací nebo úpravami a v případě některých materiálů i po dlouhodobém skladování, neboť u nich mohlo dojít ke kompostování. [15]

### 3.3.3 Ovlivňování anaerobní fermentace

Anaerobní rozkládání organických materiálů ovlivňuje celé spektrum faktorů, měnící mikrobiální prostředí a mající důležitý vliv na průběh celého procesu tvorby bioplynu. Některé dokážou ovlivňovat biometanizaci přívnějším účinkem a ulehčí nebo zvýší výrobu bioplynu, a jiné, s negativními účinky, mají vliv opačný a jeho produkci inhibují. Nejdůležitější aspekty, které mají vliv na anaerobní digesci byly uvedeny v předchozí kapitole. Průběh procesu je však ovlivňován i dalšími faktory, a to třeba vlhkostí prostředí – ta musí kvůli splnění podmínek práce a množení metanových bakterií dosahovat alespoň 50 %. Taktéž je vhodné zamezit přístupu světla, které má na svědomí brždění množení bakterií. A abychom například předešli přetížení fermentoru, je nutné zajistit rovnoměrný přísun substrátu. [38]

## **Teplota**

Stejně jako na všechny ostatní biochemické děje, tak i na anaerobní digesci má vliv teplota. Čím je teplota v reaktoru vyšší, tím vyšší je rychlost všech probíhajících procesů. Se změnou teploty a rychlostí procesů nastává narušování dynamické rovnováhy procesu, což může nakonec způsobit i havárii procesu. Při zvýšené teplotě dále dochází ke zlepšení rozpustnosti některých látek – to je dobré pro související transportní jevy. Pokud změníme teplotu na dlouhou dobu, dojde ve fermentoru ke změně v zastoupení druhů organismů. Jsou rozlišovány čtyři typické teplotní rozmezí, ve kterých se vyskytují určité kmeny bakterií:

- Kryofilní oblast – 0 až 7 °C
- Psychrofilní oblast – 5 až 27 °C
- Mezofilní oblast – 27 až 40 °C
- Termofilní oblast – 45 až 60 °C

V rozdělení teplotních skupin se různí autoři neshodují, proto tedy není úplně přesné. V současnosti většina fermentorů v zemědělských BPS pracuje v mezofilní oblasti. Obecně lze říci, že z důvodu udržení stability procesu a rovnoměrné produkce bioplynu, je potřeba zabezpečit, aby byla v reaktoru stále stejná teplota a nedocházelo k jejímu vychylování. [38] [39] [40]

## **Přítomnost nutrientů**

Z důvodu správného zajištění provozu fermentorů je potřeba dodržet daný poměr dusíku (N) a fosforu (P). Poměr živin CHSK:N:P by se měl nacházet v hodnotách okolo 400:6,7:1. Nutná je i přítomnost rady mikronutrientů – sodík, vápník, draslík, železo, hořčík, síra, selen, wolfram. Negativní účinky jsou způsobovány vyšším výskytem těžkých kovů a přítomností oxidantů. Většina přírodních materiálů obsahuje dostatečné množství nutrientů, nicméně při anaerobní fermentaci kejdy a dalších živočišných produktů se zvyšuje množství amoniaku. Ten může, spolu se zvýšenou hodnotou pH, mít inhibiční až toxické účinky. [39] [40]

## **Přítomnost inhibujících a toxických látek**

Inhibujícími a toxickými látkami jsou takové látky, které negativně ovlivňují biologický proces. Těmito látkami jsou nejčastěji nižší mastné kyseliny a amoniak. Tyto látky mohou ovšem působit pouze v nedisociované formě, což znamená, že je závislost mezi schopností inhibice těmito látkami a jejich celkovou koncentrací v systému a na hodnotě pH. Amoniak

může působit v případě vysoké hodnoty pH, při nízké pak mastné kyseliny. Koncentrace amoniaku je ovlivňována ještě teplotou, a to tak že při zvyšující se teplotě jeho koncentrace roste. Z tohoto tvrzení je tedy jasné, že při termofilním procesu je inhibice amoniakem výrazně vyšší než v procesu mezofilním. [39] [40]

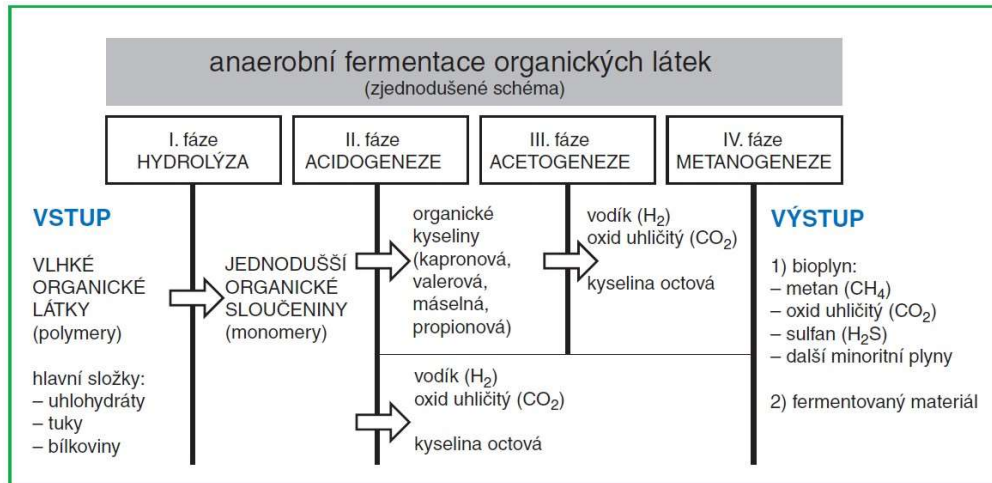
### **Technologické faktory**

Nejdůležitějšími technologickými faktory jsou doba zdržení a míchání. Míchání se provádí z důvodu dosažení co nejvíce homogenního substrátu. Homogenizací bude docíleno nejdokonalějšího kontaktu metanogenních bakterií a substrátu. Důležitým parametrem pro účinnost procesu kvůli odbourávání organického podílu materiálu a následné přeměny na bioplyn je doba zdržení. Ta je současně i důležitým parametrem pro růst anaerobní biomasy ve fermentoru. Aby bylo zabráněno vyplavování potřebných organismů, musí se doba zdržení udržovat dostatečně dlouhá. Dalším pojmem je doba zdržení hydraulická – ta značí průměrný čas setrvání biomasy v reaktoru – zde je obecně doporučováno, aby se fermentovaný substrát ponechával v reaktoru okolo 65 – 70 dní. Jedině tak bude totiž zajištěno udržení vysoké koncentrace aktivní biomasy a stejně tak vysoký stupeň odbourání organické sušiny materiálu. [39] [40]

#### **3.3.4 Fáze anaerobní fermentace**

Rozklad organické hmoty bez přístupu vzduchu potřebuje řízenou metabolickou součinnost anaerobních mikroorganismů, kteří se podílejí na produkci bioplynu. Produkt jedné skupiny mikroorganismů se následně stává potravou pro skupiny další. V případě, že jedna skupina vykazuje nedostatečnou aktivitu, může být narušena dynamická aktivita celého procesu. Proces vzniku bioplynu rozdělujeme do čtyř po sobě jdoucích fází, jejichž schéma je na Obrázku č. 1, samotné fáze jsou pak popsána v následujících odstavcích. [33]

Obrázek 1 - Schéma anaerobní digesce [15]



### 1. fáze – hydrolýza

Počátek rozkladu organické hmoty má začátek ještě v prostředí obsahující vzdušný kyslík. Ten pro svou aktivitu postupně spotřebovávají aerobní bakterie nevyžadující bezkyslíkaté prostředí a zároveň je pro jejich činnost důležitý vyšší než 50 % obsah vlhkosti. Aerobní bakterie rozkládají rozpuštěné i nerozpuštěné makromolekulární organické látky (polysacharidy, tuky, bílkoviny) na látky nízkomolekulární – ty se pak snadno za pomoci extracelulárních hydrolytických enzymů, produkovaných fermentačními bakteriemi, rozpouští ve vodě. Rozložené látky jsou dostatečně malé, aby byly schopny transportu skrz buněčnou membránu přímo do buňky, kde dále pokračuje jejich rozklad na jednodušší látky. Proces hydrolýzy je často nejpomalejší ze všech fází anaerobního rozkladu a bývá tak časově omezujícím faktorem celé metanizace. [33] [34] [39]

### 2. fáze – acidogeneze

V počátku této fáze je dokončena tvorba bezkyslíkatého prostředí. Produkty hydrolýzy jsou nadále rozkládány na jednodušší látky uvnitř buněk za působení acidogenních bakterií. Vznikají tak například kyselina octová, oxid uhličitý a vodík. V případě vyšší koncentrace vodíku jsou produkovány vyšší organické kyseliny a alkoholy. Důkaz o správnosti a rovnováze celého procesu lze získat ze sledování koncentrace nižších mastných kyselin. [33] [34] [39]

### 3. fáze – acetogeneze

V této fázi, často označované jako mezifáze, jsou vyšší produkty vzniklé při acidogenezi oxidovány na vodík, oxid uhličitý a kyselinu octovou. Právě vytváření kyseliny octové je

hlavním propojením pro následnou produkci metanu. Během acidogeneze a acetogeneze vzrůstá kyselost prostředí. [33] [34] [39]

#### 4. fáze – metanogeneze

Metanogeneze, která už probíhá pouze v anaerobním prostředí, je poslední fází mechanismu vzniku bioplynu. V této fázi rozkládají metanogenní acetotrofní bakterie kyselinu octovou na metan a oxid uhličitý a hydrogenotrofní bakterie vytváří metan a vodu z vodíku a oxidu uhličitého, přičemž metan vyprodukovaný metanogenními acetotrofními bakteriemi tvoří asi 70 % celkového obsahu vytvořeného bioplynu. Některé kmeny metanogenních bakterií jsou obojetné a dokážou se chovat jako acetotrofní a hydrogenotrofní zároveň. [33] [34] [39]

#### 3.3.5 Typy technologických systémů v BPS

Je mnoho technik a možností, jak z rozličných druhů organických materiálů získávat bioplyn. V následující kapitole budou rozděleny podle určitých kritérií a následně popsány ty nejdůležitější.

##### 3.3.5.1 Dělení podle způsobu dávkování substrátu

- Kontinuální dávkování

Tato metoda, kdy se vstupní materiál dávkuje nepřetržitě, je využívána výhradně pro doplňování fermentorů určených pro zpracování tekutých organických materiálů s velmi nízkým obsahem sušiny. [15]

- Diskontinuální dávkování

Diskontinuálního dávkování je využíváno především při suché fermentaci v BPS se systémem přerušovaného provozu, kdy doba jednoho pracovního cyklu je rovna času setrvání zpracovávaného materiálu ve fermentoru. Při plnění a vyprazdňování fermentoru je vysoký nárok na obsluhu. [15]

- Semikontinuální dávkování

Dávkování tímto způsobem je využíváno především při zpracování tekutých materiálů. Časové rozmezí mezi vstupními dávkami materiálu je kratší než jeho doba zdržení v reaktoru. Četnost dávkování je různorodá, nejčastěji se však dávkuje jednou až čtyřikrát

denně. Dávkování materiálu po malých dávkách má velmi malý vliv na změnu podmínek ve fermentoru. U této metody se nabízí možnost zavedení automatického dávkování, čímž je snížena náročnost na obsluhu. [15]

### 3.3.5.2 Dělení podle konzistence substrátu

- **Suchá fermentace**

Pro suchou fermentaci je používán vstupní materiál s obsahem sušiny mezi 20 až 40 % (biomasa, travní zeleň, hnůj, ...) a během zpracování je využíváno buď procesů termofilních, častěji pak ale mezofilních – z důvodu nižších tepelných ztrát. K tomuto procesu jsou budovány tzv. garážové BPS, ve kterých je materiál umístěn do paralelních fermentačních železobetonových boxů, kde je následně uzavřen a temperován na provozní teplotu. Bývá obvyklé, že takovýchto boxů je navrženo několik vedle sebe a celková produkce bioplynu je i přes různou produkci z jednotlivých boxů víceméně stálá. Při doplňování touto metodou je využíváno buď kontinuálního nebo diskontinuálního způsobu. Materiál se ve fermentoru obvykle zdržuje 10 – 60 dní a na konci procesu v něj zůstává tekutý zbytek (perkolát) a pevný zbytek (fermentát), přičemž oba dva se využívají jako hnojiva na zemědělských pozemcích. [33] [34] [35] [41]

#### Výhody

Největší výhodou této technologie je možnost zpracovávat heterogenní materiál, který může obsahovat příměsi a cizorodé nečistoty. Důvodem k tomuto je absence jakýchkoliv míchadel nebo čerpadel, které by se mohli přítomností cizorodých předmětů poškodit. Díky nepotřebě uvedených zařízení vyplývá další výhoda – nižší pořizovací cena BPS, nižší spotřeba elektřiny během provozu a nepotřeba tyto zařízení servisovat, opravovat a měnit. Jednou z dalších výhod je, že v mnoha případech není nutné vstupní suroviny upravovat, avšak je doporučeno hrubě ho nadrtit. V případě nedostatečné dodávky surovin je možné provozovat BPS se sníženým počtem aktivních boxů. Naopak pokud máme dlouhodobý přebytek vstupního materiálu, je možné stanici rozšířit vystavením dalšího boxu. [41] [42] [43]

#### Nevýhody

Účinnost rozkladu substrátu je ve většině případů horší než při mokré fermentaci a z toho plynoucí i snížená produkce bioplynu. Při výměně obsahu fermentačního boxu

(naskladňování a vyskladňování) je nutno ho otevřít, tudíž dovnitř vnikne vzduch s kyslíkem a po každém navezení nového substrátu začíná mikrobiální proces od začátku, přičemž produkce bioplynu je zpočátku velmi pomalá. Další nevýhodou je následná nestejná produkce bioplynu a nemožnost ovládnutí průběhu procesu. Nemožná je rovněž homogenizace a míchání obsahu z důvodu absence míchacích zařízení, tím pádem v různých vrstvách materiálu různá teplota. Největší nevýhodou je pravděpodobně malé množství BPS s technologií suché fermentace, tudíž i málo referenčních informací z praxe. [41] [43]

- **Mokrý fermentace**

Metoda mokré fermentace je nejrozšířenější aplikace anaerobního zpracování odpadů a je charakteristická tím, že zpracovává vstupní materiál s nízkým obsahem sušiny, přičemž její horní hranice je určena mezí čerpatelnosti daného materiálu. Nejčastěji bývá obsah sušiny do 12 %. Takto tekutý materiál lze dávkovat jak kontinuálně, tak i semikontinuálně či po dávkách. Předem určená denní dávka lze do reaktoru vpravit v jedné várce, avšak častěji se celková dávka rozděluje do dvou až šesti, dodávaných ve stejných časových intervalech. Jedná se pak o řízené dávkování (dávkuje se čerpadly), které je velmi důležitým faktorem ovlivňujícím produkci bioplynu. Jeho produkce se snižuje při nedostatečném dávkování, přičemž není dostatečně využita kapacita reaktoru. Na druhou stranu, když se reaktor přetíží, dojde k překyselení fermentovaného materiálu a následně i ke zkolabování fermentačního procesu. Oproti suchému materiálu lze tekutý substrát míchat, čehož je samozřejmě využíváno a materiál je uvnitř fermentoru velmi dobře homogenizovaný a jeho teplota je udržována na stabilní hodnotě. Teplota uvnitř fermentoru je udržována na hodnotě určené teplotní oblastí, ve které daná BPS pracuje. Doba zdržení materiálu v reaktoru je přímo závislá na materiálových a procesních parametrech a pohybuje se v rozmezí od 10 do 60 dnů, výjimečně až do 90 dnů. [34] [41] [43]

V BPS pracujících na principu mokré fermentace se často realizuje kofermentace fytomasy s hovězí kejdou. Výhodou společného zpracování těchto dvou materiálů najednou je umožnění udržení stabilizovaného procesu produkce bioplynu, díky pufrační schopnosti kejdy ve směsi, a omezení disfunkcí vzniklých vyšším obsahem čpavku. Fytomasa zajišťuje optimalizaci poměru C:N a pomocí kejdy jsou do substrátu vnášeny živiny nezbytné pro rozvoj mikroflóry. Po smíchání uvedených materiálů a jejich dokonalé homogenizaci se provozní obsah sušiny pohybuje okolo 10 %. [33] [34]

### Výhody

Metoda mokré fermentace je častěji využívána a je historicky více rozšířená a technicky propracovanější. Samotný proces lze dobře kontrolovat a díky kontinuálnímu dávkování je možno dosáhnout vysoké úrovně automatizace, čímž se snižují nároky na množství pracovníků. Díky možnosti společného zpracování tekutých a tuhých materiálů a míchání jich během procesu je zaručena nepřetržitá produkce bioplynu. Fermentace substrátu probíhá výhradně v hermeticky uzavřeném prostředí a veškerý vstupní i výstupní materiál je dopravován potrubím, takže se do okolí neuvolňuje zápach. Díky ustálené teplotě a homogenizaci pomocí míchadel dochází k lepšímu rozkladu. Výstupní produkt je pak dokonale zfermentovaný a nezapáchá. V BPS s mokrou fermentací je dosaženo vyšší bezpečnosti než u těch s fermentací suchou, neboť není potřeba je otevírat při dodávání substrátů – uvnitř reaktoru je totiž z důvodu vysoké koncentrace metanu výbušné prostředí. [35] [41] [43]

### Nevýhody

Z důvodu automatické dopravy substrátů, zajištění kontinuálního či pravidelného plnění, míchání a zpracování digestátu je nutné, aby BPS fungující na principu mokré fermentace obsahovaly čerpadla, míchadla a separátory. Jak jejich samotné pořízení a elektřina k pohonu těchto zařízení, tak i jejich následné údržby a opravy, stojí za zvýšenými náklady na provoz celé BPS. Z těmito zařízeními jde ruku v ruce další mínus, a tím je potřeba odstranění cizorodých materiálů ze vstupů (kamení, fólie, obaly, ...), které by mohly být příčinou vzniku poruchy uvedených zařízení. [35] [43]

Pro anaerobní fermentaci tekutých substrátů jsou potřeba objemné fermentory a z důvodu velkého množství vstupující, a tím pádem i vystupující vody, je nutno rovněž budovat velkoobjemové zásobníky na digestát. Tím se samozřejmě zvyšuje požadavek na celkový zastavěný prostor celé BPS. Častý problém také nastává při rozběhu bioplynové stanice, protože je požadováno vytvoření optimálního poměru mezi obsahem různých rodů fermentujících bakterií. [33]



### 3.3.5.3 Dělení podle způsobu zapojení reaktorů

- **Systemy jednostupňové fermentace**

Jedná se o technologicky nejjednodušší systém, při kterém se bioplyn produkuje za pomoci pouze jednoho fermentoru. V jednostupňových zařízeních nejsou odděleny procesní fáze digesce (hydrolýza, okyselení, vznik kys. octové a metanu), protože všechny probíhají v jediné nádrži. Některé jednostupňové systémy může tvořit i více fermentorů, ale musí být paralelně nebo sériově zapojeny. Stejným znakem systému tohoto charakteru je společný odběr bioplynu a liniový průtok fermentovaného materiálu. [28] [44]

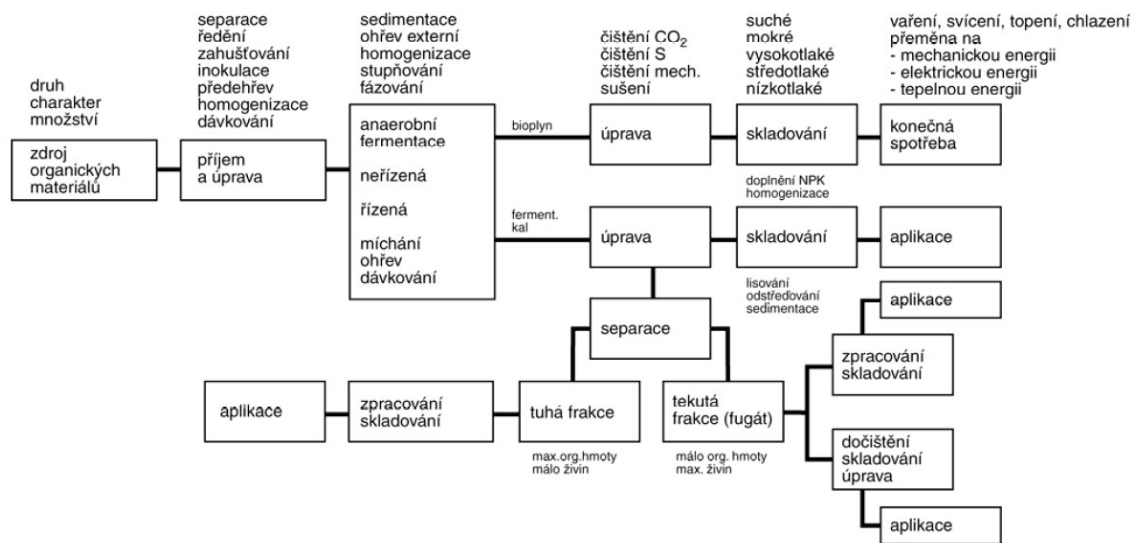
- **Systemy dvou či vícestupňové fermentace**

Při dvou či vícestupňové metodě anaerobní digesce jsou fáze odděleny do minimálně dvou nádrží s odlišným prostředím. Vstupní materiál je vpravován do předfermentoru, kde probíhají acidogenní reakce. Část bioplynu vyrobeného v předfermentoru je pak recyklována a vracena do něj zpět, přičemž zbytek bioplynu probublává do dalších fermentorů, kde probíhají fáze acetogeneze a metanogeneze. Bioplyn, který vystupuje v předfermentoru obsahuje více oxidu uhličitého, případně obsahuje i vodík – z těchto důvodů není možné ho slučovat s bioplynem, který vystupuje z poslední fáze tohoto systému k dalšímu zpracování. [28] [44]

### 3.3.6 Technologické sestavy v BPS

Strojní linka na výrobu bioplynu pomocí anaerobní fermentace může mít více variant. Vzhled linky je ovlivňován druhem zpracovávaného materiálu a nutností jeho úpravy před vstupem do hlavní části BPS – fermentoru. Hlavní struktura bioplynové linky se dělí do čtyř základních částí: příjem a příprava materiálu, anaerobní reaktor, bioplynová koncovka a kalová koncovka. Na obrázku 2. je k nahlédnutí schéma strojní linky pro anaerobní digesci tekutých materiálů. [33]

Obrázek 2 - Schéma strojní linky anaerobní fermentace organických tekutých materiálů [33]



### 3.3.6.1 Příjmová část a úprava materiálů

V úvodu celé linky je prováděna úprava vstupních materiálů. Jsou zde oddělovány nežádoucí materiály jako sklo, kovy a kameny – aby nedošlo k poškození. Dále jsou zde promíchávány různé druhy vstupních surovin za účelem dosažení ideálních materiálových parametrů, tj. poměr uhlíku ku dusíku, obsah sušiny a hodnota pH. Někdy je nutno materiál zahustit nebo naředit, nebo dokonce hygienizovat pomocí tlakové sterilizace. Z příjmových zásobníků pak dochází k dávkování do reaktoru. K této činnosti slouží v případě tekutých materiálů čerpadla, naopak pro dopravu pevných substrátů se používá hermetický šnekový dopravník. [34] [45]

### 3.3.6.2 Fermentor

Fermentor, jinak také označován jako reaktor, digestor nebo vyhnívací nádrž, je nejdůležitější částí BPS a samotného anaerobního procesu, a proto jsou na něj kladeny ty největší nároky, hlavně z důvodu vytvoření co nejvíce ideálního prostředí pro rozvoj mikroorganismů. [33]

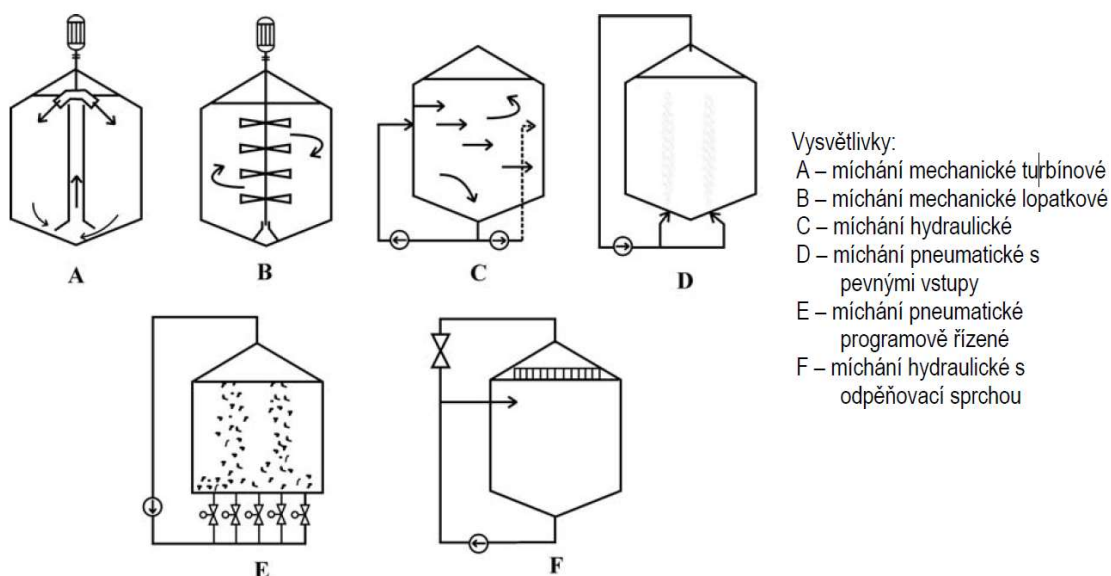
Vyhnívací nádrže pro metodu mokré fermentace jsou nejčastěji budovány z plynotěsného železobetonu a plastu. Dají se dělit podle tvaru na válcové s horizontální osou, které mohou mít objemy do 150 m<sup>3</sup>, výjimečně až do 600 m<sup>3</sup>. Výhodou horizontálních reaktorů je instalace výkonného a úsporného mechanického míchadla, z čehož plyne efektivnější míchání fermentovaného substrátu. Existují ještě válcové se svislou osou, které pak mohou

dosahovat objemů několik tisíc m<sup>3</sup>, za což vděčí své lepší pevnosti. U vertikálních fermentorů dochází k lepšímu poměru objemu a povrchu, díky čemuž se snižují tepelné ztráty a náklady na stavební materiál. Mimo válcových tvarů existují i fermentory kulových, polokulových nebo vejčitých tvarů. [44] [46]

Pro správnou činnost bakterií ve fermentoru je nejdůležitější udržování stabilní teploty. Této skutečnosti lze dosáhnout například horkou vodou, přiváděnou do fermentoru systémem kovových trubek, nevýhodou tohoto systému je však jeho špatné čištění. Zvýšení teploty lze dosahovat také ohříváním vstupních surovin ještě před jejich dopravou do fermentoru. Materiál je ohříván ve výměnících opět horkou vodou ohřívanou například pomocí kogenerační jednotky. [44]

Každý fermentor, ve kterém dochází ke zpracování tekutých materiálů, musí mít míchací zařízení. Tato zařízení mohou být mechanická (míchadla vrtulová, tyčová, lopatková, turbínová), nebo hydraulická či pneumatická. Poslední dvě jmenované se však mohou použít k promíchávání materiálů s maximálním obsahem sušiny 10 %. Na Obrázku 3. jsou znázorněny různé možnosti míchání. [33]

Obrázek 3 - Způsoby míchání materiálu ve fermentoru [33]

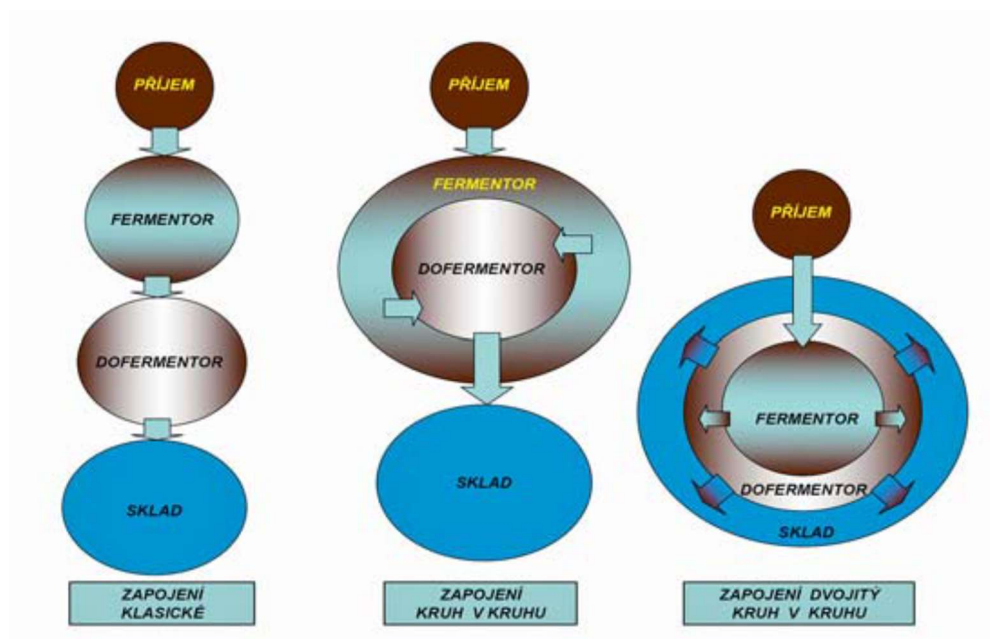


Při volbě míchacího postupu je důležité uvážit spotřebu energie k pohonu míchadel. Míchání nepřetržité, a tedy i nejvíce energeticky a ekonomicky náročné, je používáno jen ve výjimečných případech. Naopak nejčastěji se vyskytující jsou takové způsoby míchání, kdy jsou míchací zařízení v pohonu jen v krátkých periodách a mnohem delších časových úsecích se

s materiálem uvnitř reaktoru nehýbe. Někteří autoři dokonce uvádí, že takovýto způsob je výhodnější, neboť intenzivní a nepřetržité míchání výtěžky plynu vůbec nezvyšuje, ba je tomu podle nich právě naopak. [44]

Z několika fermentorů může být vytvořena i sestava, klasická je tvořena příjmovým zásobníkem, fermentorem a skladovacím zásobníkem. U novějších BPS se můžeme setkat fermentorem s neřízeným procesem, tzv. dofermentorem, který je umístěný za řízeným hlavním fermentorem. Z takového dofermentoru lze získat až 5 – 20 % z celkově vyrobeného bioplynu. Obrázek 4. nám pak ukazuje možnosti zapojení fermentorů. [34]

Obrázek 4 - Možnosti zapojení fermentorů do soustav [34]



### 3.3.6.3 Bioplynová koncovka

Pod pojem bioplynová koncovka se řadí veškeré potrubí, ve kterém je dopravován bioplyn, bezpečnostní zařízení proti zpětnému hoření bioplynu, regulační armatury, kontrolní prvky, dmychadlo, zařízení na čištění bioplynu od vody, oxidu uhličitého, sirovodíku a mechanických nečistot. [15]

Dále sem patří bezpečnostní hořák zbytkového plynu, tzv. fléra, pomocí které je spalován přebytek vytvořeného bioplynu. Důvodem jeho používání je, aby se zabránilo vypouštění surového bioplynu do atmosféry při údržbách nebo poruchách. [33]

Vyprodukovaný bioplyn se dočasně uchovává ve vyrovnávacím zařízení zvaném plynojem, což je vlastně hermeticky uzavřený zásobník, jehož objem může dosahovat i několik

set tisíc m<sup>3</sup>. Účelem plynojemů je vyrovnávat rozdíly mezi výrobou a spotřebou bioplynu. Zdržení bioplynu v plynojemů většinou nepřesahuje 1 den a jeho kapacita je volena právě podle počtu a délek výrobních cyklů. Materiálem plynojemů je nejčastěji gumotextilní fólie, kov, plast, nebo gumotextilní vak umístěný v železobetonové konstrukci. [34] [44]

Plynojemů se rozdělují na vysokotlaké (do 0,5 MPa) a nízkotlaké (do 5 kPa). Vysokotlaké nacházejí využití v případech, kdy je plyn poskytován pro pohon dopravních prostředků nebo do tlakových nádrží, pomocí kterých je plyn přepravován. Lze je také použít k pneumatickému míchání fermentoru, kde se plyn mimo špičku uchová a stlačí v plynojemů a během špičky je pak pod tlakem vpravován do fermentoru. [44]

Výskyt nízkotlakých plynojemů je častější. Starší BPS mohou ještě být vybaveny tzv. mokřými plynojemů, kterými může být rezervoár plynu tvořený ocelovou nebo železobetonovou nádrží a ocelovým zvonem vsazeným dovnitř nádrže a ponořeným do kapaliny – tou bývá nejčastěji voda. Suché plynojemů se konstruují s membránami uzavírajícími plynový prostor. Tyto membránové plynojemů jsou vyráběny jako textilní či plastové vaky, které se kvůli bezpečnosti ukládají do uzavřených ocelových či železobetonových nádob. Často se také používají dvoumembránové plynojemů, kdy je mezi membrány, za účelem dosažení přetlaku a stálého napnutí vnější membrány, vhnán vzduch. [33] [44]

#### 3.3.6.4 Kalová koncovka

Kalová koncovka zpracovává a upravuje zbytek fermentačního procesu, tzv. digestát. Kalová koncovka obsahuje různá potrubí, armatury, čerpadla a separátor. V separátoru se z digestátu oddělí pevná složka (separát) od tekuté (fugát), přičemž separát se ukládá nejčastěji na hromadu a následně se používá ke stlaní pod dobytek a fugát putuje do jímek, odkud je následně rozvážen jako hnojivo na zemědělskou půdu. Tekutou složku je rovněž možno vyčistit pomocí biologicko-chemického procesu a následně ji odvést do vodoteče. [34]

#### 3.3.7 Bioplyn

Bioplynem se nazývá plyn, tvořený směsí několik plynů, mezi nimiž převažuje metan. Je produktem anaerobní fermentace – proces, při kterém dochází za nepřístupu vzduchu k rozkládání organického materiálu (biomasy) působením anaerobních mikroorganismů. Bioplyn vyrobený v BPS je využíván jako palivo do kogeneračních jednotek ke kombinované

výrobě elektřiny a tepla, nebo může být upravován a čištěn na kvalitu zemního plynu a následně sloužit k pohonu dopravních prostředků nebo být vpravován do plynovodu. [34]

Jako palivo se průměrný bioplyn obsahující 60 % metanu charakterizuje následujícími parametry:

- Minimální výhřevnost  $H = 21\,500 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$
- Stechiometrický poměr vzduch – palivo  $5,71 \text{ m}^3_{\text{vzduchu}}\cdot\text{m}^3_{\text{paliva}}$
- Oktanové číslo 130 [33]

Chemicko-fyzikální vlastnosti bioplynu jsou závislé na procesních a materiálových parametrech. Dokonalý bioplyn by obsahoval jen dva hlavní plyny – metan a oxid uhličitý. Metan obvykle tvoří 50 – 75 % část bioplynu, a v ideálním případě je doplněn o 25 – 50 % oxidu uhličitého. Surový bioplyn však v praxi tvoří ještě množství příměsí a dalších minoritních prvků. Ty mohou sloužit jako indikátory některých chemických prvků ve vstupním substrátu nebo na chybu v procesu anaerobní digesce. Koncentrace všech ostatních plynných látek je vždy o více než řád nižší a u kvalitního bioplynu je tato hodnota měřena v nanejvýš desetinách procent. [15] [44]

### 3.3.7.1 Složení a vlastnosti bioplynu

Složení, a tím pádem vlastně kvalita bioplynu, je udávána koncentrací dvou hlavních složek – metanu a oxidu uhličitého. Výrobci se z ekonomického hlediska samozřejmě snaží, aby byl obsah metanu co nejvyšší a aby naopak obsahoval co nejnižší množství oxidu uhličitého. Jaké množství metanu a oxidu uhličitého bude bioplyn obsahovat neovlivňuje pouze druh a kvalita vstupních materiálů, ale také typ fermentoru, teplota fermentace, hodnota pH, skladba bakteriálních kultur a množství dalších okolností. Cílem provozovatelů BPS by měl být takový výstupní bioplyn, jehož hodnota obsahu metanu by byla co nejstabilnější a kolísala pokud možno v rozsahu  $\max \pm 2 \%$  od stabilní hodnoty. Pokud se bude pohybovat ve větším rozmezí, je tím poukazováno na změnu fermentačních podmínek. V případě že koncentrace metanu klesne pod 55 %, můžeme si být skoro jisti, že došlo k technologickému problému, který je nutno řešit. Vysoká koncentrace oxidu uhličitého napovídá, že nebylo dosaženo ideálních podmínek k anaerobní digesci. [34] [44] [47]

Výskyt minoritní složky kyslíku může být, s výjimkou počáteční fáze procesu, způsobena netěsností a zavzdušňováním pracovního prostoru reaktoru. Tento stav se

z hlediska bezpečnosti považuje za nežádoucí, neboť směs metanu a kyslíku vytváří výbušnou směs a v případě vzplanutí by došlo k havárii. V bioplynu se mohou vyskytovat stopy argonu vzdušného původu, amoniaku a oxidu dusného. Výskyt vodíku se neoznačuje za závadu na jeho energetické kvalitě, ale je to známka narušení rovnováhy mezi acidogenní a metanogenní fází. K této skutečnosti může dojít v případě přetížení reaktoru surovým materiálem nebo když je potlačován rozvoj metanogenních bakterií. [15]

### **Vlastnosti bioplynu**

- *Mez zápalnosti*

Za hranici zápalnosti směsi metanu a vzduchu je označována hodnota 5 až 15 % obsahu metanu v celkovém objemu. V případě zmíněné koncentrace můžeme hovořit o dané směsi jako o výbušné. Co se týče zápalné teploty bioplynu tak ta je shodná se zápalnou teplotou metanu – tedy 650 až 750 °C. [33] [34]

- *Výhřevnost*

Hodnota výhřevnosti bioplynu je určena hlavně obsahem metanu v bioplynu. Množství ostatních minoritních hořlavých plynů je v praxi zanedbatelný a jejich energetický význam není uvažován a nepoužívá se při výpočtu. V případě absolutně suchého bioplynu se jeho výhřevnost rovná jeho spalnému teplu (nedochází k výparu vody, z jejíž následné kondenzace by se získalo další teplo). Výhřevnost čistého samotného metanu je 34,3 MJ.m<sup>-3</sup>. Nejnižší hodnotu výhřevnosti podle všech údajů vykazuje bioplyn získaný z fermentace kejdy hovězího dobytka, a to v rozsahu 19,6 – 21 MJ.m<sup>-3</sup> při obsahu metanu okolo 60 %. [33] [34]

- *Korozní vlastnosti*

Za korozi kovových částí technických zařízení v BPS je zodpovědná vysoká vlhkost bioplynu, vyšší koncentrace oxidu uhličitého a určitý vliv má také výskyt sulfanu. Vlhký bioplyn koroduje především lehké slitiny a nelegované oceli, to vše za přítomnosti vzduchu. Sulfan pak způsobuje korozi i v prostředí bez výskytu kyslíku a představuje hrozbu pro slitiny mědi a pro měď samotnou. [44]

## 3.4 Biometan

### 3.4.1 Co je biometan

Biometan, je vyčištěný bioplyn od nežádoucích plynů obsahující alespoň 95 % metanu. Má nejnižší emise skleníkových plynů a v porovnání s ostatními konvenčními biopalivy i nejnižší spotřebu energie v celém životním cyklu, hlavně je-li získáván z odpadní biomasy. Surový bioplyn obsahuje v průměru 50 % objemu metanu. Jeho vyčištěním (odstranění stopových dusíkatých a sirných sloučenin) a upgradingem (proces odstranění majoritních inertních plynů, hlavně oxid uhličitý) je možno vytvořit čistý metan o kvalitě 95 – 99,9 %, v závislosti na použité technologii čištění. Vytvořený biometan, odpovídající kvalitě zemního plynu, pak lze použít jako palivo pro motorové vozidla (bioCNG) nebo může být vháněn do plynárenské sítě. Žádoucí je však i odstranění vodní páry, neboť může způsobovat korozi v potrubí a v zařízeních a při její přítomnosti hrozí i zamrznutí trysek. Mechanické nečistoty jako prach pak zmíněné trysky spalovacích zařízení zanáší. [48]

Norma ČSN 65 6514 uvádí následující kritéria jako základní požadavky na kvalitu čištění bioplynu:

- u CH<sub>4</sub> je třeba zvýšit obsah z 55 % na minimálně 95 % celkového objemu
- u CO<sub>2</sub> je třeba snížit obsah z 33 % na maximálně 2,5 % celkového objemu
- u H<sub>2</sub>S je třeba snížit obsah z více než 100 mg.m<sup>-3</sup> na maximálně 10 mg.m<sup>-3</sup>
- u H<sub>2</sub>O je třeba snížit obsah ze 7 % na maximálně 32 mg.m<sup>-3</sup> [49]

### 3.4.2 Výroba biometanu – možnosti, technologie, technika

Každá metoda čištění bioplynu na biometan má své výhody a nevýhody. Ty jsou závislé na podmínkách v místě produkce bioplynu, na kvalitě bioplynu a surovinách, ze kterých byl vytvořen, na jeho objemu a na mnoha dalších skutečnostech. V následujících podkapitolách jsou uvedeny a následně popsány vybrané používané technologie, na konci pak následuje Tabulka 4. obsahující přehled některých parametrů zmíněných technologií. [49]

#### 3.4.2.1 Adsorpce – metoda střídání tlaků

Oddělení nežádoucích plynů z bioplynu pomocí této metody spočívá v různých molekulárních charakteristikách daných plynů a na afinitě adsorpčního materiálu. Jako adsorbent lze použít uhlíkové molekulové síto, aktivní uhlí, zeolity případně další materiály



s velkým specifickým povrchem. Za vysokého tlaku dochází k adsorpci velkého množství plynů, zatímco snížení tlaku má za následek uvolňování plynů. Metoda střídání tlaků obsahuje čtyři stejně nebo různě dlouhé kroky:

- Adsorpci
- Vyfukování
- Čištění
- Tlakování

Bioplyn stlačený na tlak 0,3 – 1 MPa je vstřikován do adsorpční nádoby, ve které se zadrží oxid uhličitý, dusík, kyslík, voda a sulfan, zatímco vyčištěný biometan, který skrz adsorbér proteče, je odebírán v nejvyšší části kolony při sníženém tlaku. [49]

Výhodou zařízení této metody je jeho kompaktnost, nízké provozní a investiční náklady, vysoká bezpečnost a jednoduchý provoz. Surový bioplyn vystupující z fermentoru lze vyčistit na biometan s obsahem metanu 95 – 98 %. V odpadním proudu však může dojít až ke 4 % ztrátě metanu. [49]

#### 3.4.2.2 Absorpce – vodní vypírka, vypírka organickými rozpouštědly, chemická aminová vypírka

- Vodní vypírka

Princip této metody stojí na separování oxidu uhličitého a sulfanu od zbytku bioplynu, a to díky jejich lepší rozpustnosti ve vodě oproti metanu. Samotná separace probíhá v adsorpčních kolonách, které jsou shora plněny vodou, zatímco zespodu nádoby je přiváděn bioplyn stlačený na 0,5 – 1 MPa. Horem je následně odváděn vyčištěný biometan. Použitá voda je buďto odstraněna z čistícího procesu (to se děje v případě, že voda pocházela z ČOV) nebo je zregenerována, aby bylo možné ji znovu využít. Značnou nevýhodou této metody je obrovská spotřeba vody, nicméně vytvořený biometan obsahuje až 99 % metanu. [49]

- Vypírka organickými rozpouštědly

Tato metoda funguje na stejném principu jako metoda předchozí, ale namísto vody je využíváno organických rozpouštědel. Jako rozpouštědla jsou nejčastěji použity metanol a dimethylétery polyetylenglykolu. Výhoda těchto rozpouštědel, v porovnání s vodou, je ve vyšší

rozpustnosti oxidu uhličitého, a to až 3x. Bohužel tato vlastnost má za následek jejich horší regeneraci. Biometan vyrobený tímto způsobem obsahuje 98 % metanu. [49]

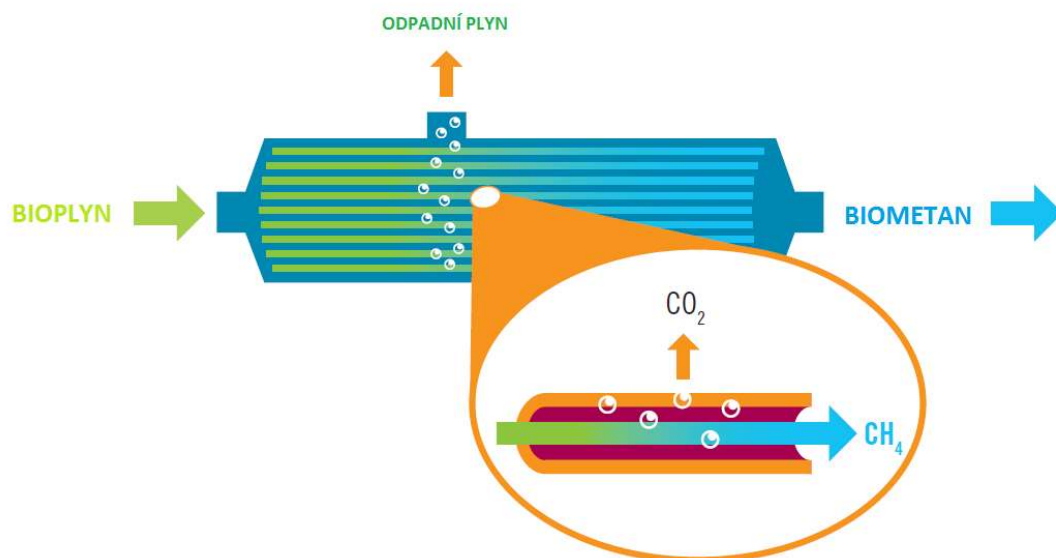
- Chemická aminová vypírka

K chemickým jsou k vázání molekul oxidu uhličitého a sulfanu nejvíce používány vodné roztoky aminů. Hlavní částí sestavy je absorpční jednotka, v níž je za atmosférického tlaku vázán oxid uhličitý exotermickou chemickou reakcí v aminovém rozpouštědle. Roztok pak putuje do stripovací jednotky, kde dochází k jeho regeneraci. Za hlavní nevýhody této metody jsou považovány toxická rozpouštědla, spotřeba energie na regeneraci roztoků, pořizovací náklady samotných rozpouštědel a také jejich ztráty vypařováním. Z těchto důvodů jsou aminové roztoky nahrazovány vodnými alkalickými solnými roztoky, které jsou nákladově levnější. Výsledný biometan může dosáhnout až 99 % čistoty. [49]

### 3.4.2.3 Membránová separace

Metoda membránové technologie je založena na různé průchodnosti molekul membránou. Dle prostupnosti membránou můžeme složky bioplynu seřadit od nejpomaleji pronikajících takto: propan, ethan, metan, dusík, sulfan, oxid uhličitý a sulfan. Poslední tři jmenované látky se díky své rychlé průchodnosti dostanou na druhou, odpadní stranu membrány, zatímco metan, ethan, propan a dusík, které membránou skoro neprocházejí, zůstanou na straně produktů. Odpadní produkty se nazývají permeát, ta část, která zůstala na vstupní straně se nazývá retenát. V tomto procesu je bioplyn stlačen na 0,5 – 2 MPa. Podle separačního média může proces probíhat buďto mokrou nebo suchou technologií. [49] [50]

Obrázek 5 - Zjednodušené schéma membránové separace [49]



Ve vyčištěném biometanu může být i více než 98 % metanu. Tento proces se v posledních deseti letech značně rozvinul. Za tuto dobu se podařilo do značné míry vyřešit počáteční problémy, což byly například vysoké tlakové ztráty s nadměrnou spotřebou energie, velké ztráty metanu, anebo limitovaná životnost použitých membrán. Například pro ochranu membrán se začalo používat sušení a jemné odsíření ještě před vlastní membránovou separací. Výhody této metody tvoří jednoduchost procesu, snížený počet pohyblivých částí, modulární sestava, robustní konstrukce, nízké náklady na energii a údržbu, nezávislost na případné změny složení čistěného bioplynu a možnost přizpůsobení pro menší objemy bioplynu. Membránová separace je také relativně šetrná k životnímu prostředí. [49]

#### 3.4.2.4 Kryogenní separace

Jedná se o nejnovější technologii, která je ve stádiu vývoje a její praktické použití je spíše ojedinělé. Principem je postupné snižování teploty bioplynu, což má za následek oddělení zkapalněného metanu od oxidu uhličitého a od zbytku bioplynu. Kvalita takto získaného produktu odpovídá kvalitou zkapalněnému zemnímu plynu (LNG). Proces separace začíná prvotním sušením a stlačením bioplynu až na 8 MPa s postupným snižováním teploty na  $-110\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Postupně jsou odstraňovány nežádoucí látky, až nakonec zůstane výsledný biometan s obsahem metanu větším než 97 %. Nevýhodami jsou hlavně vysoké pořizovací a provozní náklady, zejména kvůli vysoké energetické náročnosti na chlazení, dále ztráty metanu

a praktické problémy jako je např. ucpávání, způsobené přítomností zbytkových nečistot nebo vyšším obsahem tuhého oxidu uhličitého. [49] [50]

Tabulka 4 - Přehled vybraných parametrů zmíněných technologií [49]

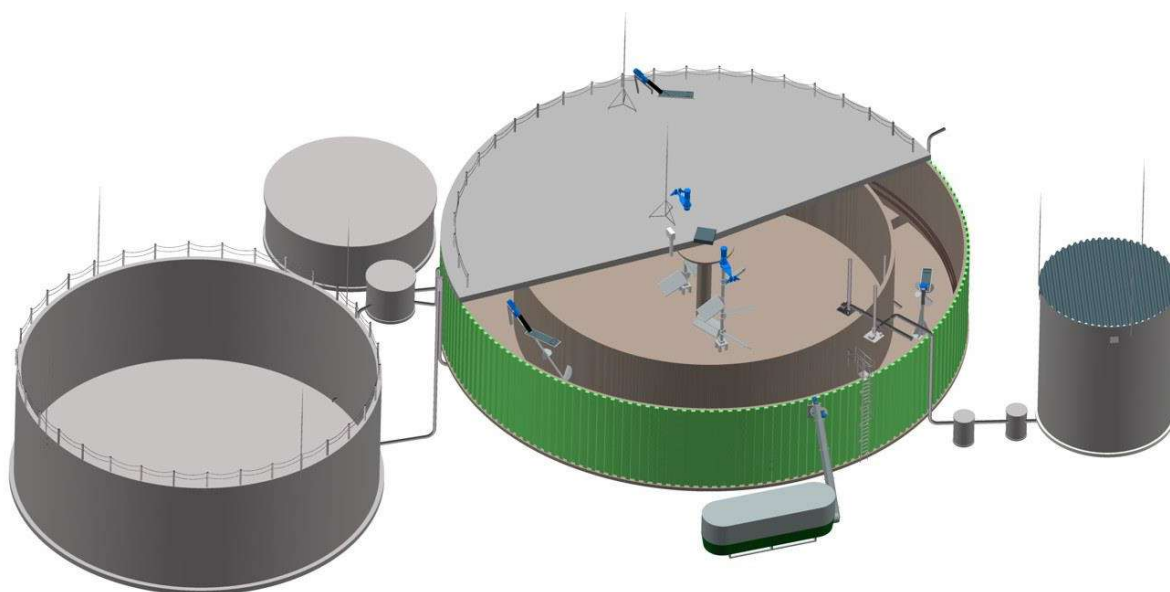
| Parametr                                   | Adsorpce    | Vodní vypírka | Chemická vypírka | Membránová separace                  | Kryogenní separace      |
|--|-------------|---------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Spotřeba el. energie [kWh.m <sup>3</sup> ] | 0,2 – 0,3   | 0,2 – 0,6     | 0,1 – 0,67       | 0,2 – 0,3                            | 0,8 – 1,8               |
| Obsah metanu na výstupu [%]                | 96 – 99     | 96 – 98,5     | 96 – 99          | 95 – 98                              | 97 – 97                 |
| Provozní teplota [°C]                      |             |               | 160              |                                      | - 80                    |
| Provozní tlak [MPa]                        | 0,4 – 0,7   | 0,4 – 0,7     | atmosférický     | vysokotlaké >2<br>nízkotlaké 0,8 - 1 |                         |
| Částečné odstranění sulfanu                | možné       | možné         | ano              | možné                                | možné                   |
| Odstranění kapalné vody                    | kontaminant | ano           | kontaminant      | ne                                   | ano                     |
| Odstranění vodní páry                      | ano         | ne            | ano              | ano                                  | ano                     |
| Odstranění dusíku a kyslíku                | částečně    | ne            | ne               | částečně (O <sub>2</sub> )           | možné (N <sub>2</sub> ) |

## 4 Výchozí podmínky řešení

### 4.1 Popis BPS Krásná Hora nad Vltavou

Vybraná bioplynová stanice, jejímž provozovatelem je ZD Krásná Hora nad Vltavou a.s., se nachází ve městě Krásná hora nad Vltavou v okrese Příbram. BPS byla vybudována v roce 2008 a hlavním účelem její výstavby byl zisk energie z obnovitelných zdrojů ve formě tepla a elektřiny. Bioplynová stanice pracuje na principu mokré dvoustupňové fermentace a vznikající bioplyn spaluje v kogenerační jednotce (KGJ) a následně získává již zmíněné teplo a elektřinu. Na Obrázku 6 můžeme vidět schéma bioplynové stanice. [51]

Obrázek 6 - Schéma bioplynové stanice



Hlavními surovinami jsou kukuřičná siláž, hovězí kejda a senáž. Všechny vstupní suroviny pochází z vlastní výroby podniku, který tak není závislý na dodávkách od vnějších dodavatelů, jak tomu je například u BPS zpracovávajících gastronomický odpad. Vstupní suroviny se dávkuje jednou za dvě hodiny (tedy 12x za den). Celkový obsah sušiny smíchaného vstupního substrátu se pohybuje mezi 8 až 10 %. Uvnitř fermentoru pak dochází k jeho fermentaci, a to v mezofilním procesu při teplotách 38 – 40 °C. Vystupující zfermentovaný substrát (tzv. digestát) se krátkodobě uchovává v zásobní jínce, odkud je několikrát denně čerpán do separátoru. Ten má za úkol z digestátu (obsah sušiny cca 6 %) vyseparovat tuhou část (tzv. separát) a získat kapalnou složku tzv. fugát o obsahu sušiny cca 4 %. Separát je používán ve stájích skotu jako hnojivo a fugát je rozvážen do velkoobjemových jímek, odkud

je poté rozvážen na zemědělskou půdu jako hnojivo. Vyprodukované teplo se používá k ohřevu vody v areálu, k vytápění administrativní budovy a dílen a je také využíváno v sušárně přípravy krmiv. Elektřina je dodávána do veřejné sítě. [51]

Obrázek 7 - Bioplynová stanice Krásná Hora



Tabulka 5 - Popis Obrázku 7 – Bioplynová stanice Krásná Hora

| Číslo | Popis                             | Číslo | Popis                               |
|-------|-----------------------------------|-------|-------------------------------------|
| 1     | Plato na siláž a senáž            | 6     | Rozdělená jímka na digestát a fugát |
| 2     | Zásobní jímka kejdy               | 7     | Separátor                           |
| 3     | Míchač a dávkovač pevných surovin | 8     | Provozní budova s KGJ               |
| 4     | Fermentor                         | 9     | Bezpečnostní hořák                  |
| 5     | Plynojem                          | 10    | Trafostanice                        |

#### 4.1.1 Pohyb substrátů

Jak již bylo uvedeno, vstupní substrát této BPS tvoří směs hovězí kejdy, kukuřičné siláže a travní senáže. Dávkované množství jednotlivých surovin a jejich výnosnost bioplynu a

metanu je uvedena v Tabulce 6. Toto je ovšem jen uvažované množství, skutečné se může lišit a je denně zaznamenáváno v provozním deníku.

Tabulka 6 - Přehled vstupních surovin [51]

| Substrát           | Hmotnost<br>[t.rok <sup>-1</sup> ] | Objem<br>[m <sup>3</sup> .rok <sup>-1</sup> ] | Sušina<br>[%] | Organická<br>sušina [%] | Sušina<br>[t.rok <sup>-1</sup> ] | Organická<br>sušina<br>[t.rok <sup>-1</sup> ] | Bioplyn<br>[m <sup>3</sup> .rok <sup>-1</sup> ] | Metan<br>[m <sup>3</sup> .rok <sup>-1</sup> ] |
|--------------------|------------------------------------|---|---------------|-------------------------|----------------------------------|---|---|---|
| Kejda<br>skotu     | 13 050                             | 13 050  | 10            | 8                       | 1 305                            | 1 044   | 219 240   | 120 582                                       |
| Kukuřičná<br>siláž | 5 900                              | 9 077   | 32            | 30                      | 1 888                            | 1 770   | 566 400   | 311 520                                       |
| Travní<br>senáž    | 2 950                              | 5 364   | 35            | 33                      | 1 033                            | 974   | 292 050   | 160 628                                       |
| <b>Suma</b>        | <b>21 900</b>                      | <b>27 491</b>                                 |               |                         | <b>4 226</b>                     | <b>3 788</b>                                  | <b>1 077 690</b>                                | <b>592 730</b>                                |

#### 4.1.1.1 Dávkovač pevných substrátů

Energetické rostliny jsou ze silážních žlabů dopravovány kolovým čelním nakladačem a zakládány do zásobní nádrže dávkovače. Takto se materiál do zásobní nádrže dopravuje 2x denně. V zásobní nádrži jsou 3 horizontální míchací šneky, které mají za úkol ještě více nařezat siláž a senáž a co nejvíce směs homogenizovat. Materiál se následně pomocí dvou podávacích šneků dostane do fermentoru. Jak již bylo zmíněno, dávkování probíhá 12x denně. [51]

Na Obrázku 8 je zachycena zásobní nádrž na pevné substráty.

Obrázek 8 - Zásobník dávkovače pevných substrátů



#### 4.1.1.2 Příjmová jímka kejdy

Kejda se do příjmové jímky z nejbližších stájí skotu dostává samospádem pomocí podzemního potrubí, případně je ze zásobníků od vzdálenějších stájí přivážena. Kapacita jímky zajišťuje určitou časovou rezervu v případě výpadku dodávky kejdy. Z této jímky je kejda prostřednictvím čerpacího centra dopravována několikrát denně do hlavního fermentoru. [51]

#### 4.1.1.3 Hlavní fermentor

Přísun pevného substrátu do železobetonového fermentoru ve tvaru mezikruží se uskutečňuje šnekem cca 1,5 m pod stálou provozní hladinu. K homogenizaci substrátu a k rovnoměrnému rozložení teploty je prováděno míchání v pravidelných intervalech a také během plnicího procesu pomocí 3 pomaluběžných lopatkových míchadel. Ohřev fermentovaných surovin je zajištěn topným potrubím, umístěným na vnitřní straně vnějšího prstence hlavního fermentoru. Tímto budou vytvořeny ideální podmínky pro pracující mikroorganismy. [51]

Pro upravení technologicky požadovaného obsahu sušiny kvasného substrátu v hlavním fermentoru může být denně přivedena zpátky dílčí část kvasného substrátu z koncového fermentoru centrálním čerpadlem do hlavního fermentoru. [51]



Aby se zabránilo tvorbě plovoucích vrstev a tím pádem ke zvýšenému příkonu míchadla, neměl by překročit obsah sušiny v hlavním fermentoru 10 %. [51]

V hlavním fermentoru se vytváří větší část celkové produkce bioplynu. K zajištění konstantní a přibližně stejné produkce plynu se provádí podávání energetických rostlin vícekrát denně po přibližně stejných dávkách. Jištění proti přetlaku zajišťuje kapalinová pojistka s odfukovou trubicou 3,0 m nad nádrží, přičemž doplňování vodní pojistky se provádí automaticky časově řízeným magnetickým ventilem. Uvnitř fermentoru se nachází příčný sedimentační sběrný kanál, který slouží k zachycování pevných příměsí nebo usazenin. [51]

Hlavní fermentor je k vidění na Obrázku 9.

*Obrázek 9 - Fermentor*



#### 4.1.1.4 Koncový fermentor

Do koncového fermentoru, který je tvořen kruhem uvnitř hlavního fermentoru, se materiál z hlavního fermentoru dostává volně přes přepad, neboť jsou tímto přepadem propojeny. V tomto dofermentoru je homogenizace prováděna dvěma pádlovými míchadly. Dochází zde rovněž k tvorbě bioplynu, avšak již v menším množství, neboť většina byla z odbourávaného organického materiálu uvolněna již v hlavním fermentoru. K přetlakovému jištění zde slouží totožné zařízení jako je na hlavním fermentoru. [51]

Koncový fermentor je součástí fermentoru na Obrázku 9.

#### 4.1.1.5 Separátor

Z koncového fermentoru se přes přepad a potrubí dostává zfermentovaný digestát do dvoukomorové přečerpávací jímky. Ta slouží jak k jímání zmíněného digestátu před separací a také k jímání odseparovaného fugátu. Separace se provádí válcovým separátorem, přičemž dochází k oddělení pevného substrátu, který propadá dolů na hromadu a fugátu, který putuje do přečerpávací jímky. [51]

Obrázek 10 - Válcový separátor



#### 4.1.1.6 Koncový sklad

Koncový sklad je tvořen dvěma jímkami o celkovém objemu 5640 m<sup>3</sup> a umožňují jak uskladnění fugátu, tak i v případě potřeby neseparovaného digestátu. Sklad je dimenzován pro dobu skladování delší než 4 měsíce.

#### 4.1.1.7 Čerpací centrum

V čerpacím centru se nachází propojený potrubní systém spojující různé nádrže v BPS a zajišťuje přesun tekutých materiálů mezi nimi. Slouží k následujícím účelům:

- Plnění hlavního fermentoru čerstvou kejdou z příjmové kejdové jímky
- Přečerpávání prokvašeného substrátu z koncového fermentoru do přečerpávací jímky před separátorem

- Přečerpání mezi nádržemi, resp. Vyprázdnění fermentorů za účelem revize

#### 4.1.2 Plynové hospodářství

##### 4.1.2.1 Úprava plynu

- Odsíření

Bioplyn vzniklý v hlavním fermentoru je v oblasti plynového přechodu obohacován o 0 až 3 % čerstvého vzduchu k odsíření. Toto malé dodané množství vzdušného kyslíku je sirnými bakteriemi spotřebováno k přeměně sirovodíku na elementární síru. Tím je chráněna kogenerační jednotka před zmíněným sirovodíkem a síra zůstává v digestátu jako výživná látka při následném použití digestátu nebo fugátu jako hnojiva.

- Odloučení kondenzátu

K odstranění velké části vody a vodní páry z bioplynu je na nejspodnějším místě plynového potrubí umístěn odlučovač kondenzátu.

##### 4.1.2.2 Plynojem

Bioplyn se z obou, případně jen z jednoho fermentoru, ukládá do nízkotlakého plynojemu, na Obrázku 11, o objemu 445 m<sup>3</sup>. Plynojem je tvořen textilní fólií, umístěnou v železobetonové konstrukci, která ji chrání před vnějšími vlivy. Toto dočasné uskladnění plynu je žádoucí pro vyrovnání kolísání v produkci plynu a tím zabránění častému vypínání a zapínání KGJ, ale také pro překlenutí pravidelných údržeb bez ztráty plynu. [51]

Obrázek 11 - Plynojem



#### 4.1.3 Kogenerační jednotka

V kogenerační jednotce (na Obrázku 12) dochází ke spalování bioplynu. KGJ se skládá z čtyřtakového plynového zážehového motoru s turbodmychadlem vhánějící směs a s generátorem vyrábějící elektrický proud napojeným na jeho hřídel. Spaliny, které vznikly při spalovacím procesu v kogenerační jednotce se odvádějí skrz katalyzátor a tlumič hluku nad střechu budovy, ve které je KGJ umístěna. Jednotka je navržena na celoroční nepřetržitý chod. Parametry stávající kogenerační jednotku jsou uvedeny v Tabulce 7. [51]

Obrázek 12 - KGJ na BPS Krásná Hora



Tabulka 7 - Technické parametry kogenerační jednotky [51]

| <b>KVET Jenbacher JMS 312 GS-B.L.</b> |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| <b>Technický parametr</b>             | <b>Hodnota</b>    |
| Výrobce                               | GE Jenbacher BmBH |
| Typ motoru                            | Zážehový          |
| Výkon                                 | 526 kW            |
| Elektrický výkon                      | 549 kW            |
| Tepelný výkon                         | 580 kW            |
| Elektrická účinnost                   | 40,39 %           |
| Tepelná účinnost                      | 42,89 %           |
| Celková účinnost (využití paliva)     | 83,28 %           |

## 5 Návrh řešení a dosažené výsledky

V praktické části se tato diplomová práce zabývá návrhem zařízení na koncové zpracování bioplynu produkovaného na bioplynové stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Zmíněnou technikou je myšleno takové zařízení, které je schopno vyčistit surový bioplyn na tzv. biometan a následně ho stlačit do nádrží na bioCNG. Pro zemědělský podnik tak vzniká další možnost, jak využívat bioplyn. K jeho stávajícímu využití, kterým je spalování v kogenerační jednotce za účelem výroby elektřiny a tepla, by se tak přidal ještě prodej vyčištěného a stlačeného bioplynu jako palivo pro dopravní prostředky. V následujících odstavcích tak jsou stanoveny vstupní podmínky pro takové zařízení a poté je vybrán dodavatel celé čistící a kompresní technologie. Nakonec následuje ekonomické zhodnocení zmíněné investice.

### 5.1 Analýza složení a množství bioplynu

Pro počáteční výpočty samotného návrhu bylo potřeba zjistit průměrnou kvalitu a hodinovou spotřebu bioplynu produkovaného na bioplynové stanici v Krásné Hoře nad Vltavou. Průměrné hodnoty jsou vypočítány z každodenních měření z průběhu roku 2019, které jsou uvedeny v Příloze.

K prvkové analýze bioplynu bylo využito kontroléru BC20 od firmy CHEMEC GmbH, což je stacionární měřicí přístroj, sloužící k určení koncentrace metanu, oxidu uhličitého, sirovodíku a kyslíku v bioplynu. Pro měření koncentrace metanu a oxidu uhličitého je přístroj BC20 vybaven čidlem tepelné vodivosti, které stanovuje směšovací poměr obou plynů na základě jejich rozdílné tepelné vodivosti. Vzduch, jež je do bioplynu přidáván za účelem odsíření a který by mohl způsobovat nepřesnosti v měření, je zjišťován kyslíkovým čidlem a je zohledněn odpovídajícím způsobem. Ostatní plyny jsou zachycovány elektrochemickými čidly pracujícími jako baterie, avšak pouze s tím rozdílem, že produkují energii pouze v případě přítomnosti příslušného plynu. Přístroj je vybaven dvěma na sobě navzájem nezávislými větvemi – jednu pro kontinuální měření a druhou pro periodické měření. Kontinuálně se měří metan, oxid uhličitý a kyslík a periodicky je měřen sirovodík. Kontinuální měřicí větev přepíná každé 2,5 minuty mezi bioplynem a vzduchem sem a tam. Do vzduchu se přepíná z důvodu hrubé funkční kontroly čidla tepelné vodivosti a kyslíkového čidla. Tímto způsobem se aktualizují naměřené hodnoty metanu, oxidu uhličitého a kyslíku každých 5 minut. Časový

odstup mezi dvěma periodickými měřeními je nastaven na 1 hodinu. V Tabulce 8 jsou vypsány oblasti měření čidel pro sledované plyny. [52]

Tabulka 8 - Oblasti měření čidel [52]

| Plyn          | Oblast měření |
|---------------|---------------|
| Metan         | 0 – 100 Vol%  |
| Oxid uhličitý | 0 – 100 Vol%  |
| Kyslík        | 0 – 20,9 Vol% |
| Sirovodík     | 0 – 2 000 ppm |

Objem spáleného bioplynu je měřen pomocí objemového průtokoměru, který se nachází na vstupním potrubí do kogenerační jednotky.

Z naměřených hodnot byly vybrány jen ty důležité pro další výpočty, tedy obsah metanu a spotřeba bioplynu. Ze zmíněných hodnot pak byly vypočítány průměrné měsíční hodnoty, uvedené v Tabulce 9. Z tabulky je mimo jiné patrné, že zhoršení kvality bioplynu (nižší obsah metanu), má za následek zvýšenou spotřebu plynu – pro stejné množství energie se musí spálit více bioplynu o nižší kvalitě, neboť dojde ke snížení výhřevnosti.

Tabulka 9 – Stanovené průměrné hodnoty kvality a množství bioplynu

| Měsíc          | Průměrný obsah metanu [%] | Průměrná hodinová spotřeba bioplynu [m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> ] |
|----------------|---------------------------|--|
| Leden          | 51,5                      | 270,7  |
| Únor           | 51,3                      | 259,9  |
| Březen         | 51,4                      | 270,8  |
| Duben          | 50,9                      | 277,3  |
| Květen         | 50,9                      | 278,5  |
| Červen         | 49,9                      | 277,2  |
| Červenec       | 49,9                      | 279,1  |
| Srpen          | 51,5                      | 279,4  |
| Září           | 52,4                      | 278,1  |
| Říjen          | 53,4                      | 275,4  |
| Listopad       | 54,6                      | 267,8  |
| Prosinec       | 55,1                      | 258,6  |
| <b>Průměr</b>  | <b>51,9</b>               | <b>272,7</b>   |
| <b>Rozptyl</b> | <b>2,58</b>               | <b>49,3</b>  |

## 5.2 Zvýšení produkce bioplynu

Pro připojení zařízení na čištění a stlačování bioplynu bude nutné zvýšit produkci bioplynu, aby nebyla omezena produkce tepelné a elektrické energie ze stávající kogenerační jednotky. Pro návrh zařízení uvažujme průměrný obsah metanu 51,9 % a průměrnou

hodinovou spotřebu bioplynu v KGJ 272,7 m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>. Na trhu se vyskytují čistící zařízení pro různě velké průtoky bioplynu, pro náš návrh bude počítáno s maximálním průtokem 25 m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup> surového bioplynu. Cílem provozovatelů BPS v Krásné Hoře tedy bude zvýšit produkci bioplynu z průměrných 272,7 m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup> na 297,7 m<sup>3</sup>.hod<sup>-1</sup>. Toho může být docíleno několika způsoby, jako například kvalitnějším promícháváním substrátů nebo jemnějším nařezáváním pevných vstupních surovin. Ročně by pak BPS (při uvažovaném bezproblémovém chodu BPS 23 hodin denně, 365 dní v roce) vyrobila 2 499 192 m<sup>3</sup> namísto současných 2 289 317 m<sup>3</sup>, což je nárůst o 209 875 m<sup>3</sup> – to je objem bioplynu, který by ročně prošel čistící a kompresní stanicí. Při čistotě surového bioplynu 51,9 % a uvažované výstupní čistotě biometanu 96 % by tak bylo ročně vytvořeno 113 464 m<sup>3</sup> biometanu. Hodnota 96 % obsahu metanu v biometanu je z toho důvodu, že přírodní zemní plyn vždy obsahuje také minimálně 96 % metanu. Toto minimální množství je tedy potřeba mít u vyčištěného bioplynu pokud možno stejné, aby mohlo dojít k bezproblémové náhradě zemního plynu. Výhřevnost biometanu se díky odstranění nechtěných příměsí zvýší z hodnoty cca 21 MJ. m<sup>-3</sup>, kterou má bioplyn o obsahu metanu 51,9 %, až na hodnotu 34 MJ. m<sup>-3</sup>.

Pro přehlednost jsou hodnoty produkce bioplynu z předchozího odstavce shrnuty do Tabulky 10.

*Tabulka 10 - Shrnutí produkce bioplynu a biometanu*

| Parametr   | Hodnota                                 |
|--|---|
| Aktuální hodinová produkce bioplynu                      | 272,7 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> |
| Navrhovaná hodinová produkce bioplynu                    | 297,7 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> |
| Aktuální roční produkce bioplynu                         | 2 289 317 m <sup>3</sup>                |
| Navrhovaná roční produkce bioplynu                       | 2 499 192 m <sup>3</sup>                |
| Navrhovaný hodinový průtok zařízením na čištění bioplynu | 25 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup>    |
| Uvažovaná roční produkce biometanu o čistotě 96 %        | 113 464 m <sup>3</sup>                  |

### 5.3 Výběrové řízení na jednotku na čištění bioplynu a kompresní stanici

Byly osloveny dvě firmy zabývající se dodávkou a instalací potřebné technologie. Na základě naměřených a vypočítaných dat byla z jejich strany stanovena přibližná cena za kompletní zařízení, která je spolu s dalšími důležitými parametry, jež jsou důležité pro výběr dodavatele, uvedeny v Tabulce 11. Ve druhém sloupci stejné tabulky je pak uvedeno



maximální množství bodů, které může jednotlivý parametr dostat při subjektivním hodnocení. Ze všech kategorií lze získat 100 bodů.

Tabulka 11 – Posuzované parametry nabídek

| Posuzované parametry                                 | Maximum bodů | Farmtec a.s.                         | Bonett a.s.                          |
|--|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Deklarovaná čistota biometanu                        | 25           | 96 %                                 | 95 %                                 |
| Životnost  | 15           | 6 let                                | 5 let                                |
| Cena   | 15           | 12 120 000 Kč                        | 11 400 000 Kč                        |
| Maximální průtok bioplynu pro velikost dané jednotky | 15           | 25 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> | 25 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> |
| Servis   | 20           | do 24 hodin, 7 dní v týdnu           | pouze pracovní dny                   |
| Provedení  | 10           | kontejnerové provedení               | budova                               |

Jednotlivé parametry byly ohodnoceny patřičným počtem bodů, který je uveden v následující Tabulce 12.

Tabulka 12 - Bodové hodnocení

| Posuzované parametry                                 | Farmtec a.s. | Bonett a.s. |
|--|--------------|-------------|
| Deklarovaná čistota biometanu                        | 23           | 20          |
| Životnost  | 15           | 12          |
| Cena   | 10           | 15          |
| Maximální průtok bioplynu pro velikost dané jednotky | 15           | 15          |
| Servis   | 20           | 12          |
| Provedení  | 10           | 7           |
| <b>Celkem</b>  | <b>93</b>    | <b>81</b>   |

Ve výsledném bodovém hodnocení, uvedeném v Tabulce 12, zvítězila o 12 bodů nabídka firmy Farmtec. Jejich výhodou je vyšší deklarovaná čistota biometanu, která zaručuje vyšší výhřevnost. Lépe na tom je i se zaručenou životností, nicméně zde bude záležet především na provozních podmínkách – čím kvalitnější a důslednější bude průběžná údržba, tím déle vydrží zařízení v plné funkčnosti. Co se týče výše počáteční finanční investice, tak o něco lépe je na tom nabídka firma Bonett. Maximální průtok čištěného bioplynu mají nabídky obou firem stejné, neboť samotný membránový filtr je vytvářen speciálně pro každou zakázku,

a to z důvodů různých podmínek a různého prvkového složení bioplynu v různých zařízeních. V nabízeném servisu jasně vítězí Farmtec. Jejich nespornou výhodou je v tomto případě v tabulce nezmíněná blízkost jejich sídla, a tudíž dobrá dopravní dostupnost. Za nevýhodu je považována nutnost výstavby nové budovy v případě nabídky firmy Bonett, neboť zastavěná plocha by byla jistě větší než v případě kontejnerového provedení, které nabízí Farmtec.

Jako dodavatele jednotky na úpravu bioplynu na kvalitu zemního plynu a kompresní jednotky byla vybrána firma Farmtec a.s., malé vzdálenosti jejich sídla, tudíž dobré rychlosti servisu při problémech. Nespornou, dosud nezmíněnou, výhodou byl při výběrovém řízení i fakt, že samotná bioplynová stanice je vybudována také touto firmou a po celou dobu provozu je jimi servisována, proto se Farmtec jeví jako ideální adept na její další rozšíření.

Zmíněná firma dodá a nainstaluje své zařízení s čistící technologií formou membránové separace, která bude spotřebovávat  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$  bioplynu a vytvářet z něj biometan o obsahu metanu minimálně 96 %. Proces membránového čištění je popsán v kapitole 3.4.2.3. Zařízení je dodáváno formou kontejnerového provedení, nebude tedy potřeba stavět další budovu. Odpadní plyn bude vrácen do potrubí s bioplynem, který poputuje ke spálení v KGJ. Čistý biometan pak bude dopraven do kompresoru, který jej stlačí na tlak 230 bar do zásobníku, skládajícího se z 15 kusů tlakových ocelových lahví o celkovém objemu 2100 litrů, odkud je následně čerpán do zásobníků dopravních prostředků. [53]

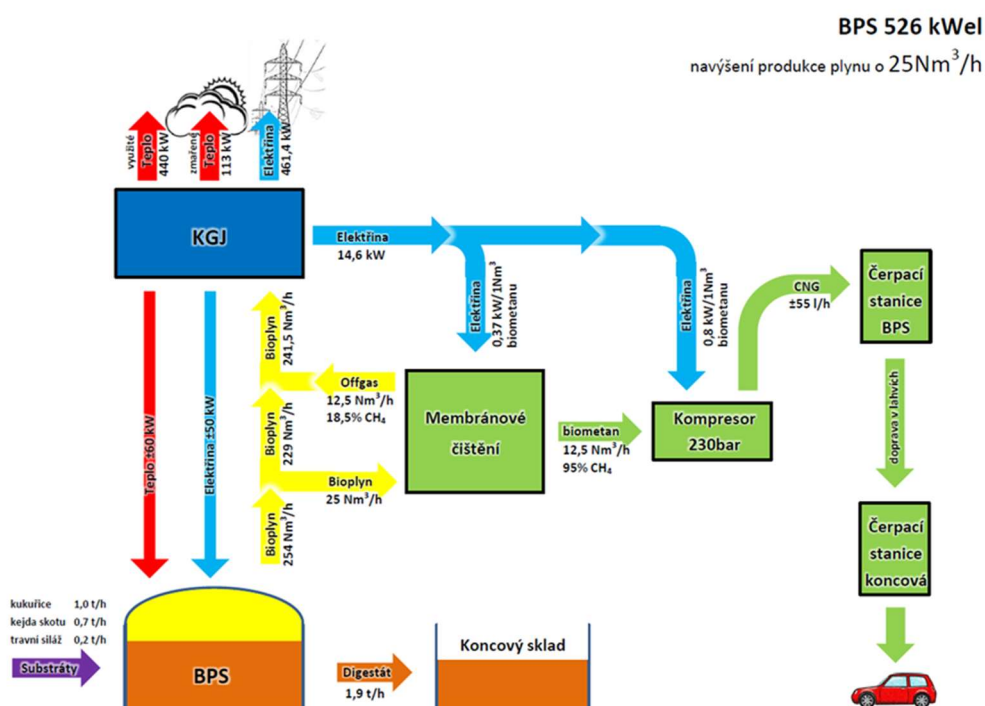
Obrázek 13 zachycuje technologickou sestavu v kontejnerovém provedení.

Obrázek 13 - Technologická sestava [53]



Na obrázku 14 je schématické znázornění procesu od výroby bioplynu po tankování do dopravního prostředku.

Obrázek 14 - Schéma produkce bioCNG [53]



Celkové náklady na kompletní technologii zahrnující čištění a stlačování bioCNG budou 12 120 000 Kč bez DPH (předpokládané ceny jsou 10 140 000 Kč za čisticí stanici a 1 980 000 Kč za kompresní jednotku). Na zařízení je možno v rámci programu „NÍZKOUHLÍKOVÉ

TECHNOLOGIE – Vtláčení bioplynu“ získat podporu až 30 000 000 Kč. Pro svou práci budou uvažovat podporu od státu ve výši 50 % celkové ceny, což odpovídá přesně 6 060 000 Kč. Při rozdělení na určité jednotky to tedy bude 5 070 000 Kč na čisticí stanici a 990 000 Kč na kompresní stanici – tyto dvě hodnoty budou použity v následujících výpočtech.

Tabulka 13 - Parametry navrhované technologie

| Zařízení              | Parametr                       | Hodnota                              |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Čisticí jednotka      | Denní provoz                   | 23 hod                               |
|                       | Roční provoz <sub>dni</sub>    | 365 dní                              |
|                       | Roční provoz <sub>hodiny</sub> | 8 395 hod                            |
|                       | Hodinová spotřeba bioplynu     | 25 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup> |
|                       | Roční spotřeba bioplynu        | 209 875 m <sup>3</sup>               |
|                       | Roční produkce biometanu       | 113 464 m <sup>3</sup>               |
|                       | Výkon kompresoru               | 15 kW                                |
| Kompresorová jednotka | Denní provoz                   | 12 hod                               |
|                       | Roční provoz <sub>dni</sub>    | 365 dní                              |
|                       | Roční provoz <sub>hodiny</sub> | 4 380 hod                            |
|                       | Výkon kompresoru               | 20 kW                                |

#### 5.4 Ekonomické vyhodnocení navrhované technologie

Ekonomické vyhodnocení v první řadě vyžaduje určení ročních nákladů na výrobu bioplynu a nákladů na provoz a servis čisticí jednotky a zařízení na stlačování biometanu. V dalším kroku je potřeba určit předpokládané roční výnosy z prodeje bioCNG.

##### 5.4.1 Náklady

Celkové náklady se skládají z jednotlivých dílčích nákladů spojených s chodem čisticí a kompresní stanice a jsou uvedeny a vypočítány níže. Při následujících výpočtech bylo vycházeno z informací získaných od provozovatele BPS a z aktuálních cen elektřiny a bioCNG. Podkladem pro výpočty dále byla skripta *Ekonomika podniků*. [54] [55] [56]

##### 5.4.1.1 Náklady na produkci 1 m<sup>3</sup> bioplynu

Zjištění této nákladové části bylo z hlediska dostupnosti dat nejjednodušší, neboť je to hodnota, kterou si ZD Krásná Hora nad Vltavou pravidelně určuje. V současnosti je tato částka na úrovni **5,72 Kč.m<sup>-3</sup>**. Je v ní zahrnuta výrobní cena na vstupní substráty a také provozní a režijní náklady.

### 5.4.1.2 Náklady na čištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu na čistotu biometanu a následné stlačování

Tabulka 14 - Výchozí hodnoty pro výpočty nákladů

| Zařízení              | Parametr                       | Značka              | Hodnota                                  |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------|--|
|                       | Cena elektřiny                 | C <sub>el</sub>     | 2,607 Kč.kWh <sub>el</sub> <sup>-1</sup> |
| Čistící jednotka      | Denní provoz                   | Dp <sub>čj</sub>    | 23 hod                                   |
|                       | Roční provoz <sub>dni</sub>    | Rp <sub>d</sub>     | 365 dní                                  |
|                       | Roční provoz <sub>hodiny</sub> | Rp <sub>h.čj.</sub> | 8 395 hod                                |
|                       | Hodinová spotřeba bioplynu     | Sb <sub>h</sub>     | 25 m <sup>3</sup> .hod <sup>-1</sup>     |
|                       | Roční spotřeba bioplynu        | Sb <sub>r</sub>     | 209 875 m <sup>3</sup>                   |
|                       | Roční produkce biometanu       | Pb <sub>r</sub>     | 113 464 m <sup>3</sup>                   |
|                       | Výkon kompresoru               | P <sub>k.čj.</sub>  | 15 kW                                    |
| Kompresorová jednotka | Denní provoz                   | Dp <sub>kj</sub>    | 12 hod                                   |
|                       | Roční provoz <sub>dni</sub>    | Rp <sub>d</sub>     | 365 dní                                  |
|                       | Roční provoz <sub>hodiny</sub> | Rp <sub>h.kj.</sub> | 4 380 hod                                |
|                       | Výkon kompresoru               | P <sub>k.kj.</sub>  | 20 kW                                    |

#### A) Náklady na elektřinu

$$\text{Roční spotřeba el. čisticí jednotky} = R_{p_{h.čj.}} \cdot P_{k.čj.}$$

$$\text{Roční spotřeba el. č.j.} = 8\,395 \cdot 15$$

$$\text{Roční spotřeba el. č.j.} = \underline{125\,925 \text{ kWh}}$$

$$\text{Roční náklady na el. č.j.} = \text{Roční spotřeba el.} \cdot C_{el}$$

$$\text{Roční náklady na el. č.j.} = 125\,925 \cdot 2,607$$

$$\text{Roční náklady na el. č.j.} = \underline{328\,286 \text{ Kč}}$$

$$\text{Roční spotřeba el. kompresní jednotky} = R_{p_{h.kj.}} \cdot P_{k.kj.}$$

$$\text{Roční spotřeba el. k.j.} = 4\,380 \cdot 20$$

$$\text{Roční spotřeba el. k.j.} = \underline{87\,600 \text{ kWh}}$$

$$\text{Roční náklady na el. k.j.} = \text{Roční spotřeba el.} \cdot C_{el}$$

$$\text{Roční náklady na el. k.j.} = 87\,600 \cdot 2,607$$

$$\text{Roční náklady na el. k.j.} = \underline{228\,373 \text{ Kč}}$$

#### B) Náklady na údržbu

Údržbě každému zařízení je dle dodavatele technologie potřeba věnovat odhadem hodinu denně. Hodinové náklady na údržbu jsou stanoveny na 100 Kč.

Roční náklady na údržbu č.j. =  $R_{pd} * \text{Hodinové náklady na údržbu}$

Roční náklady na údržbu č.j. =  $365 * 100$

Roční náklady na údržbu č.j. = **36 500 Kč**

Roční náklady na údržbu k.j. =  $R_{pd} * \text{Hodinové náklady na údržbu}$

Roční náklady na údržbu k.j. =  $365 * 100$

Roční náklady na údržbu k.j. = **36 500 Kč**

### **C) Náklady na opravy a servisní zásahy**

Roční náklady byly po konzultaci s vedením BPS a dodavatelem předběžně stanoveny na **50 000 Kč** na čisticí jednotku a **40 000 Kč** na kompresní jednotku. Skutečné částky budou ovšem záviset na mnoha faktorech (důslednost při údržbě, výrobní vady na technologii, nečistoty v bioplynu) a lze je stěží dopředu odhadnout. Teoreticky je však možné je držet co nejnižší, pokud bude obsluha dbát na důkladnou údržbu a starat se o zařízení podle pokynů dodavatele.

### **D) Roční odpisy zařízení**

Předpokládané vlastní investiční náklady vychází z výše podpory od státu, kterou jsme stanovili na 50 %. Byl zvolen lineární účetní odpis s dobou odpisování 10 let.

#### Čisticí jednotka

$$\text{Roční odpis č.j.} = \frac{\text{vlastní náklady na č.j.}}{\text{doba odpisování}}$$

$$\text{Roční odpis č.j.} = \frac{5\,070\,000}{10}$$

$$\text{Roční odpis č.j.} = \mathbf{\underline{507\,000\,Kč}}$$

#### Kompresní jednotka

$$\text{Roční odpis k.j.} = \frac{\text{vlastní náklady na k.j.}}{10}$$

$$\text{Roční odpis k.j.} = \frac{990\,000}{10}$$

$$\text{Roční odpis k.j.} = \mathbf{\underline{99\,000\,Kč}}$$

### **E) Suma ročních provozních nákladů**

Celkovou roční nákladovou částku za určitá zařízení získáme součtem jednotlivých nákladů uvedených v předchozích odstavcích **A)** až **D)**.

$$\Sigma \text{ ročních provozních nákladů na č.j.} = 328\,286 + 36\,500 + 50\,000 + 507\,000$$

$\Sigma$  ročních provozních nákladů na č.j. = **921 786 Kč.rok<sup>-1</sup>**

$\Sigma$  ročních provozních nákladů na k.j. = 228 373 + 36 500 + 40 000 + 99 000

$\Sigma$  ročních provozních nákladů na k.j. = **403 873 Kč.rok<sup>-1</sup>**

Tabulka 15 - Shrnutí nákladů na čištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu a následnou kompresi

| Druh nákladu                     | Hodnota    |
|----------------------------------|------------|
| <b>Čistící jednotka</b>          |            |
| Roční náklady na elektřinu       | 328 286 Kč |
| Roční náklady na údržbu          | 36 500 Kč  |
| Roční náklady na opravy a servis | 50 000 Kč  |
| Roční odpis zařízení             | 507 000 Kč |
| Celkové roční provozní náklady   | 921 786 Kč |
| <b>Kompresní jednotka</b>        |            |
| Roční náklady na elektřinu       | 228 373 Kč |
| Roční náklady na údržbu          | 36 500 Kč  |
| Roční náklady na opravy a servis | 40 000 Kč  |
| Roční odpis zařízení             | 99 000 Kč  |
| Celkové roční provozní náklady   | 403 873 Kč |

#### F) Náklady na vyčištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu

Náklady na vyčištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu =  $\frac{\Sigma \text{ ročních provozních nákladů na č.j.}}{\text{roční spotřeba bioplynu}}$

Náklady na vyčištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu =  $\frac{921\,786}{209\,875}$

Náklady na vyčištění 1 m<sup>3</sup> bioplynu = **4,39 Kč.m<sup>-3</sup>**

#### G) Náklady na stlačení 1 m<sup>3</sup> biometanu

Náklady na stlačení 1 m<sup>3</sup> biometanu =  $\frac{\Sigma \text{ ročních provozních nákladů na k.j.}}{\text{roční produkce biometanu}}$

Náklady na stlačení 1 m<sup>3</sup> biometanu =  $\frac{403\,873}{113\,464}$

Náklady na stlačení 1 m<sup>3</sup> biometanu = **3,56 Kč.m<sup>-3</sup>**

#### 5.4.1.3 Náklady na 1 m<sup>3</sup> a na 1 kg biometanu

Tabulka 16 - Souhrn jednotkových nákladů

| Druh nákladu                  | Značka          | Hodnota                 |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------|
| Náklady na výrobu bioplynu    | N <sub>vb</sub> | 5,72 Kč.m <sup>-3</sup> |
| Náklady na vyčištění bioplynu | N <sub>čb</sub> | 4,39 Kč.m <sup>-3</sup> |
| Náklady na stlačení biometanu | N <sub>sb</sub> | 3,56 Kč.m <sup>-3</sup> |

$$\text{Náklady na } 1 \text{ m}^3 \text{ biometanu} = N_{vb} + N_{\text{čb}} + N_{sb}$$

$$\text{Náklady na } 1 \text{ m}^3 \text{ biometanu} = 5,72 + 4,39 + 3,56$$

$$\text{Náklady na } 1 \text{ m}^3 \text{ biometanu} = \underline{\underline{13,67 \text{ Kč.m}^{-3}}}$$

Měrnou hmotnost bioCNG uvažuji stejnou jako má klasický CNG, tedy  $0,7 \text{ kg.m}^{-3}$ . [57]

$$\text{Náklady na } 1 \text{ kg biometanu} = \frac{\text{náklady na } 1 \text{ m}^3 \text{ biometanu}}{\text{hustota CNG}}$$

$$\text{Náklady na } 1 \text{ kg biometanu} = \frac{13,67}{0,7}$$

$$\text{Náklady na } 1 \text{ kg biometanu} = \underline{\underline{19,52 \text{ Kč.kg}^{-1}}}$$

#### 5.4.2 Očekávaný roční zisk

Pro výpočet bylo nutné zjistit prodejní cenu za 1 kilogram biometanu neboli bioCNG. Ta se v současnosti pohybuje na hodnotě  $27,45 \text{ Kč.kg}^{-1}$  (průměrná cena na čerpacích stanicích v ČR v době řešení této DP). Po odečtení 21 % DPH (spotřební daň není zahrnuta, neboť je od ní biometan osvobozen) bude konečná hodnota **21,68 Kč.kg<sup>-1</sup>**. Toto je poslední hodnota potřebná ke zjištění celkového čistého zisku z 1 kilogramu bioCNG. [58] [59]

$$\text{Čistý zisk z } 1 \text{ kg bioCNG} = \text{Cena za } 1 \text{ kg bioCNG po zdanění} - \text{Náklady na } 1 \text{ kg bioCNG}$$

$$\text{Čistý zisk z } 1 \text{ kg bioCNG} = 21,68 - 19,52$$

$$\text{Čistý zisk z } 1 \text{ kg bioCNG} = \underline{\underline{2,16 \text{ Kč}}}$$

Pro výpočet ročního zisku musíme převést roční produkci biometanu z objemu, který je  $113\,464 \text{ m}^3$ , na hmotnost – opět pomocí hustoty  $0,7 \text{ kg.m}^{-3}$

$$\text{Roční zisk} = \text{Roční produkce biometanu} * \text{hustota biometanu} * \text{Čistý zisk z } 1 \text{ kg bioCNG}$$

$$\text{Roční zisk} = 113\,464 * 0,7 * 2,16$$

$$\underline{\underline{\text{Roční zisk} = 171\,557 \text{ Kč}}}$$

Inovaci bioplynové stanice, spočívající v rozšíření o jednotky na čištění bioplynu pomocí technologie membránové separace a následné stlačování a čerpání do dopravních prostředků, lze považovat za ekonomicky výhodnou, neboť roční zisk vyšel kladně ve výši 171 557 Kč.



## 6 Diskuse a závěry

Cílem mé diplomové práce bylo informování o problematice zpracování biologicky rozložitelných materiálů pomocí metody anaerobní fermentace a seznámení s metodami čištění bioplynu na čistotu zemního plynu.

Dalším cílem bylo popsání vybrané referenční bioplynové stanice, kterou byla zvolena bioplynová stanice v Krásné Hoře nad Vltavou, situovaná v oblasti Středního Povltaví. Jedná se o bioplynovou stanici o celkovém výkonu 526 kW zpracovávající hovězí kejdu, kukuřičnou siláž a travní senáž. Všechny vstupní substráty vznikají ve stejném podniku, který vlastní zmíněnou bioplynovou stanici. Vytvořený bioplyn je spalován v kogenerační jednotce za účelem zisku elektrické energie a tepla. Tepelná energie je využívána k ohřevu materiálu uvnitř fermentoru, k vytápění budov a ohřevu vody v areálu zemědělského podniku a v sušárně na krmiva. Elektrická energie je z části spotřebovávána k pohonu technologických zařízení v bioplynové stanici, převážná část je však dodávána do sítě.

Cílem praktické části a zároveň hlavním cílem práce bylo navržení inovace pro koncovou úpravu a využití bioplynu jako paliva pro motorová vozidla. Navržená technologie spočívá v čištění vytvořeného bioplynu pomocí metody membránové separace, při které se oddělí energeticky žádoucí metan od ostatních „znečišťujících“ látek. Tímto způsobem vznikne plyn nazývaný biometan, který obsahuje minimálně 96 % čistého metanu. Tento plyn je kvalitou a vlastnostmi srovnatelný se zemním plynem, který se běžně získává z podzemí. Biometan je po následném stlačení na bioCNG možno prodávat jako palivo pro motorová vozidla s pohonem na CNG.

Na základě měření na bioplynové stanici z průběhu roku 2019 byla vypočtena průměrná hodnota obsahu metanu 51,9 %. Dále bylo navrženo navýšení produkce bioplynu o  $25 \text{ m}^3 \cdot \text{hod}^{-1}$ , což je průtok, který bývá maximální pro určitou velikost čistících jednotek s membránovou separací. Uvedené dvě hodnoty byly rozhodující pro výši cenových nabídek, o které byly požádány dvě firmy. Z dvou získaných nabídek od firem, které se zabývají dodávkou navržené technologie, byla zvolena ta od firmy Farmtec, v celkové výši 12 120 000 Kč. Jako důvody volby této firmy, a tedy její výhody, byly uvedeny vyšší deklarovaná čistota vyčištěného bioplynu a nabízený servis, který je schopen dorazit do 24 hodin kterýkoliv den v týdnu. Výhodou je dále také fakt, že stávající BPS byla vystavena touto firmou a že její sídlo

je geograficky blízko, tudíž náklady na dopravu servisních techniků budou nižší. Na základě poskytnuté cenové nabídky bylo provedeno ekonomické zhodnocení investice s kladným ročním ziskem ve výši 171 557 Kč. Na pořízení technologického zařízení byla uvažována 50 % podpora od státu, která činila celkem 6 060 000 Kč, tato částka by se však v případě skutečné investice mohla lišit, neboť stát na stlačování biometanu nabízí podporu až do výše 30 000 000 Kč. V optimistickém případě, kdy od státu bude obdržena dotace v hodnotě vyšší, než je polovina celkové sumy investice, by se pak roční zisk samozřejmě zvýšil. Za velkou výhodu rovněž považuji osvobození paliva vzniklého z biometanu od spotřební daně, neboť při jejím zavedení by se provoz navrženého zařízení stal méně ziskovým, v případě vysoké spotřební daně možná až ztrátovým.

Na podzim roku 2019 byla v Rapotíně u Brna spuštěna první výrobní biometanu na území České republiky. Jejich bioplynová stanice zpracovává na rozdíl od té v Krásné Hoře nad Vltavou veškerý biologicky rozložitelný odpad, což je pro ně výhodou v případě nedostatku některého druhu materiálu – lze ho jednoduše nahradit větším množstvím jiných. Jejich další nespornou výhodou je, že mají možnost vytvořený biometan o čistotě zemního plynu dodávat do distribuční sítě zemního plynu. Odběr biometanu je tak v jejich případě kontinuální. [60]

Domnívám se, že cestou pro větší rozšíření výroby biometanu v České republice je již dříve zmíněná, a v mém návrhu inovace využitá, finanční podpora od státu, ale samozřejmě také větší poptávka po CNG a bioCNG pro pohon motorových vozidel. Těch po českých silnicích jezdí zatím pouze něco přes 20 000, a to je ze 7,6 milionů, což je celkový počet registrovaných vozidel všech kategorií v Česku, pouze nepatrné množství.

## 7 Citovaná literatura

- [1] SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2009/28/ES o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES [online]. 2009. Brusel: ., 2009, **2009** [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028&from=EN>
- [2] EBA, . EBA Annual Report 2018. *EBA* [online]. 2018 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.europeanbiogas.eu/eba-annual-report-2018/>
- [3] EUROSTAT, . Renewable energy statistics. *Eurostat - Statistics Explained* [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics#Renewable\\_energy\\_produced\\_in\\_the\\_EU\\_increased\\_by\\_two\\_thirds\\_in\\_2007-2017](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics#Renewable_energy_produced_in_the_EU_increased_by_two_thirds_in_2007-2017)
- [4] ČTK, . EU zvýšila podíl zelené energie za 14 let o polovinu na 17,5 procenta. Česko je mezi jedenácti zeměmi, které splnily svůj cíl pro rok 2020. *Hospodářské noviny* [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://byznys.ihned.cz/c1-66475590-v-eu-vzrostl-podil-obnovitelne-energie-v-roce-2017-cinil-17-5-procenta-cesku-se-uz-podarilo-dosahnout-sveho-energetickeho-cile>
- [5] VAVERKOVÁ, Jana. Pozice obnovitelných zdrojů energie v energetické bilanci České republiky (1). *Tzbinfo* [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/19358-pozice-obnovitelnych-zdroju-energie-v-energeticke-bilanci-ceske-republiky-1>
- [6] CZBA, . Statistiky výroby bioplynu. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2017 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/statistiky-vyroby-bioplynu.html>
- [7] EPET, . Bude zemní plyn nahrazen ekologickým biometanem i v českých domácnostech?. *EPET* [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z:

[https://www.epet.cz/bude-zemni-plyn-nahrazen-ekologickym-biometanem-i-v-ceskych-domacnostech-/](https://www.epet.cz/bude-zemni-plyn-nahrazen-ekologickym-biometanem-i-v-ceskych-domacnostech/)

- [8] CZBA, . První bioplynka dodává biometan do sítě. Česko chystá podporu. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/aktuality/prvni-bioplynka-dodava-biometan-do-site-cesko-chysta-podporu.html>
- [9] Zákon č. 185/2001 Sb. Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2001 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [10] Vyhláška č. 93/2016 Sb. Vyhláška o Katalogu odpadů. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2016 [cit. 2019-11-14]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2016-93#p3>
- [11] Nařízení vlády č. 352/2014 Sb. Nařízení vlády o Plánu odpadového hospodářství České republiky pro období 2015–2024. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2014 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2014-352>
- [12] Vyhláška č. 341/2008 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2008 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-341>
- [13] Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2012 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>
- [14] Zákon č. 458/2000 Sb. Zákon o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů (energetický zákon). *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2000 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-458>
- [15] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa - obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004. ISBN 80-86534-06-5.

- [16] VOBOŘIL, David. Biomasa - využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR. *Oenergetice* [online]. 2017 [cit. 2019-11-15]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/>
- [17] BECHNÍK, Bronislav. Biomasa - definice a členění. *Tzbinfo* [online]. 2009 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [18] VÁŇA, Jaroslav a Sergej USŤAK. *Využití odpadů a surovin ze zemědělského provozu k výrobě bioplynu*. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor s.r.o., 2010. ISBN 978-80-86832-49-4.
- [19] Biomass explained. *U.S. Energy Information Administration* [online]. 2018 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
- [20] Bioenergy conversion technologies. *Food and Agriculture Organization of the United Nations* [online]. [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <http://www.fao.org/3/T1804E/t1804e06.htm>
- [21] CZ BIOM, . Výtěžnost bioplynu z jednotlivých materiálů. *Biom.cz* [online]. 2015 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyteznost-bioplynu-z-jednotlivych-materialu>
- [22] HEROUT, M., J. MALAŤÁK, L. KUČERA a T. DLABAJA. Biogas composition depending on the type of plant biomass used. *Research in Agricultural Engineering* 57(4), pp. 137 - 143. *Czech Academy of Agricultural Sciences* [online]. 2011 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: [https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/41\\_2010-RAE.pdf](https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/41_2010-RAE.pdf)
- [23] MARTÍNEZ-GUTIÉRREZ, Emir. Biogas production from different lignocellulosic biomass sources: advances and perspectives. *3 Biotech* [online]. 2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5928011/pdf/13205\\_2018\\_Article\\_1257.pdf](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5928011/pdf/13205_2018_Article_1257.pdf)

- [24] Vyhláška č. 477/2012 Sb., o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů pro výrobu elektřiny, tepla nebo biometanu a o stanovení a uchování dokumentů. *Zákony pro lidi.cz* [online]. 2012 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-477>
- [25] SLADKÝ, Václav. Fytopaliva - obnovující se zdroj energie (I). *Tzbinfo* [online]. 2001 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/658-fytopaliva-obnovujici-se-zdroj-energie-i>
- [26] VALEČKO, Zdeněk. Odpadní biomasa – perspektivní zdroj energie. *ODPADY* [online]. 2004 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/odpadni-biomasa-perspektivni-zdroj-energie/>
- [27] ZEMÁNEK, Pavel. *Biologicky rozložitelné odpady a kompostování*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, 2010. ISBN 978-80-86884-52-3.
- [28] CZ BIOM, . *Průvodce výrobou a využitím bioplynu* [online]. 2009 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: [https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce\\_vyrobou\\_vyuzitim\\_bioplynu\\_2.pdf](https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu_2.pdf)
- [29] MŽP, . Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplynky.pdf>
- [30] ALTMANN, Vlastimil. Nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. *Biom.cz* [online]. 2010 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-biologicky-rozlozitelnymi-odpady>
- [31] DOHÁNYOS, Michal. Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů. *Biom.cz* [online]. 2006 [cit. 2019-11-16]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>
- [32] Možnosti energetického využití biomasy. *Eagri.cz* [online]. Praha: Ministerstvo zemědělství, 2013 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z:

[http://eagri.cz/public/web/file/283371/Moznosti\\_energetickeho\\_vyuziti\\_biomasy.pdf](http://eagri.cz/public/web/file/283371/Moznosti_energetickeho_vyuziti_biomasy.pdf)

- [33] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. *Zpracování biologicky rozložitelných odpadů*. Praha: Powerprint, 2008. ISBN 978-80-213-1747-5.
- [34] PASTOREK, Zdeněk. *Bioplyn - Obnovitelná energie z biomasy*. Praha: Profi Press, 2012.
- [35] BIOPROFIT, . Anaerobní technologie. *Bioplyn.cz* [online]. 2007 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: [http://www.bioplyn.cz/at\\_popis.htm](http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm)
- [36] ZAFAR, Salman. Biogas Feedstock in the Middle East. *EcoMENA* [online]. 2018 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://www.ecomena.org/potential-biogas-feedstock-in-middle-east/>
- [37] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Význam cíleně pěstovaných energetických plodin. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyznam-cilene-pestovanych-energeticky-plodin>
- [38] MUŽÍK, Oldřich a Jaroslav KÁRA. Možnosti výroby a využití bioplynu v ČR. *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2019-11-20]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznost-vyroby-a-vyuziti-bioplynu-v-cr>
- [39] DOHÁNYOS, Michal. Anaerobní reaktor není černou skřínkou - teoretické základy anaerobní fermentace. *Biom.cz* [online]. 2008 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>
- [40] MATĚJKA, Jan a A KOLEKTIV. Studie využití bioplynu pro energetickou bezpečnost a rozvoj obcí a mikroregionů. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2014 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/Studie%20-%20BioReg.pdf>

- [41] ŠKORVAN, Ondřej. Suchou, nebo mokrou fermentaci?. *ODPADY* [online]. 2012 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://www.odpady-online.cz/suchou-nebo-mokrou-fermentaci/>
- [42] KARAFIÁT, Zbyšek, Tomáš VÍTĚZ a Lukáš POSPÍŠIL. Bioplynové stanice na „suchou“ fermentaci – šance pro energetické využití biologicky rozložitelných odpadů (BRO). *Biom.cz* [online]. 2009 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynovye-stanice-na-suchou-fermentaci-sance-pro-energeticke-vyuziti-biologicky-rozlozitelnych-odpadu-bro>
- [43] ERNST & YOUNG, . Analýza potenciálu energetického využití odpadů v ČR včetně ekonomického a regionálního vyhodnocení. *Mzp* [online]. 2015 [cit. 2019-11-30]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty\\_po8\\_opzp\\_2007\\_2013/\\$FILE/OODP-4\\_3\\_MZP\\_FIN-20160810.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/projekty_po8_opzp_2007_2013/$FILE/OODP-4_3_MZP_FIN-20160810.pdf)
- [44] STRAKA, František. *Bioplyn - příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. Praha: GAS s.r.o., 2003. ISBN 80-7328-029-9.
- [45] ALTMANN, Vlastimil, Petr VACULÍK a Miroslav MIMRA. *Technika pro zpracování komunálního odpadu*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2010. ISBN 978-80-213-2022-2.
- [46] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6.
- [47] MICHAL, Petr. Bioplyn - energie ze zemědělství. *Biom.cz* [online]. 2005 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: [https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplyn\\_energie\\_ze\\_zemedelstvi.pdf](https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplyn_energie_ze_zemedelstvi.pdf)
- [48] CZBA, . Biometan jako palivo budoucnosti?. *Česká bioplynová asociace* [online]. 2014 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/aktuality/biometan-jako-palivo-budoucnosti.html>



- [49] JERÁBKOVÁ, Julie. Metody čištění bioplynu na biometan. *Biom.cz* [online]. 2019 [cit. 2019-12-04]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/metody-cistení-bioplynu-na-biometan>
- [50] ŽÁKOVEC, Jan. *BIOMETAN hospodárné užití obnovitelných zdrojů energie* [online]. Praha: GAS s.r.o., 2012 [cit. 2019-12-06]. ISBN 978-80-7328-276-9. Dostupné z: <https://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595e1fa66875530f33e8a/2201-gas-s.r.o.-biometan.pdf>
- [51] RUDA, Petr. *Souhrnná technická zpráva bioplynové stanice Krásná Hora*. Jistebnice: FARMTEC a.s., 2007.
- [52] CHEMEC GMBH, . *Kontrolér bioplynu BC20 - Provozní návod*. 2007.
- [53] FARMTEC A.S., . *BioCNG* [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.farmtec.cz/biocng-833.html>
- [54] Ceníky. *Skupina ČEZ* [online]. 2020 [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/firmy/cs/podpora/ceniky.html>
- [55] CNG+, . Srovnání cen paliv. *CNG+* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/srovnani-cen.html>
- [56] ROŠCHATECKÁ, Eva. *Ekonomika podniků*. 1. Česká zemědělská univerzita v Praze, 2014. ISBN 978-80-213-2502-9.
- [57] UNITROVE, . Compressed Natural Gas (CNG). *Unitrove* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <https://www.unitrove.com/engineering/gas-technology/compressed-natural-gas>
- [58] ASOCIACE NGV, . O CNG. *NVGA* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://www.ngva.cz/o-cng/>
- [59] CNG+, . Legislativa. *CNG+* [online]. [cit. 2020-01-26]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/o-cng/legislativa.html>

[60] *EFG Rapotín* [online]. b.r. [cit. 2020-01-28]. Dostupné z: [https://www.efg-  
rapotin.cz/](https://www.efg-rapotin.cz/)