



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

NOVÉ TECHNOLOGIE PRO EFEKTIVNÍ PROVOZ BIOPLYNOVÝCH STANIC

NEW TECHNOLOGIES FOR AN EFFICIENT OPERATION OF BIOGAS PLANTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marcela Uhlířová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Studentka:	Marcela Uhlířová
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Mgr. Ing. Marek Vondra, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nové technologie pro efektivní provoz bioplynových stanic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bioplynové stanice (BPS) jsou plně obnovitelnými zdroji energie, které naplňují koncepci tzv. „cirkulární ekonomiky“, jež udržuje funkční a zdravé vztahy mezi přírodou a lidskou společností. BPS zpracovávají odpady přírodního původu a produkují elektřinu, teplo a hnojivé látky, které lze využít jako náhradu za syntetická hnojiva. Investice do nových BPS je nicméně stále poměrně nákladná a neobejde se bez státní podpory. Zavedení nových technologií a postupů by mohlo tuto situaci změnit a přispět k dalšímu rozšíření BPS.

Nabízené téma bakalářské práce je rešeršního charakteru. Práce je vhodná zejména pro studenty, kteří se chtějí seznámit s nejmodernějšími postupy a technologiemi spojenými s provozem bioplynových stanic. Důraz by měl být kladen na snižování energetické náročnosti a finančních nákladů s provozem spojených.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše progresivních postupů a technologií v odborné literatuře.
2. Teoretické představení postupů a technologií, základní charakteristika, výhody a nevýhody.
3. Zhodnocení a porovnání jednotlivých technologií s ohledem na jejich praktickou využitelnost.

Seznam doporučené literatury:

LORA GRANDO, Rafaela, Adelaide Maria DE SOUZA ANTUNE, Fabiana Valéria DA FONSECA, Antoni SÁNCHEZ, Raquel BARRENA a Xavier FONT. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 80, 44-53 [cit. 2018-10-16]. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.079. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117307074f>

HAGOS, Kiros, Jianpeng ZONG, Dongxue LI, Chang LIU a Xiaohua LU. Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2017, 76, 1485-1496 [cit. 2018-10-16]. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.184. ISSN 13640321. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032116309388>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na nové technologie pro efektivní provoz bioplynových stanic. V úvodní části je popsán provoz bioplynové stanice, její produkty a nedostatky spojené s bioplynovými stanicemi. Hlavní část práce se zabývá představením tří progresivních technologií týkající se bioplynových stanic. Jedná se o suchou fermentaci, termální hydrolýzu a úpravu bioplynu na biometan. U každé technologie je uvedený popis, výhody a nevýhody s ohledem na jejich praktickou využitelnost.

Klíčová slova

bioplynová stanice, bioplyn, anaerobní fermentace, suchá fermentace, termální hydrolýza, úprava bioplynu, biometan

Abstract

This bachelor thesis is focused on new technologies enhancing efficient operation of biogas plants. The introductory part describes operation of biogas plant, its products and issues. The main part of the thesis deals with description of three progressive technologies concerning biogas plants such as dry fermentation, hydrothermal pretreatment and biogas upgrading to biomethane. For each technology there is a description, advantages and disadvantages with regard to their practical applicability.

Key words

biogas plant, biogas, anaerobic fermentation, dry fermentation, hydrothermal pretreatment, upgrading biogas, biomethane

Bibliografická citace

UHLÍŘOVÁ, Marcela. *Nové technologie pro efektivní provoz bioplynových stanic*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116437>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Marek Vondra.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Ing. Marka Vondry, Ph.D. a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Brně dne 24. 5. 2019

Podpis.....

Poděkování

Děkuji Mgr. Ing. Marku Vondrovi, Ph.D. za jeho pomoc, čas, cenné rady a vstřícnost při konzultacích.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Bioplynové stanice	13
2.1. Biomasa	13
2.2. Klasifikace BPS	14
2.3. Uspořádání BPS.....	15
2.3.1. Příjem a úprava substrátu	15
2.3.2. Doprava materiálu	15
2.3.3. Míchadla	16
2.3.4. Fermentor	17
2.3.5. Plynojem.....	18
2.3.6. Kogenerační jednotka	18
2.3.7. Koncový sklad	19
2.4. Bioplyn.....	20
2.4.1. Anaerobní fermentace.....	20
2.5. Digestát	21
2.5.1. Aplikace.....	21
2.6. Nedostatky spojené s provozem BPS	22
2.6.1. Využití tepla z kogenerace	22
2.6.2. Dostupnost biomasy	22
2.6.3. Nakládání s digestátem	23
2.6.4. Finanční návratnost	24
3. Suchá fermentace	26
3.1. Počáteční fáze	27
3.2. Diskontinuální dávkování	27
3.3. Kontinuální dávkování.....	28
3.4. Srovnání suché a mokré fermentace	29
3.5. Urychlení rozkladu biomasy vysokonapětovým výbojem	30
3.6. Případová studie.....	31
3.7. Zhodnocení	33
4. Termální hydrolyza	34
4.1. Princip.....	35
4.2. Případová studie.....	35
4.2.1. Postup	35
4.2.2. Vliv na složení	36

4.2.3.	Anaerobní fermentace pevné frakce	38
4.2.4.	Anaerobní fermentace kapalné frakce.....	39
4.3.	Finanční návratnost	39
4.4.	Zhodnocení	40
5.	Biometan.....	41
5.1.	Upgrade bioplynu	41
5.1.1.	PSA (Pressure swing adsorption).....	43
5.1.2.	Vodní vypírka	44
5.1.3.	Chemická vypírka	44
5.1.4.	Membránová separace.....	45
5.1.5.	Ekonomika fyzikálně – chemických technologií upgradu bioplynu.....	46
5.1.6.	Chemoautotrofní technologie.....	47
5.1.7.	Fotosyntetická technologie	48
5.2.	Biometan a palivo.....	50
5.3.	Biometan a vytápění	50
5.4.	Překážky v rozšíření	50
5.5.	Udržitelnost	51
5.6.	Zhodnocení	52
6.	Závěr	54
	Seznam použité literatury.....	56
	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	63
	Seznam obrázků	63
	Seznam grafů.....	64
	Seznam tabulek	64

1. Úvod

Jedním z hlavních enviromentálních problémů je neustále narůstající objem nejen syntetických, ale i organických odpadů. Právě organické odpady nalézají své využití v bioplynových stanicích (BPS) [1]. BPS zpracovávají organické odpady a produkují bioplyn. Bioplyn vzniká rozkladem biomasy za působení metanogenních bakterií bez přístupu vzduchu. Tento proces se nazývá anaerobní fermentace. Bioplyn se dále v BPS zpracovává v kogenerační jednotce, kde jeho spálením vzniká elektrická energie a teplo. Bioplyn je důležitý obnovitelný zdroj energie, který má vliv na snížení obsahu metanu a čpavku v ovzduší. Vedlejším produktem anaerobní fermentace je digestát, který lze využít jako kvalitní organické hnojivo [2]. Jednotlivé produkty a provoz BPS budou popsány v úvodní části této práce.

Mezi hlavní výhody BPS patří decentralizace výroby elektrické energie a přispívání k ochraně ovzduší. Zpracovávají totiž i vedlejší produkty zemědělské výroby, které obsahují vysoké množství metanu. Ten by při rozkladu v přírodě emitoval do atmosféry a napomáhal tím skleníkovému efektu. Decentralizace výroby elektřiny má za následek vytvoření pracovních míst i v periferních oblastech. Výhodou představuje i flexibilita použití bioplynu. Bioplyn je možné spálit v kogenerační jednotce a získat tak teplo i elektrickou energii. Možným využitím bioplynu je i jeho upgrade na biometan, který lze využít jako palivo. Mezi výhody produkce elektrické energie z bioplynu patří nízké množství vody, které je potřeba k anaerobní fermentaci oproti jiným biopalivům. Významným benefitem je i skutečnost, že zbylá část biomasy po anaerobní fermentaci lze využít jako velmi kvalitní organické hnojivo, u kterého je výrazně redukován zápach [1].

Bioplyn se v České republice (ČR) podílí na výrobě elektrické energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE) 14,76 %, což je o 2,5 % méně, než je evropský průměr [3]. Pomocí finanční podpory z mnoha státních i evropských fondů došlo k masivnímu rozšíření BPS, a to především v letech 2008 až 2013, kdy se zvýšil instalovaný výkon českých BPS z 270 GWh na 2 294 GWh. Od roku 2014, kdy se snížily formy příspěvků, se instalovaný výkon zvýšil pouze o 2 % [4]. V ČR se k roku 2017 nachází 574 BPS a podílí se tak 24 % na výrobě elektrické energie z OZE [5]. Cílem EU je však dosáhnout podílu 32 % do roku 2030 [6].

BPS provází několik nedostatků, které jsou podrobněji popsány v úvodní části práce. Hlavní problém spojený s BPS je skutečnost, že bez dotací nejsou zpravidla rentabilní [7]. Z tohoto důvodu je nutné vyvíjet inovace, které urychlí návratnost počátečních investic a sníží závislost na finanční podpoře. Vyvíjet technologie, které zvýší produkci bioplynu, umožní využívat širokou škálu biomasy, sníží provozní či investiční náklady nebo dokáží bioplyn efektivně využít jako palivo.

Tato práce obsahuje řešerši tři oblastí vývoje, které se snaží některých z výše uvedených inovací docílit. Tato práce vychází převážně z článků v odborných zahraničních i českých periodikách.

Jedná se o suchou fermentaci, která se zabývá využitím široké škály biomasy, redukcí použití vody a snížením provozních nákladů [8]. Dále je představena technologie termální hydrolýzy, která se zabývá možností anaerobní fermentace lignocelulóзовé biomasy. Ta je hojně rozšířená,

její struktura je však rezistentní k biologickému rozkladu. Eliminací ligninu, který tuto vlastnost způsobuje, se zabývá termální hydrolýza [9].

V poslední kapitole zaměřené na inovativní technologie je představen biometan. Biometan je ekologickou alternativou fosilním palivům v dopravě. Biometan je plyn, který vznikl odstraněním oxidu uhličitého z bioplynu. Separací tohoto plynu se v praxi zabývá několik technologií, které jsou však nákladné [10]. Velkého rozvoje dosáhly nové biotechnologické metody, které separovaný oxid uhličitý dokáží využít a zhodnotit, čímž představují velice progresivní alternativu ke konvenčním technologiím [11].

2. Bioplynové stanice

Výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů je elementárním prvkem v boji proti klimatickým změnám. Jedním ze zařízení, kde se vyrábí elektrická energie z biomasy, je bioplynová stanice. BPS jsou ekologická zařízení, která zpracovávají širokou škálu materiálů organického původu a produkují bioplyn. Ten se zpravidla spaluje v kogenerační jednotce a vzniká elektrická energie a teplo. Zpracovávají také jinak těžko odbouratelný organický odpad, který se na konci procesu využívá v zemědělství jako vysoce kvalitní hnojivo [2]. Cílem této kapitoly je představení základních charakteristik BPS.

2.1. Biomasa

Biomasa je substance biologického původu (pěstování rostlin, chov živočichů, produkce organického původu, organické odpady). Biomasu lze získávat záměrně jako výsledek výrobní činnosti nebo pomocí využití odpadů ze zemědělské, potravinářské a lesní výroby či z komunálního hospodářství atd [12].

Bioplyn vzniká anaerobní fermentací široké škály biomasy.

- Vedlejší produkty živočišné výroby – největší podíl odpadů vznikající při živočišné výrobě představují exkrementy hospodářských zvířat jako je hnůj a kejda. Nejjednodušší způsob nakládání s tímto odpadem je hnojení půdy. Množství tohoto odpadu však často převyšuje místní poptávku, proto je to ideální surovina pro výrobu bioplynu [13]. Digestát je navíc kvalitnější hnojivo než samotná kejda a méně zapáchá [1].
- Vedlejší produkty rostlinné výroby – do této kategorie se řadí široké množství rostlinného odpadu jako jsou např. zbytky po sklizni, odpady ze zpracování ovoce a zeleniny či pivovarnictví [10].
- Biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO) – z domácností, ale i z veřejných prostorů (supermarkety, zahradnictví, restaurace, hřbitovní odpad) má potenciál především v suché anaerobní fermentaci [10]. Tato technologie bude popsána ve třetí kapitole.
- Energetické plodiny – jsou rostliny pěstované k získání energie přímým spalováním nebo anaerobní fermentací. Důležitými vlastnostmi těchto plodin jsou rychlý růst, efektivní využití živin (obzvláště dusík), vysoká hustota a robustnost, odolnost vůči vnějším vlivům (škůdci, počasí) a rychlá regenerace po sklizni [14]. Jedná se o olejninu (řepka, slunečnice, len, sója, podzemnice olejná) a škrobnato – cukernatou biomasu (brambory, cukrová třtina, kukuřice). Mezi záměrně pěstovanou biomasu můžeme řadit i lignocelulóзовou biomasu, do které patří například dřeviny (topoly, olše, vrby), obiloviny (celé rostliny) a travní porosty [15]. Tento typ biomasy však není vhodný k výrobě bioplynu, protože obsahuje lignin, který se při anaerobní fermentaci špatně rozkládá. Běžně se proto spaluje ve spalovnách [9]. Potenciální využití lignocelulóзовé biomasy k výrobě bioplynu bude popsáno ve čtvrté kapitole.

2.2. Klasifikace BPS

BPS lze klasifikovat několika způsoby. Možná rozdělení jsou následující:

Dle zpracovávaného substrátu:

- Zemědělské – zpracovávají vedlejší produkty živočišné a rostlinné výroby. V ČR k roku 2017 tvořily zemědělské BPS asi dvě třetiny ze všech BPS [16]. Zemědělské BPS používají jako biomasu nejčastěji kukuřičnou, řepnou a travní siláž či hnůj a kejdu [17].
- Čistírenské – jsou nedílnou součástí čistíren odpadních vod (ČOV), kde zpracovávají kaly, materiál z žump a septiků. Na tyto BPS nejsou požadovány zásobní nádrže na vyhnitý kal. Pokud se do fermentoru přidá jiný materiál než výše zmíněný, BPS pak spadá do kategorie ostatní [18].
- Ostatní – někdy též nazývané odpadní, zpracovávají nejrůznější bioodpady. Jedná se o komunální bioodpady, odpady ze zpracování dřeva, mlékárenství, výroby cukru a další [18].



obr. 1: Zemědělská bioplynová stanice Kylešovice [19]

Dle způsobu fermentace:

- Mokrý fermentace – rozklad organických materiálů, které obsahují nízký podíl sušiny (okolo 10 %) [12].
- Suchá fermentace – rozklad organických materiálů, které mají vyšší podíl sušiny (až 40 %). Tyto materiály není nutné před vstupem do fermentoru rozmělnovat či jinak upravovat [12].

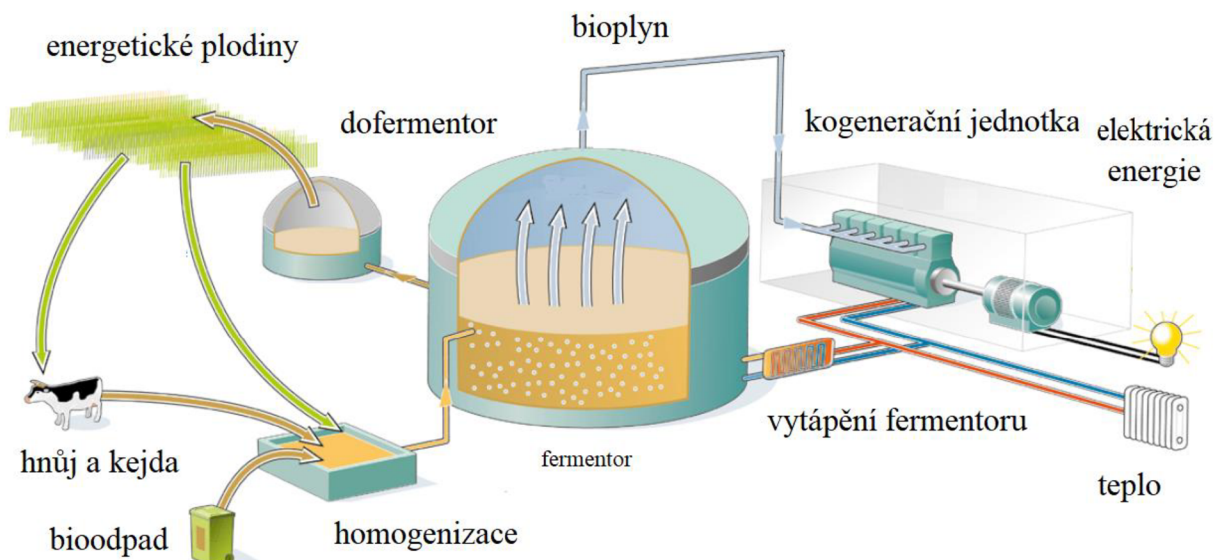
Dle dávkování surového materiálu:

- Kontinuální – plynulé dávkování substrátu do fermentoru, které je zautomatizováno. Používá se především u substrátu s nižším obsahem sušiny [12].
- Semikontinuální – poloplynulé dávkování substrátu do fermentoru. Fermentor je průběžně doplňován novým substrátem jeden až čtyřikrát denně. Tento proces lze snadno zautomatizovat [12].

- **Diskontinuální** – s přerušovaným provozem. Doba jednoho pracovního cyklu odpovídá době zdržení substrátu ve fermentoru. Tento způsob nakládání se substrátem je náročný na obsluhu. Používá se u suché fermentace [12].

2.3. Uspořádání BPS

Konkrétní technologické uspořádání BPS může mít mnoho variant podle toho, jaký materiál a jakým způsobem se zpracovává před vstupem do hlavní části – fermentoru i při jeho výstupu [12]. Schéma možného uspořádání zemědělské BPS je zobrazeno na obr. 2.



obr. 2: Schéma uspořádání typické zemědělské bioplynové stanice, upraveno [20]

2.3.1. Příjem a úprava substrátu

K zajištění kontinuálního dodávání substrátu je nutná skladovací nádrž neboli vstupní jímka. Optimální kapacita by měla být navržena tak, aby zde bylo možné uskladnit substrát jeden až dva dny [21]. Tyto nádrže mohou být vybaveny zařízeními na separaci hrubých příměsí, na ředění vodou či zahušťování, k inokulaci, k homogenizaci a k automatickému dávkování do fermentoru. [12]. Vstupní jímka je zpravidla zapuštěna do země. U dna jímky se koncentrují usazeniny, z tohoto důvodu je substrát čerpán ve výšce 50 cm ode dna [21].

2.3.2. Doprava materiálu

Doprava materiálu s nižším obsahem sušiny se zajišťuje pomocí potrubí a čerpadel. V BPS se používají zpravidla dva typy potrubí, tlakové a přepadové [21].

- **Tlakové potrubí** – substrát se transportuje pod tlakem čerpadla, má menší průměr (100 až 150 mm) [21].
- **Přepadové potrubí** – substrát se transportuje pomocí samospádu, průměr potrubí závisí na množství sušiny substrátu. U řídkých materiálů se průměr pohybuje okolo 200 mm, u suspenzí s vyšším podílem sušiny i 300 mm [21].

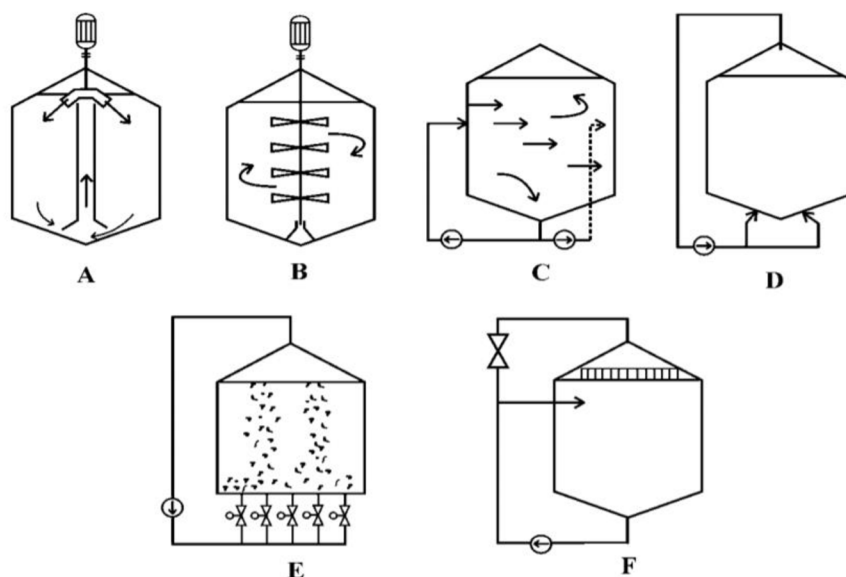
Čerpadla slouží k transportu substrátu, kde je nutné překonat geodetickou výšku.

- Odstředivá čerpadla – jsou vhodné pro transport substrátu a obsahem sušiny do 8 %, konstrukčně jsou jednoduché [21].
- Břítová čerpadla – jsou speciálním typem odstředivých, mají na oběžném kole břity, které slouží k homogenizaci substrátu [21].
- Objemová čerpadla – slouží k transportu suspenzních substrátů s vyšším obsahem sušiny [21].

U substrátu s vyšším podílem sušiny (kukuřičná siláž, senáž) dochází k transportu do fermentoru pomocí šnekových dopravníků [1].

2.3.3. Míchadla

Promíchávání biomasy je důležité pro homogenizaci, pohyb metanogenních bakterií a pro rovnoměrné rozložení teploty, čímž se předchází vzniku usazenin. Míchadla mohou být mechanická, hydraulická nebo pneumatická. Míchadla spotřebovávají velké množství elektrické energie. Kontinuální míchání se však zpravidla nepoužívá, protože nemá vliv na vyšší výnos bioplynu [21]. Efektivní provoz dosahuje spotřeby 3 % celkové hrubé výroby elektřiny [22]. Základní typy míchadel jsou zobrazeny na obr. 3.



obr. 3: Základní typy míchadel [23]

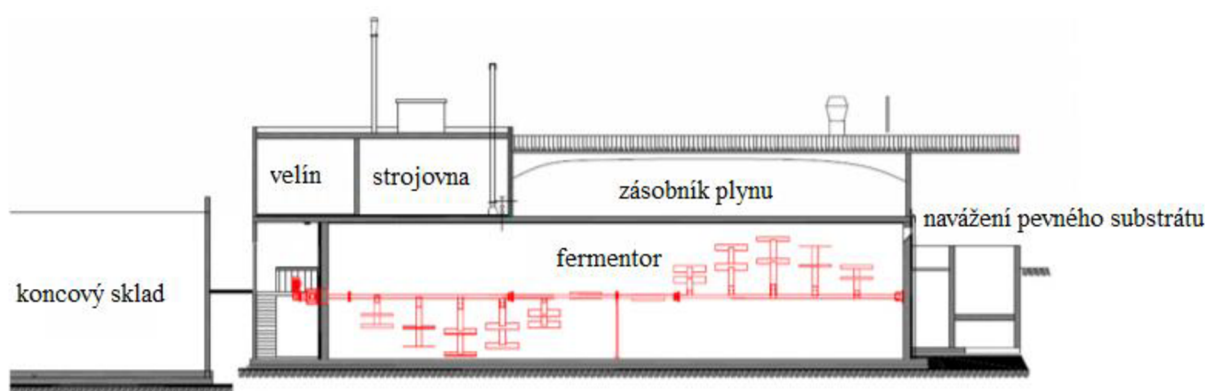
A – mechanické míchání pomocí turbíny, B – mechanické míchání pomocí lopatek, C – míchání hydraulické, D – pneumatické míchání s pevnými vstupy, F – míchání s odpěňovací sprchou

2.3.4. Fermentor

Anaerobní fermentace probíhá ve fermentorech, proto je to nejdůležitější součást BPS. Fermentory lze klasifikovat na horizontální a vertikální [21].

Horizontální fermentor

Nejčastější konstrukcí horizontálního fermentoru je válcová ocelová nádrž či betonové konstrukce čtvercového průřezu. Hranaté horizontální fermentory jsou vhodné pro suchou (bez míchání) i mokrou fermentaci. Hlavní výhodou horizontálního fermentoru je možnost instalace výkonného mechanického míchadla. Tím se dosáhne dobrého promíchání ve směru průtoku a minimálního promísení v podélném směru. To má za následek tzv. pístové proudění, které zabraňuje promíchávání čerstvé biomasy s digestátem. Nevýhodou této konstrukce je však velký prostor zastavěné plochy k relativně nízkému objemu a vysoké tepelné ztráty [21]. Schéma horizontálního fermentoru je zobrazeno na obr. 4.

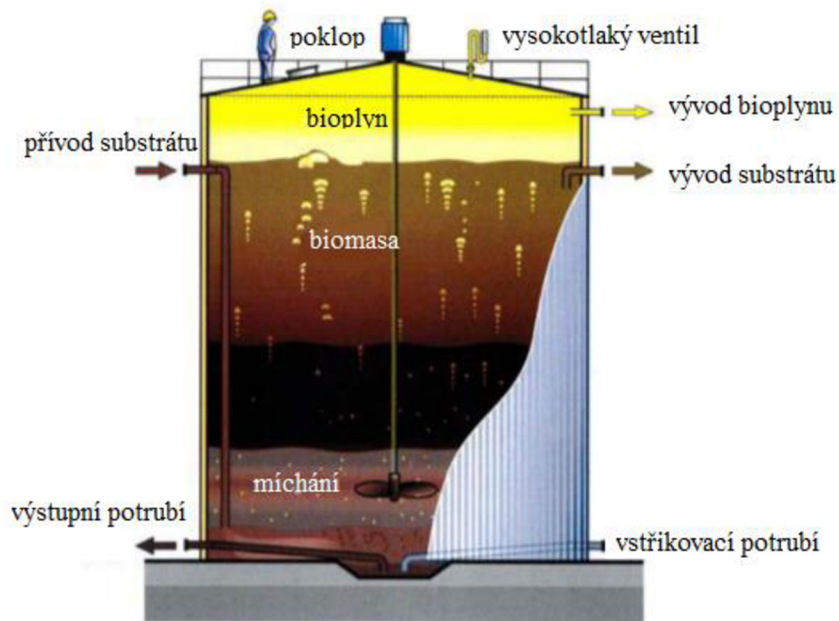


obr. 4: Horizontální fermentor, upraveno [24]

Vertikální fermentor

Nejčastější konstrukcí vertikálního fermentoru je betonová nádrž kruhového průřezu. Čistírenské BPS používají kónické dno i vrch fermentoru. Hlavní výhodou této konstrukce je lepší poměr mezi zastavěnou plochou a objemem, čímž se snižují tepelné ztráty. Hlavní nevýhoda spočívá ve skutečnosti, že zde nedochází k pístovému proudění [21].

Fermentory lze umístit do země, částečně do země nebo nad zem. To závisí na množství spodních vod. Pokud je toto množství malé, fermentor lze zapustit do země, čímž lze v zimních měsících uchovat vyšší teplotu a tím snížit náklady na vytápění. Z důvodu vlhkosti je však nutné fermentor důkladně izolovat. Při velkém množství spodních vod se fermentor umístí na povrch, avšak v zimních měsících dochází k velkým tepelným ztrátám [21]. Vertikální fermentor je zobrazen na obr. 5.



obr. 5: Vertikální fermentor, upraveno [24]

Některé BPS mají druhou fermentační nádrž, tzv. dofermentor, kam lze během procesu anaerobní fermentace přečerpát substrát z fermentoru. Tím se zajistí nepromíchání nové biomasy s již pokročile zfermentovanou biomasou [25].

2.3.5. Plynojem

Plynojem slouží ke shromáždění bioplynu a jeho separaci z digestátu. Plynojemy jsou nejčastěji z dvouplášťového gumotextilního materiálu či z kovu. Alternativně lze využít i plast. Na horní části plynojemu je umístěna přetlaková pojistka ve formě plexiskla. V případě nárůstu tlaku plexisklo praskne, čímž se nepoškodí fermentor [21].

Plynojemy lze rozdělit dle tlaku na [12]:

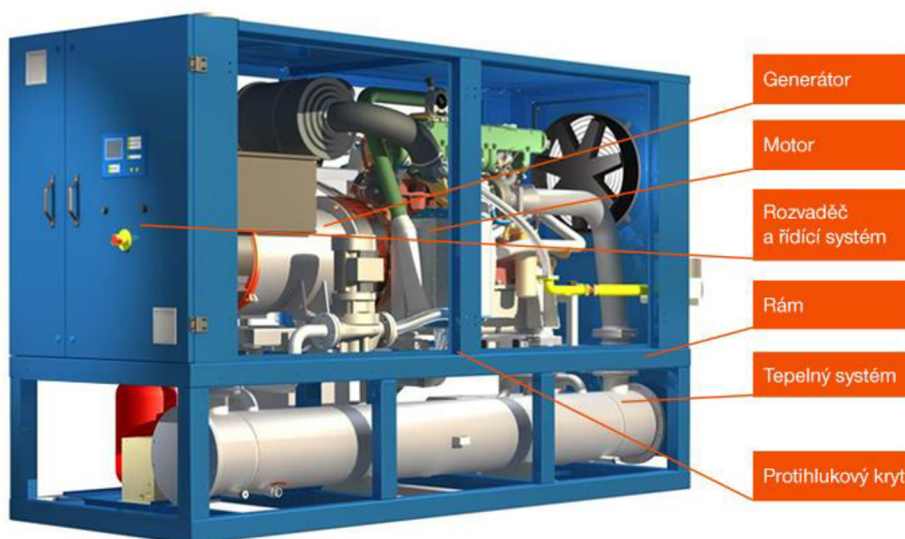
- Nízkotlaké – menší než 50 kPa
- Středotlaké – 1 až 2 MPa
- Vysokotlaké – 15 až 35 MPa

2.3.6. Kogenerační jednotka

Samotná přeměna energie bioplynu na elektrickou energii nastává v kogenerační jednotce, která je zobrazena na obr. 6. Kogenerace je současná výroba elektřiny a tepla. Kogenerační jednotka se skládá z plynového motoru (turbíny) a generátoru elektrického proudu. Kogenerační jednotka vyrábí zpravidla okolo 65 % tepla a 35 % elektrické energie [1]. Rozlišujeme dva základní druhy:

- Se zážehovými motory – palivem je v tomto případě bioplyn. Motory s vyšším instalovaným výkonem pracují s elektrickou účinností okolo 40 %. Investiční náklady jsou zpravidla vyšší, mají však nižší nároky na údržbu [26].

- Se vznětovými motory – jedná se o diesellové motory se zápalným paprskem, kde se k bioplynu přidá ještě jiné kapalné fosilní palivo, popř. rostlinné oleje, které mají zápalnou funkci [26]



obr. 6: Kogenerační jednotka [27]

Pokud je kogenerační jednotka neplánovaně odstavena na delší čas, je nutné přebytečný bioplyn spálit. Toho se docílí pomocí fléry. Spalování ve fléře probíhá s přísáváním spalovacího vzduchu z okolního prostředí. Existence plamene je kontrolována ionizační elektrodou [28].

2.3.7. Koncový sklad

Digestát je z fermentoru, případně z dofermentoru dopraven do koncového skladu. Z legislativních důvodů je zde povinnost zajistit skladovací kapacity minimálně na šestiměsíční produkci digestátu. Tím se dosáhne optimálního a efektivního využití digestátu jako hnojivo. Úniky metanu a dalších složek z uskladňování digestátu jsou možné. Z tohoto důvodu by měl být koncový sklad opatřen krytem [1].



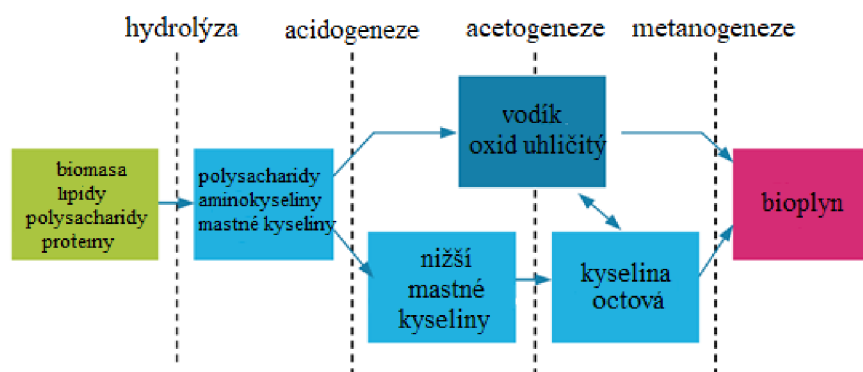
obr. 7: Kryté koncové sklady [1]

2.4. Bioplyn

Klíčovou složkou výroby energie je bioplyn vznikající ve fermentorech. Bioplyn je produkt anaerobní metanové fermentace organických látek. Hlavními složkami směsi bioplynu jsou metan a oxid uhličitý s výraznou převahou metanu. Obsah metanu se pohybuje okolo 50 až 70 % [29]. Směs obsahuje v malém množství širokou škálu dalších plynů. Mohou to být zbytky vzdušných plynů O_2 , N_2 , Ar nebo H_2 , který vzniká při nedokonalé spotřebě z acidogeneze či další minoritní prvky vzniklé reakcí organické hmoty (H_2S , N_2O , HCN) [30].

2.4.1. Anaerobní fermentace

Anaerobní rozklad organických látek je komplexní proces metabolické součinnosti několika mikrobiálních skupin, které dělíme do čtyř fází. Jedná se o hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi [30]. Proces anaerobní fermentace probíhá v různých prostředích např. v žaludcích přežvýkavců, rašeliništích či v mořích. V BPS je produktem této fermentace bioplyn a digestát [1]. Schéma přeměny biomasy na finální bioplyn je vidět na obr. 8.



obr. 8: Vznik bioplynu, upraveno [10]

- Hydrolýza – je rozklad makromolekulárních látek (lipidů, polysacharidů, bílkovin) na nízkomolekulární látky rozpuštěné ve vodě pomocí extracelulárních hydrolytických enzymů neboli hydroláz. V této fázi začíná často rozklad ještě za přítomnosti kyslíku, hydrolázy ovšem zajistí poměrně rychlé vytvoření anaerobního prostředí [30].
- Acidogeneze – způsobuje následný rozklad hydrolytických produktů na jednoduché organické látky především na nižší mastné kyseliny, alkoholy, CO_2 a H_2 za přítomnosti acidogenních bakterií. V této fázi dojde definitivně k vytvoření anaerobního prostředí [30].
- Acetogeneze – působením acetogenních bakterií vznikají kyselina octová, H_2 a CO_2 . [30].
- Metanogeneze – tvorba metanu z kyseliny octové za působení acetotrofních metanogenních bakterií se nazývá metanogeneze. Metanogenní bakterie jsou přirozeně přítomny v trávicím traktu přežvýkavců. V této finální fázi obsahuje bioplyn až 70 % metanu. Pokud se H_2 objeví na konci metanogeneze, značí to disbalanci procesu. Ta se může projevit snížením pH a indikuje na nevhodnou skladbu substrátu [30].

2.5. Digestát

Vedlejší produkt anaerobní fermentace se nazývá digestát. Používá se jako organické hnojivo, obsahuje živiny snadno využitelné rostlinami, čímž přispívá k udržitelnosti výroby bioplynu. Živiny obsažené v digestátu (především N, P, K) pozitivně ovlivňují úrodnost, strukturu i obsah půdní organické hmoty. Některé látky (N_2O , CH_4 , CO_2) se ovšem mohou dostat do povrchových i podzemních vod a unikat v podobě plynných emisí do ovzduší. Nejvíce je emitován N_2O , skleníkový plyn, přispívající ke globálnímu oteplování. Tento jev lze zmírnit až o 90 % použitím inhibitoru nitrifikace pro stabilizaci dusíku. Únik plynů po aplikaci digestátu do půdy je spojen se zápachem, který je ovšem mnohem menší v porovnání s kejdou [31]. Anaerobní fermentace redukuje zápach až o 80 % [1].

2.5.1. Aplikace

Způsob aplikace závisí na podmínkách dané půdy. Jednorázové dávky jsou vhodnější pro hutné půdy s dostatečnou absorpční schopností amonných iontů. Měly by být vpraveny hlouběji (15 až 25 cm), aby se klíčící rostliny nepoškodily volným NH_3 . Dalším důvodem je zamezení nadměrnému prokořenění vrchní vrstvy na úkor celého objemu. Výhodou jsou nižší náklady na pohonné hmoty, a tím i riziko poškození půdy z pojezdů zemědělských strojů a snadná aplikace. Vícečetné dávky jsou vhodné do půd se zvýšeným rizikem vyplavení dusíku. Digestát se rovnoměrněji rozdělí a lépe se reguluje množství, které je v daném období růstu rostlin potřeba [31]. Aplikace digestátu je zobrazena na obr. 9.



obr. 9: Aplikace digestátu [32]

2.6. Nedostatky spojené s provozem BPS

Bioplynové stanice provází řada nedostatků, které snižují efektivitu provozu a zvyšují jeho dopad na životní prostředí. Anaerobní fermentace probíhá za specifických podmínek a je náchylná na změny. Pokud se nedosáhne optimálních parametrů pro danou BPS, může být tvorba bioplynu nízká a neefektivní [33]. V následující kapitole budou představeny zásadní nedostatky BPS spojené s jejich provozem a možná řešení, která vycházejí z inovativních technologií, jejichž bližší rozbor je cílem této práce.

2.6.1. Využití tepla z kogenerace

S využíváním tepla z kogenerace se pojí řada problémů. Často jsou BPS umístěny v lokalitách, kde se nenachází vhodný subjekt, který by toto teplo odebíral. Zejména proto je již při plánování výstavby BPS nutné najít způsob, jak teplo ekonomicky i průmyslově zužítkovat. Některé nedostatky, které jsou spjaty s tepelným plýtváním jsou následující [34]:

- Závislost na roční době – v zimních měsících lze produkované teplo využít na vyhřívání fermentorů a dalších budov, v letních měsících je potřeba méně tepla, a tím vzniká přebytek. Spotřeba tepla na vytápění fermentorů se pohybuje okolo 20 až 30 % [34].
- Vzdálenost – zemědělské BPS jsou zpravidla umístěny na periferiích, kde nejsou vhodné subjekty pro odběr tepla [34].
- Dodávka tepla – není konstantní, protože se množství tepla pro ohřev fermentorů mění v závislosti na venkovní teplotě, potažmo na ročním období [34].
- Kvalita a kvantita – instalovaný výkon běžné zemědělské stanice produkuje nedostatečné množství tepla pro využití většími průmyslovými objekty [34].

Technicky nejjednodušším řešením je distribuce pomocí teplovodů přímo ke spotřebiteli. To je ovšem účinné pouze na krátké vzdálenosti do 1 km, na delší vzdálenosti dochází k velkým ztrátám do okolí a ke zvýšení pořizovacích nákladů [22].

Přebytek tepla lze využít ke zhodnocení vedlejších produktů anaerobní fermentace například pro sušení digestátu za účelem výroby paliv. Pro svou univerzálnost se nejčastěji využívá pro provoz pásových sušáren. Tyto sušárny dokáží usušit nejrůznější materiály jako jsou obilí, piliny, dřevní štěpka, kaly z odpadních vod, separovaný i neseperovaný digestát a další. Provoz pásových sušáren se dá snadno přizpůsobit dodávkám tepla z BPS. Na tyto sušárny často navazuje peletizační linka, která působením vysokého tlaku a teploty vyrábí pelety [35].

Přebytek tepla lze využít k ohřevu vody potřebné při termální hydrolýze. Tím lze snížit provozní náklady na tuto technologii předúpravy a zvýšit výnos bioplynu z lignocelulóзовé biomasy. Tato technologie bude podrobněji popsána ve čtvrté kapitole.

2.6.2. Dostupnost biomasy

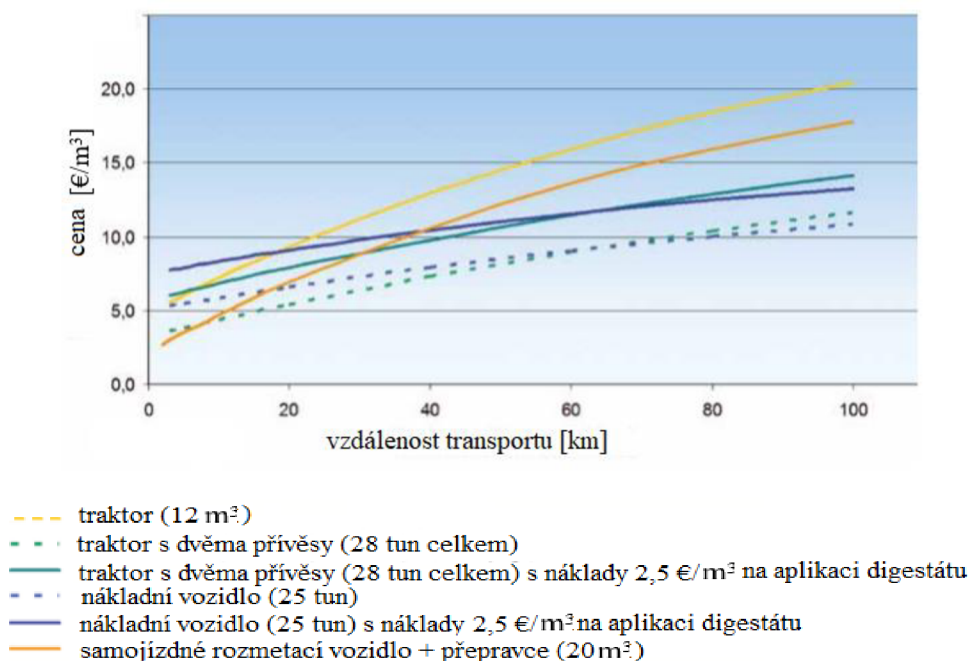
Dostupnost biomasy je klíčovým parametrem pro výběr lokace výstavby BPS. Z tohoto důvodu se většinou staví v zemědělské oblasti, kde je větší přísun organického odpadu, nikoli u větších měst. Pokud má BPS nedostatek organické hmoty, vyrábí malé množství nebo dokonce žádný bioplyn. Tato situace může nastat především v zimních měsících, pokud není BPS dostatečně zásobená [22].

Možným řešením je cílené pěstování plodin vhodných k anaerobní fermentaci v blízkosti BPS. Kvůli intenzifikaci a scelování zemědělství došlo v minulosti v ČR k odstranění protierozních prvků. Širokořádkové plodiny (kukuřice, brambory, cukrová řepa, slunečnice), které představují vhodnou biomasu k výrobě bioplynu, však svým vzrůstem a způsobem pěstování nedostatečně kryjí půdu při přivalových srážkách a napomáhají tím erozi [36].

Problém s dostupností biomasy lze vyřešit fermentací větší škály vstupního substrátu (lignocelulóznové biomasy) i s vyšším podílem sušiny. To lze dosáhnout pomocí suché fermentace, která bude blíže představena ve třetí kapitole.

2.6.3. Nakládání s digestátem

Další problém představuje přebytek digestátu. V některých oblastech produkují BPS produkují velké množství digestátu, který překračuje místní potřeby. Toto hnojivo je pak nutné dopravit do míst, kde je větší poptávka po této surovině. Nicméně transport do vzdálených míst je náročný na logistiku, finance a představuje další emise skleníkových plynů [37]. V grafu 1 je zobrazeno srovnání ceny transportu digestátu na vzdálenosti různými dopravními prostředky, které vychází z německé studie [38].



graf 1: Závislost ceny dopravy digestátu na vzdálenosti různými dopravními prostředky, upraveno [38]

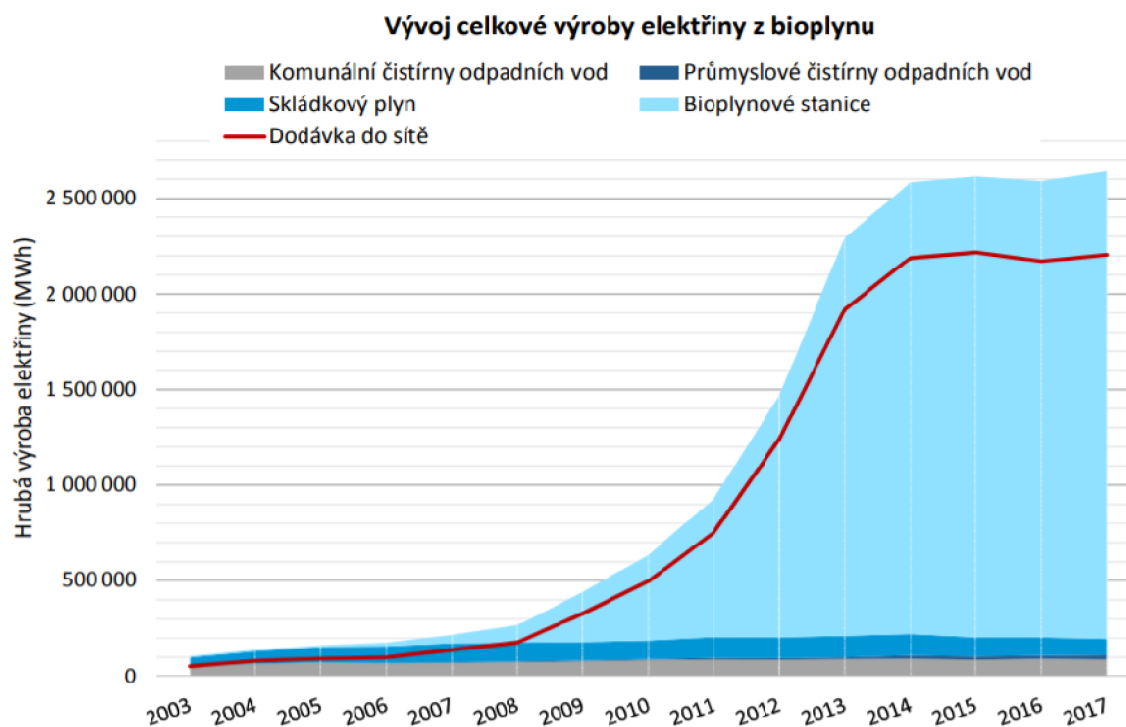
Je zřejmé, že cena transportu digestátu roste se vzdáleností, proto je nejlepším řešením využít digestát v bezprostřední blízkosti BPS. Za předpokladu, že dovoz digestátu se uskutečňuje do 40 kilometrů od BPS, cena za m³ se na německém trhu pohybuje mezi 7 až 13 eur. Nejlevnější způsob transportu je za použití traktoru s dvěma přívěsy s kapacitou 28 tun.

Digestát lze mimo hnojení využít i k inokulaci. Směs nového substrátu s digestátem se nazývá perkolát. Recirkulací perkolátu dochází k pohybu metanogenních bakterií, který je zásadní pro suchou fermentaci.

2.6.4. Finanční návratnost

Rentabilita je důležitým parametrem každého podnikatelského záměru. Hlavní výnosy BPS tvoří tržby, které se získají prodejem vyrobených produktů (elektrická energie, teplo a digestát). Do výnosu BPS se zahrnují i dotace, které tvoří nezbytnou součást provozu BPS [39].

Závislost BPS na dotacích lze demonstrovat na vývoji počtu BPS v ČR. V roce 2004 došlo ke zvýšení výkupních cen OZE dle zákona č. 180/2005 Sb. – zákon o podpoře výroby elektřiny z OZE. Myšlenkou této cenové politiky bylo nastartování alternativní energetiky [7]. To vedlo nejdříve k pozvolnému navýšení počtu BPS, mezi lety 2008 až 2013 došlo k nárůstu výroby hrubé elektřiny z 266,9 GWh v roce 2008 na 2 293,6 GWh v roce 2013 [4]. Velký nárůst instalovaného výkonu vedl ke snížení ceny silové složky energie, zatímco se neúměrně zvyšovaly příspěvky na OZE v konečné ceně elektrické energie. V roce 2013 byla přijata novela, která ukončila finanční podporu OZE, což mělo za následek snížení nové výstavby BPS, jak lze vidět v grafu 2 [7]. Mezi lety 2014 a 2017 se hrubá výroba elektřiny z bioplynu zvýšila pouze o 2 %. V ČR se k 31. 12. 2017 nachází 574 BPS a podílí se 24 % na výrobě elektrické energie z OZE [5].



graf 2: Vývoj celkové elektřiny z bioplynu [4]

Mezi formy podpory v ČR patří výkupní cena elektrické energie a zelený bonus, které však nelze kombinovat [40].

- Výkupní cena – v tomto případě má vykupující povinnost od výrobce elektřiny z OZE vykoupit veškerý objem elektřiny za cenu stanovenou aktuálním cenovým rozhodnutím. Garance výkupní ceny se vztahuje pouze na subjekty, které splní technické a ekonomické parametry stanovené vyhláškou č. 296/2015 Sb., č. 347/2012 Sb. [40].

Pro rok 2019 se výkupní cena spalování bioplynu v BPS pohybuje od 3040 Kč/MWh do 4120 Kč/MWh. Cena se odvíjí od typu použité biomasy a instalovaného výkonu [41].

- Zelený bonus – v tomto případě se vyplácí tzv. zelený bonus na elektřinu vyrobenou z OZE za veškerou vyrobenou elektrickou energii s výjimkou vlastní technologické spotřeby. Ta u BPS může dosahovat až 20 % produkce. Při podpoře formou zelených bonusů si musí výrobce sám zajistit odběratele a sjednat si cenu. Tento způsob dotace je spojen s vyšším výnosem ovšem přináší riziko v podobě nejistého prodeje vyrobené elektřiny [40]. Zelený bonus pro rok 2019 se pohybuje od 1970 Kč/MWh do 3050 Kč/MWh [41]. Podpora formou zeleného bonusu na teplo činí 830 Kč/GJ, nelze ji však kombinovat s žádnou jinou formou provozní podpory [40].

Tyto formy podpory však platí pro BPS, které byly uvedeny do provozu nejpozději v roce 2013 [41]. Pro nové investory lze však najít alternativní využití bioplynu, a to jeho upgrade na biometan. Biometan je ekologickou alternativou fosilním palivům, protože má velmi podobné vlastnosti jako zemní plyn. Tato technologie bude blíže popsána v páté kapitole.

Vyvíjení technologií, které urychlí návratnost počátečních investic a sníží závislost na dotacích je klíčové k dalšímu rozšiřování BPS. Cílem této práce je představit tři oblasti vývoje, které by mohly alespoň částečně vyřešit výše uvedené nedostatky.

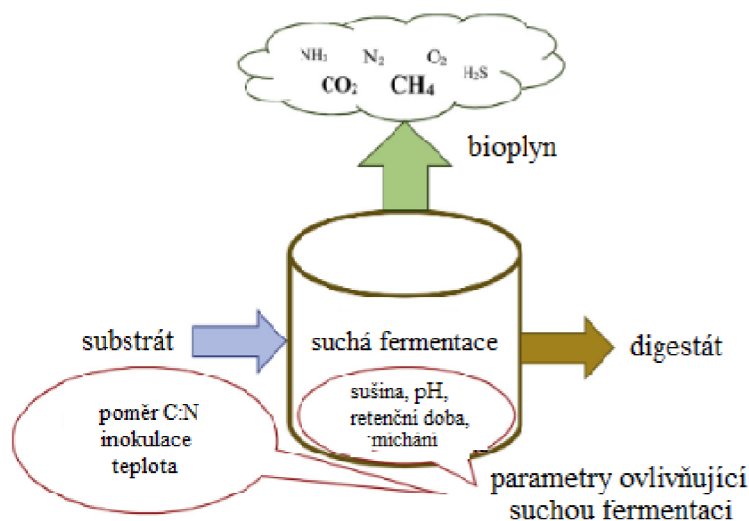
3. Suchá fermentace

Ekonomický rozvoj a urbanizace s sebou přinesly prudký nárůst BRKO, který z větší části končí na skládkách. Tento odpad má relativně vysoký podíl vody a biologicky snadno rozložitelných látek, tudíž není vhodný ke spalování. Z tohoto důvodu je nutné najít nový způsob zpracování tohoto bioodpadu. Suchá fermentace patří k ideálnímu způsobu využití tohoto odpadu za účelem výroby bioplynu [42].

Suchá fermentace se liší od konvenční mokré fermentace především ve skladbě substrátu. Může obsahovat až 40 % sušiny, oproti mokré fermentaci, kde podíl suché složky dosahuje okolo 10 %. Pro tento typ fermentace se používá především BRKO separovaný z komunálního odpadu bez dodatečného ředění, v posledních letech i kukuřičná siláž či žito [42].

Výroba bioplynu probíhá ve čtyřech fázích, blíže popsáno v kapitole 2.4.1. Anaerobní fermentace závisí především na provozních podmínkách, teplotě, pH, poměru uhlíku a dusíku a inokulaci, jak lze vidět na obr. 10 [33].

Důležitým termínem týkající se suché fermentace je perkolát. Perkolát je směs organických materiálů, který obsahuje mikroorganismy podporující anaerobní fermentaci. Může obsahovat hnůj, kal, bachorovou tekutinu nebo digestát z mokré i suché fermentace. Právě digestát má nejlepší účinky na produkci bioplynu, protože obsahuje metanogenní mikroorganismy přizpůsobené k anaerobní fermentaci [33].



obr. 10: Parametry ovlivňující suchou fermentaci, upraveno [33]

Suchá fermentace může probíhat za mezofilních (32 až 42 °C) nebo termofilních (50 až 60 °C) podmínek. V praxi se častěji využívají právě mezofilní podmínky, z důvodu nižších nákladů na energii a vyšší stability. Termofilní podmínky zvyšují produkci bioplynu a snižují čas přeměny. Nicméně za těchto podmínek dochází ke kumulaci těkavých mastných kyselin a snížení pH, což může vést ke kolapsu systému [33].

Dalším zásadním parametrem suché fermentace je inokulace. Vysoký podíl sušiny vede ke zvýšení viskozity, a tedy k nemožnosti promíchávání substrátu míchadly. Inokulace je nezbytná součástí suché fermentace, provádí se pomocí vsakování perkolátu do substrátu, čímž zajišťuje cirkulaci biomasy [33].

Podíl uhlíku a dusíku je dalším důležitým parametrem. Tento podíl by se měl pohybovat mezi 20:1 až 30:1. Pokud je tento poměr příliš vysoký, metanogenní mikroorganismy vstřebají dostupný dusík, což vede k jeho nedostatku a ke snížení produkce bioplynu. Tento poměr by neměl být ani příliš nízký, vysoký podíl amoniaku má negativní vliv na produkci bioplynu [33].

3.1. Počáteční fáze

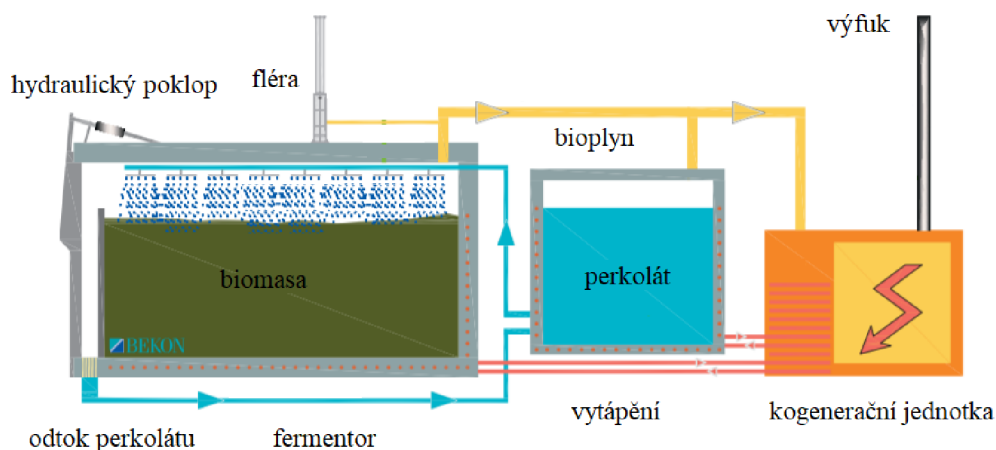
Počáteční fáze je důležitá pro vznik mikrobiálních kultur v daném substrátu a může být velice dlouhá. Pokud se substrát inokuluje, lze tuto dobu zkrátit na jednotky dní. Jinak tato fáze může trvat i jeden až dva měsíce. Inokulace se provádí pomocí perkolátu, který by měl pocházet z aktivního anaerobního fermentoru používající suchou fermentaci. Perkolát se musí nejdříve smíchat se vstupním substrátem, což probíhá za pomalého míchání. Důležitým faktorem je poměr objemu perkolátu k objemu vstupního substrátu. Ze studie [43], kde se v diskontinuálním fermentoru použil substrát ze směsi hnoje se slámou vyplývá optimální poměr 0,5. Ze studie [44], kde se v kontinuálním fermentoru použil substrát z kuřecích peří, slámy a odpady z citrusů vyplývá ideální poměr 0,4 [45].

3.2. Diskontinuální dávkování

Vstupní substrát se nejdříve smísí s optimálním množstvím perkolátu a poté je navážen do fermentoru pomocí běžné manipulační techniky. Fermentor se poté uzavře a probíhá anaerobní fermentace. Fermentor zůstává uzavřený, dokud není degradace dokončena. Poté se fermentor otevře a digestát je nahrazen novou vstupní biomasou. K zajištění kontinuity produkce bioplynu se využívá několika paralelních linek. Nedostatečné promíchání může způsobit usazeniny na povrchu substrátu, čímž se snižuje efektivita procesu. Z důvodu nedostatečné kontroly a měnících se podmínek uvnitř fermentoru nelze zajistit stabilní produkci bioplynu [45].

- BEKON technologie – biomasa se pomocí bagru přemístí do fermentoru. Aby co nejlépe probíhal proces anaerobní fermentace, je nutné substrát inokulovat. Inokulace se provádí smícháním nového substrátu s perkolátem, který obsahuje metanogenní bakterie. Perkolát se vstříkne tryskami ve stropech na biomasu. Vyloučená buněčná kapalina (perkolát) se odvede odtokovým systémem a dále se použije v dalším cyklu na inokulaci. Tato technologie dále nevyžaduje žádné promíchávání, pohyb mikroorganismů zajistí právě perkolát. Nastavení optimálních podmínek vstříkávání, tedy časový interval a množství je důležité pro výnos bioplynu. Mezi hlavní výhody patří nízké provozní náklady, nízké servisní požadavky a standardizovaná stavba, díky ní lze snadno rozšířit kapacitu fermentorů [46].

Schéma technologie BEKON je zobrazeno na obr. 11.

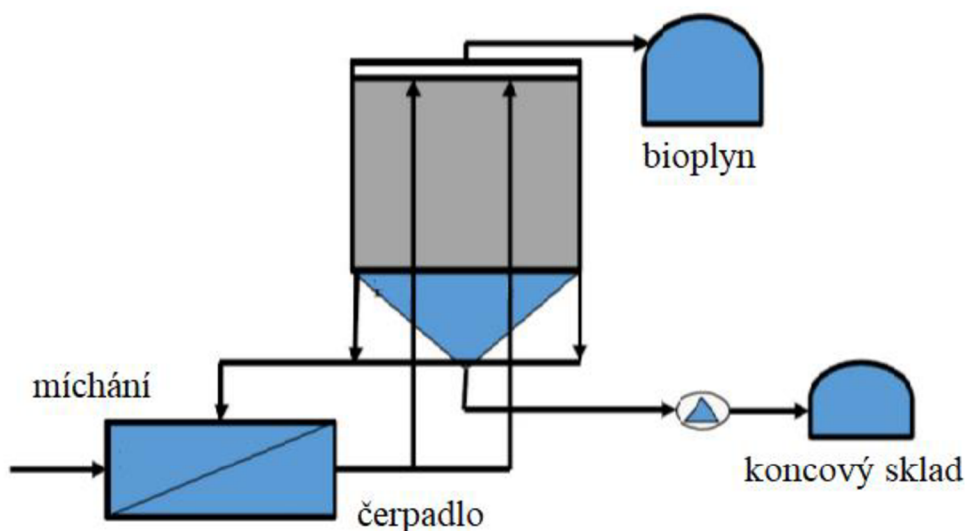


obr. 11: Technologie BEKON, upraveno [46]

3.3. Kontinuální dávkování

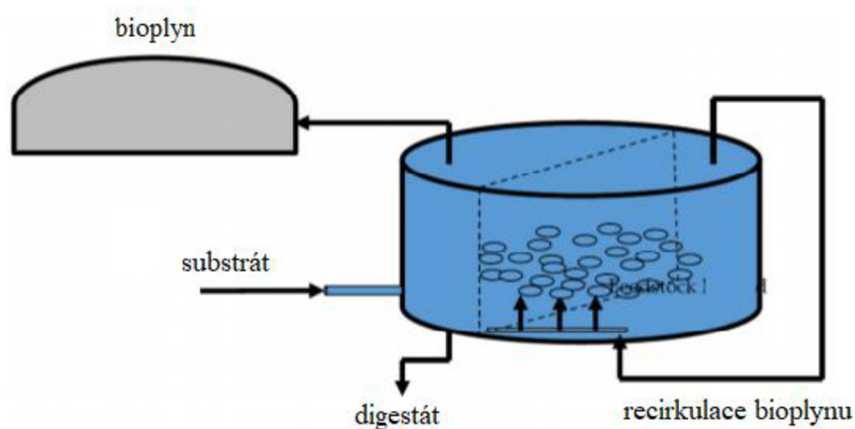
Vstupní substrát se dodává do fermentoru plynule, zatímco stejné množství se odebírá. Tím se dosáhne stability pracovního objemu. Nejdříve se dodává menší množství biomasy, které se postupně zvyšuje. Plynulé dávkování má za následek stabilní produkci bioplynu a snadnou kontrolu procesu. Kontinuální dávkování může být provedeno různými technologiemi [45].

- Dranco systém – používá vertikální fermentor s kónickým dnem. Mísení perkolátu se vstupním substrátem probíhá mimo fermentor. Tento systém zpracovává biomasu s podílem sušiny okolo 30 až 40 % [47].



obr. 12: Dranco systém, upraveno [47]

- **Valorga systém** – používá se vertikální válcový fermentor s horizontálním systémem průtoku. Fermentor obsahuje svislou stěnu, která funguje jako přepážka. Materiál je nucen proudit kolem stěny od přívodu k výstupu. Tento systém zpracovává převážně organické odpady o 25 až 35 % podílu sušiny [47].

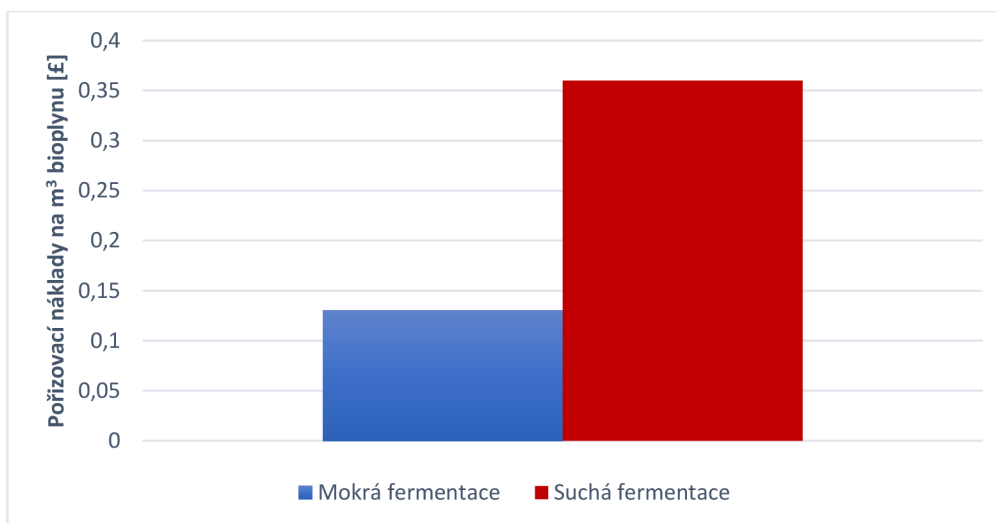


obr. 13: Valorga systém, upraveno [47]

3.4. Srovnání suché a mokré fermentace

Hlavní rozdíl suché a mokré fermentace spočívá v různém obsahu sušiny ve fermentované biomase. Zatímco u konvenční mokré fermentace se biomasa ředí a obsahuje maximálně 15 % suché složky, u suché fermentace může dosahovat podíl suché složky až ke 40 % [42].

Z výsledků studie [48], která se zabývá srovnáním těchto technologií vyplývá, že průměrný výnos bioplynu na tunu biomasy u suché fermentace byl o 56 % nižší než výnos bioplynu z mokré fermentace. Z jiné studie zabývající se stejnou problematikou vyplývá, že při nastavení optimálních podmínek lze dosáhnout téměř identického výnosu bioplynu i při suché fermentaci [8]. Rozdílné závěry uvedených studií naznačují, že účinnost fermentačních technologií závisí na konkrétních provozních podmínkách, které musí být vždy důkladně sledovány. Porovnání průměrné hodnoty pořizovacích nákladů BPS na m³ bioplynu je zobrazeno v grafu 3.



graf 3: Pořizovací náklady na m³ bioplynu [48]

Porovnání pořizovacích nákladů proběhlo na dvou BPS zastupující mokrou fermentaci a na dvou BPS zastupující suchou fermentaci. Jak ukazuje graf 2 pořizovací náklady na m³ bioplynu vyprodukované pomocí mokré fermentace jsou asi třikrát nižší než u suché fermentace. To je způsobeno tím, že obě BPS provozující suchou fermentaci mají nádrže na perkolát, a tím i vyšší objemy fermentorů, což jejich pořizovací náklady zvyšuje [48].

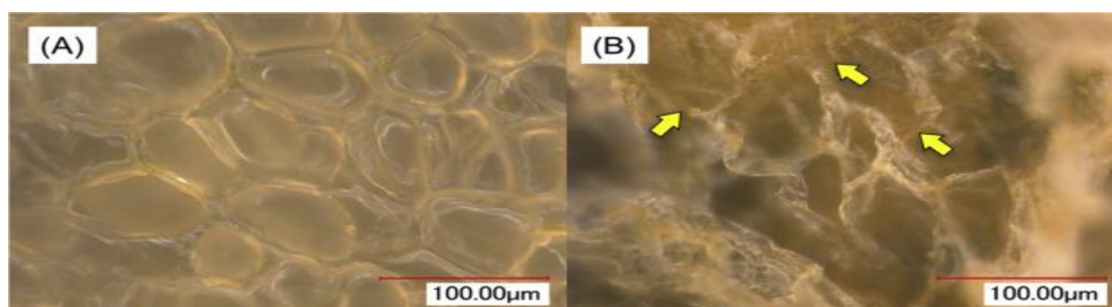
Technologie suché fermentace ve srovnání s mokrou fermentací představuje výhody spojené s nižší předúpravou biomasy. Zejména v případě biologicky rozložitelného odpadu, kde by větší části mohly ucpat čerpadla či poškodit míchadla. Navíc není nutné biomasu ředit, což může být klíčový faktor v zemích, kde je nedostatek vody. Tím se snižují provozní náklady. Během provozu této technologie nedochází k pění digestátu, z důvodu jeho větší viskozity [8]. Mezi další výhody patří větší spolehlivost, z důvodu jednodušší konstrukce, méně odpadového kalu a větší diverzita vstupní biomasy [33]. Tyto výhody jsou částečně vykompenzovány recirkulací perkolátu, což vyžaduje větší kapacitu fermentorů, náklady na naplnění fermentoru a vyvážení digestátu a delší čas přeměny způsobený pomalejším pohybem substrátu [8], [33]. Pro srovnání, v ČR bylo k roku 2017 postaveno 574 BPS využívajících mokrou fermentaci a pouze 3 BPS se suchou fermentací [49].

3.5. Urychlení rozkladu biomasy vysokonapěťovým výbojem

Jednou z možností, jak zefektivnit produkci bioplynu ze suché fermentace, je pomocí urychlení rozkladu buněk. Jednoznačnou nevýhodou suché fermentace je dlouhý čas nutný k přeměně veškerého substrátu na bioplyn [50]. Ten se při mezofilních podmínkách u substrátu s podílem sušiny 20 % zpravidla pohybuje okolo 40 až 50 dní. S rostoucím podílem sušiny je retenční doba v nádrži tři až čtyři měsíce [51].

Urychlení fermentačního procesu lze dosáhnout pomocí úpravy mezibuněčného rozkladu biomasy nárazovou vlnou. Tato metoda je založena na generování rázových vln vysokonapěťovým výbojem ve vodě, což má za následek rychlý nárůst a rozšíření plazmy. Tato metoda má výhodu v tom, že umožňuje rychlé opakování procesu a možnost naakumulovat několik tlakových vln [50].

Destruktivní síly se vyskytují v okamžiku, kdy tlakové vlny procházejí nestlačitelnou kapalinou a interagují s buněčnými stěnami. Rázové vlny procházejí výchozí surovinou při rychlostech překračujících rychlost zvuku. Podvodní rázové vlny, které způsobují okamžitý vysoký tlak, pronikají celou buňkou a selektivně zničí rostlinné buněčné stěny, což celý proces urychlí [50]. Srovnání buněk mrkve před a po aplikaci vysokonapěťového výboje je zobrazeno na obr. 14.

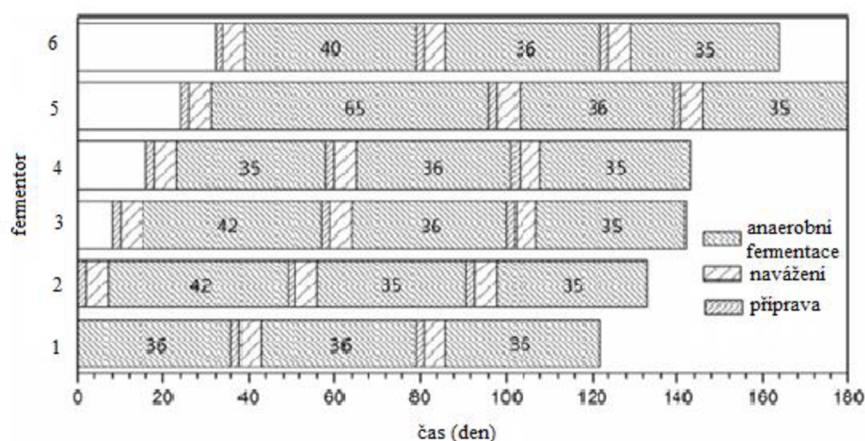


obr. 14: Srovnání buněk mrkve před (A) a po (B) po 1 cyklu rázové vlny [52]

Tato metoda byla aplikována v bioplynové stanici Nedvědice. Výsledky ukázaly, že se produkce bioplynu zvýšila o 30 %, nicméně náklady na tuto technologii jsou příliš vysoké, aby ji bylo možné uvést do praxe [50].

3.6. Případová studie

Praktické využití suché fermentace komunálního odpadu bude uvedeno na příkladu čínské BPS, která se nachází v Heilongjiang provincii. Její popis vychází ze studie [53]. BPS se skládá ze dvou paralelních linek, každá obsahuje šest fermentorů o objemu 400 m³ a jedné nádrže na perkolát o objemu 600 m³. BRKO se transportuje nákladními vozy do BPS, kde se ručně i mechanicky třídí. Oddělují se pouze recyklovatelné materiály neorganického původu. Do fermentoru se biomasa nakládá pomocí bagru. Fermentory jsou izolovány pevnou polyuretanovou pěnou o tloušťce 20 cm a zahřívány horkou vodou pomocí trubek uvnitř betonových zdí na teplotu 37 °C. Za ideálních podmínek trvá jeden cyklus 35 dní a poté se digestát odveze. Inokulace se provádí neustálou cirkulací perkolátu. Perkolát se pomocí hubice umístěné na stropě fermentoru rozprašuje do substrátu, čímž se zajistí pohyb metanogenních bakterií. Na konci procesu se perkolát filtruje a odvede se zpět do nádrže.



graf 4: Retenční doba suché fermentace v jednotlivých fermentorech

Jeden cyklus suché fermentace probíhá okolo 36 dní, rozklad na bioplyn trval nejdéle ve fermentoru č. 5 a to 65 dní, jak lze vidět v grafu 3. To mohlo být způsobeno nedostatečnou inokulací perkolátem. Některé studie ukázaly, že pokud je v raném stádiu fermentace velké množství perkolátu, celková doba fermentace se sníží. Nevýhodou tohoto přístupu je ovšem snížená efektivita, perkolát zabírá velkou kapacitu fermentoru, kde by jinak mohlo být více substrátu a tím i větší produkce bioplynu. Po této době nastane sedmidenní odstávka, která zahrnuje vyprázdnění fermentoru, obvyklou údržbu a naplnění fermentoru novým substrátem.

Denní produkce bioplynu kolísá, výraznější pokles je způsobený nadměrnou či naopak příliš nízkou vlhkostí substrátu. Pokud má substrát příliš vysokou vlhkost, pozastaví se dodávání perkolátu. Rozklad substrátu ovšem vyžaduje neustálou recirkulaci mikroorganismů. Při mokré fermentaci se z tohoto důvodu používají míchadla, u suché fermentace tento pohyb zajišťuje právě perkolát. Proto je nutné najít optimální hranici pro efektivní produkci bioplynu.

Základní charakteristiky produkce bioplynu jsou zobrazeny v tab 1. Měření bylo provedeno na třech cyklech výměny digestátu.

Fermentor	Produkce bioplynu [m³]	Hmotnost biomasy [t]	Obsah metanu [%]	Retenční doba [den]
1	30 886	251,3	59,5	108
2	30 297	260,3	58,3	112
3	33 740	254,3	58,9	113
4	31 452	242,0	65,8	106
5	34 642	248,7	56,1	136
6	35 214	238,3	59,4	111
Nádrž s perkolátem	240 011	-	70,9	180
Celkem	436 242	4485	65,8¹	

tab. 1: Základní charakteristiky produkce bioplynu suchou fermentací

Celková produkce bioplynu během 114 dní z šesti fermentorů o objemu 400 m³ dosáhla hodnoty 196 231 m³, což je 43,75 m³/t, průměrná objemová plynová produkce za den byla 0,72 m³/den. Produkce bioplynu v nádrži s perkolátem o objemu 600 m³ za 180 dní byla 240 011 m³ a průměrná objemová produkce za den dosáhla 2,22 m³/den. Z toho vyplývá, že účinnost anaerobní fermentace byla vyšší v nádrži na perkolát. To mohlo být způsobeno tím, že se na začátku prvního cyklu nepoužil k inokulaci digestát. To prodloužilo dobu anaerobní fermentace a mohlo způsobit okyselení ve fermentoru. Během tohoto prodloužení se anaerobní fermentace rozdělila do dvou fází. Hydrolyza a acetogeneze ve fermentorech a metanogeneze v nádrži na perkolát. Poté co perkolát začal cirkulovat, metanogenní bakterie se dostaly i do fermentoru a bioplyn začal vznikat v obou nádržích. Zlepšení efektivity produkce bioplynu by mohlo nastat změnou inokulace v rané části anaerobní fermentace. Tím by se celý proces urychlil o několik dní.

¹ Průměrná hodnota

3.7. Zhodnocení

Mezi hlavní výhody suché fermentace patří nižší provozní náklady na energie, vyšší spolehlivost (nemůže dojít k zadření míchadel či čerpadel) a snazší manipulace. Zásadní výhodou je i různorodost biomasy, kterou lze fermentovat a také skutečnost, že nedochází k pění z důvodu vyšší viskozity. Suchá fermentace má potenciál dosáhnout podobné produkci bioplynu, zásadní roli hraje nastavení optimálních provozních podmínek pro každou BPS. V praxi má nicméně až třikrát vyšší pořizovací náklady na m³ vyprodukovaného bioplynu, což je způsobeno především větší kapacitou fermentorů z důvodu inokulace a nádrže na perkolát i nižší produkci bioplynu až o 56 %, což představuje zásadní problém v masivnějším rozšíření této technologie. Mezi další nevýhody patří delší retenční čas způsobený pomalejším pohybem metanogenních bakterií, který se zvyšuje s rostoucím podílem sušiny.

Tato technologie má význam především ve využití a zhodnocení BRKO, který by jinak skončil na skládkách a přispíval tak k emisím skleníkových plynů. Nedostupnost velkého množství biomasy může být vyřešeno pomocí suché fermentace vzhledem k diverzitě vstupních materiálů. Přebytek digestátu lze efektivně využít k inokulaci.

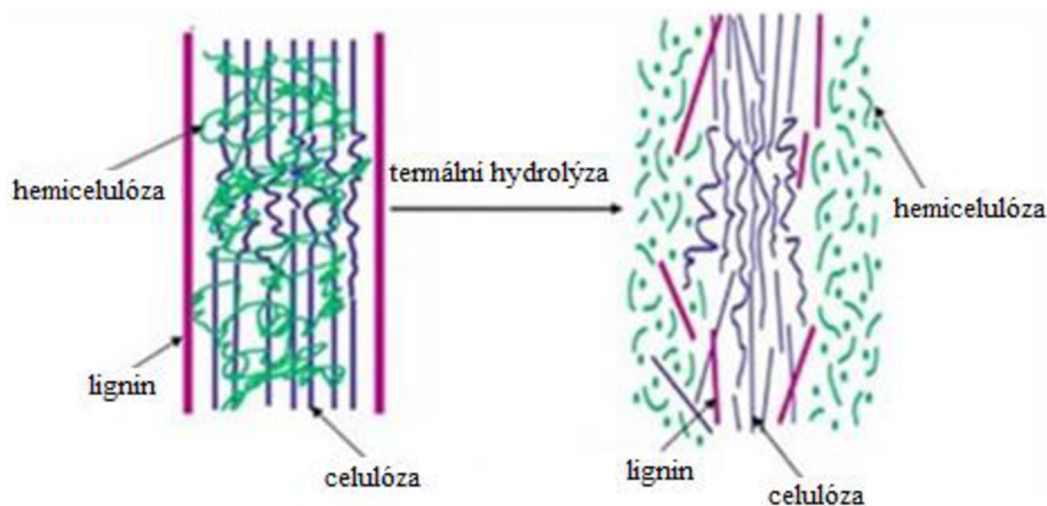
4. Termální hydrolýza

Bioplyn vznikající anaerobní fermentací je nejvýznamnějším plynným biopalivem. Přispívá ke snížení znečištění životního prostředí. K výrobě bioplynu může být použita nejrůznější organická hmota, hojně dostupná je lignocelulózová biomasa [57].

Hlavními složkami lignocelulózy jsou lignin, hemicelulóza a celulóza. Sláma, představující lignocelulózovou biomasu, se využívá především k metanové fermentaci hemicelulózy a celulózy. Obě tyto složky mají hydrofobní strukturu, které jsou spolu s ligninem vázány etherovými a esterovými vazbami [58]. Právě lignin tvoří nepropustnou prostorovou strukturu odolnou vůči mikrobiálnímu rozkladu. Z tohoto důvodu je hlavní překážkou v rozkladu lignocelulózového materiálu [9].

Proto je nutné najít efektivní úpravu, která dokáže eliminovat obsah ligninu a tím podpořit rozklad buněk. Existuje několik metod, které se k tomuto účelu používají. Fyzikální metody na principu mikrovlnných nebo ultrazvukových vln, mechanické extruze či pyrolýza. Chemickými metodami lze rozložit lignin například pomocí mírných kyselin či zásad nebo pomocí ionizační kapaliny. Tyto metody však vyžadují specifické podmínky, jsou energeticky náročné nebo vyžadují použití chemikálií [54].

Termální hydrolýza je progresivní metoda, která může pomoci zefektivnit výrobu bioplynu. Aplikací termální hydrolýzy molekuly vody penetrují skrz lignocelulózu, kde částečně odstraní a naruší strukturu ligninu a hemicelulózy. Zbylá část obsahuje převážně celulózu, která je snadno přístupná jiným anaerobním mikroorganismům, a může být využita v dalších biologických procesech jako je výroba etanolu nebo bioplynu [57]. Znázornění rozkladu lignocelulózové biomasy je zobrazeno na obr. 15.

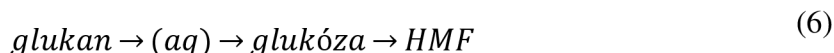
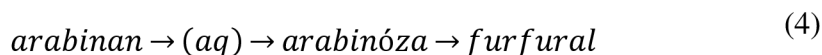
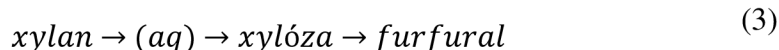
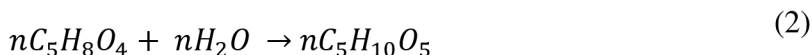
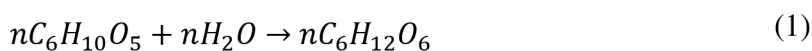


obr. 15: Schéma rozkladu lignocelulózové biomasy pomocí termální hydrolýzy [55]

Kapalný zbytek neboli hydrolyzát obsahuje velké množství pentózy, která vzniká rozkladem hemicelulózy. Hydrolyzát není vhodný pro kvasinky, které se využívají k výrobě etanolu, tudíž se může využít právě k výrobě bioplynu [57].

4.1. Princip

Termální hydrolýza je proces, při kterém se lignocelulózová biomasa částečně rozloží působením vody za vysoké teploty a tlaku. Tento proces může trvat několik minut až hodin. Průběh rozkladu lignocelulózy je znázorněn rovnicemi (1) až (6) [56].



Princip termální hydrolýzy spočívá v tom, že se voda dostane skrz lignin, hydratuje celulózu, rozpustí výrazné množství hemicelulózy (xylan) a částečně odstraní lignin. Zvýšená kinetická energie způsobená vysokou teplotou napomáhá polymerním reakcím, tudíž vede k rozkladu buněčných stěn ligninu. Dále dochází k nárůstu celulózy, což je esenciální pro následnou anaerobní fermentaci. Molekuly vody za vysokého tlaku štěpí acetyl obsažený v hemicelulóze na kyselinu octovou a další kyseliny, které napomáhají rozpouštění oligosacharidy. Právě kationt H_3O^+ obsažený v kyselině octové je důležitý prvek, který umožní otevřít strukturu a částečně odstranit lignin. Efektivita této metody závisí na nastavení optimálních podmínek pro každý substrát [56].

4.2. Případová studie

Zkoumání efektivity této metody a nalezení optimálních podmínek bylo provedeno na světlici barvířské. Následující podkapitola vychází ze studie [57]. Světlice barvířská je nenáročná plodina, která se vyskytuje v teplejších oblastech. Pomáhá zadržovat vodu v krajině a je odolná vůči silnému větru. Z nažek se lisuje olej, který se používá v potravinářství, kosmetickém i v barvířském průmyslu jako zdroj žlutého odstínu [59]. Stébla této rostliny se dále nevyužívají, i proto jsou vhodné pro výrobu bioplynu za předpokladu hydrotermálního zpracování.

4.2.1. Postup

K maximalizaci zisku bioplynu je důležité nastavit optimální podmínky hydrolýzy. Nejdříve se ručně oddělí semena od plodiny. Stébla slámy světlice byla sušena okolní teplotou po dobu tří dnů a poté se rozdrtily na prášek. Hydrotermální hydrolýza byla prováděna při různých teplotách (120, 150 a 180 °C) po dobu (1, 2, 5 hod) ve vysokotlaké nádobě o objemu 500 ml. Vzorek obsahoval 10 g prášku světlice a 110 ml destilované vody. Poté se nádoba začala zahřívat na danou teplotu a čas. Po uplynutí této doby se prudce ochladila v ledové nádrži. Obě složky – pevná i kapalná se oddělily vakuovou filtrací. Tuhý zbytek se promyl destilovanou vodou a nechal se sušit při pokojové teplotě tři dny, potom se uložil, aby mohl být dále využit. Kapalná část se zneutralizovala hydroxidem sodným a vložila se do lednice.

Obě složky bez i po aplikaci hydrotermální hydrolýzy byly vloženy do fermentorů, kde probíhala anaerobní fermentace.

4.2.2. Vliv na složení

Stéblo světlice barvířské se skládá převážně z celulózy, hemicelulózy a ligninu. Složení pevné složky při různých podmínkách hydrotermální hydrolýzy je zobrazeno v tab. 2.

Termální hydrolýza		Složení pevné složky po aplikaci termální hydrolýzy [%]		
Teplota [°C]	Čas [hod]	Glukan	Xylan	Lignin
120	1	36,7	18,4	19,2
120	2	37,9	17,7	20,1
120	5	38,2	17,9	20,8
150	1	40,4	18,1	21,5
150	2	42,5	17,8	24,7
150	5	44,7	15,3	24,9
180	1	48,9	7,1	27,1
180	2	55,9	3,3	33,1
180	5	58,8	3,1	36,3
Bez zpracování		35,1	19,6	22

tab. 2: Složení pevné složky lignocelulózy biomasy při nastavených podmínkách termální hydrolýzy, upraveno

Z výsledků uvedených v tab. 2 lze říci, že stéblo světlice obsahovalo 35,1 % glukanu, 19,6 % xylanu (součást hemicelulózy), 22 % ligninu, zbytek obsahoval vodu a alkoholové extrakty. Po aplikování termální hydrolýzy nastaly největší změny u xylanu, a to jeho redukce až o 85 % u nejméně nastaveného zpracování. To bylo způsobeno kvůli jeho amorfní a méně stabilní struktuře. Hodnoty glukanu se oproti tomu zvýšily až o 67 %. Při použití mírných podmínek hydrolýzy se nejdříve podíl ligninu snížil, a to o 4,3 %. Naopak při působení vody o teplotě 180 °C po dobu pěti hodin se nežádoucí podíl ligninu zvýšil až o 65 %.

Složení hydrolyzátu při různých podmínkách termální hydrolyzy je prezentováno v tab. 3.

Podmínky termální hydrolyzy		Složení hydrolyzátu po aplikaci termální hydrolyzy [%]				
Teplota [°C]	Čas [hod]	pH	Cukry [g/l]	Kyselina octová [g/l]	Furfural [g/l]	HMF [g/l]
120	1	5,92	8,14	<0,01	<0,01	<0,01
120	2	5,73	8,47	<0,01	<0,01	<0,01
120	5	5,67	9,24	<0,01	<0,01	<0,01
150	1	5,29	10,83	0,09	<0,01	<0,01
150	2	5,23	12,95	0,15	<0,01	<0,01
150	5	5,09	15,07	0,17	0,01	0,04
180	1	4,94	19,72	0,24	0,07	0,08
180	2	4,64	19,15	0,45	0,14	0,11
180	5	4,50	19,08	0,67		

tab. 3: Složení hydrolyzátu po aplikaci termální hydrolyzy, upraveno

Složení cukrů v hydrolyzátu se zvyšovalo s intenzitou hydrotermálního zpracování z 8,14 g/l až na 19,08 g/l v důsledku zvyšujícího se podílu hemicelulózy s rostoucí teplotou. S rostoucí teplotou se také zvyšovala kyselost přibývajícím množstvím kyseliny octové, způsobené hydrolyzou acetylových skupin v hemicelulóze. Furfural, 5 – hydroxymetylfurfural (HMF) a kyselina octová jsou důležitými inhibitory vzniklé hydrotermálním zpracováním. Furfural a HMF vznikají rozkladem cukrů, který byl naměřen až při pětihodinovém působení o teplotě 150 °C. Tyto nízké kvantitativní hodnoty inhibitorů ovšem nemají vliv na působení anaerobní fermentace. Podíl metanu a oxidu uhličitého v bioplynu z obou frakcí při různých podmínkách termální hydrolyzy je uvedeno v tab. 4.

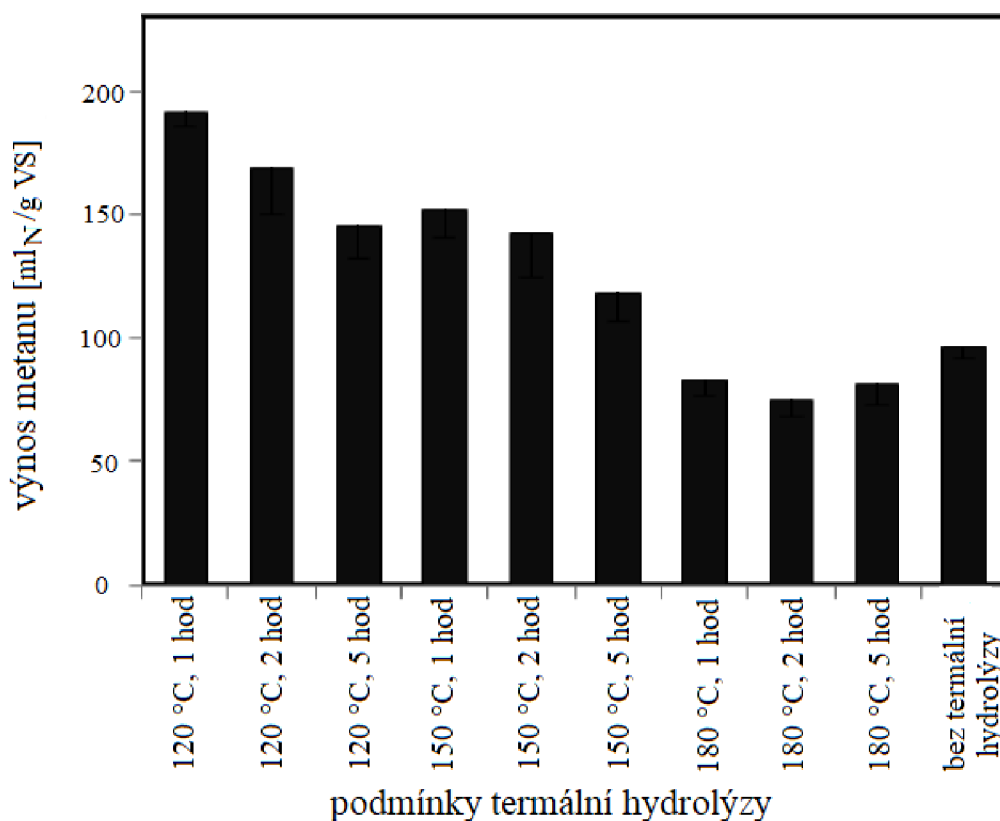
Podmínky termální hydrolyzy		Bioplyn z pevné frakce		Bioplyn z kapalně frakce	
Teplota [°C]	Čas [hod]	Metan [%]	Oxid uhličitý [%]	Metan [%]	Oxid uhličitý [%]
120	1	52,2	47,8	65,9	34,1
120	2	50,9	49,1	62,3	37,7
120	5	49,3	50,7	58,6	41,4
150	1	50,5	49,5	65,5	34,5
150	2	52,8	47,2	62,1	37,9
150	5	53,4	46,6	60,7	39,3
180	1	54,3	45,7	58,7	41,3
180	2	52,6	47,4	56,1	43,9
180	5	56,4	43,6	59,4	40,6
Bez zpracování		53,8	46,2		

tab. 4: Podíl metanu a oxidu uhličitého při různých podmínkách termální hydrolyzy, upraveno

Obsah metanu v bioplynu z pevné frakce se pohyboval v rozmezí 49,3 až 56,4 % napříč různými podmínkami, není zde vidět přímá závislost na typu použité podmínky. Hodnoty obsahu metanu fluktuují okolo 53,8 %, která byla změřena bez použití termálního zpracování. Hodnoty z kapalné frakce jsou vyšší, obsah metanu kolísá mezi hodnotami 56,1 až 65,9 %. Nejvyšší podíl metanu v bioplynu byl naměřen v hydrolyzátu za nejméně intenzivních podmínek, tedy při 120 °C po dobu jedné hodiny. Z tohoto měření vyplývá, že termální hydrolyza má pouze minimální vliv na složení bioplynu.

4.2.3. Anaerobní fermentace pevné frakce

Výnosy metanu ze stébla světlíce barvířské při aplikování termální hydrolyzy jsou zobrazeny v grafu 5.

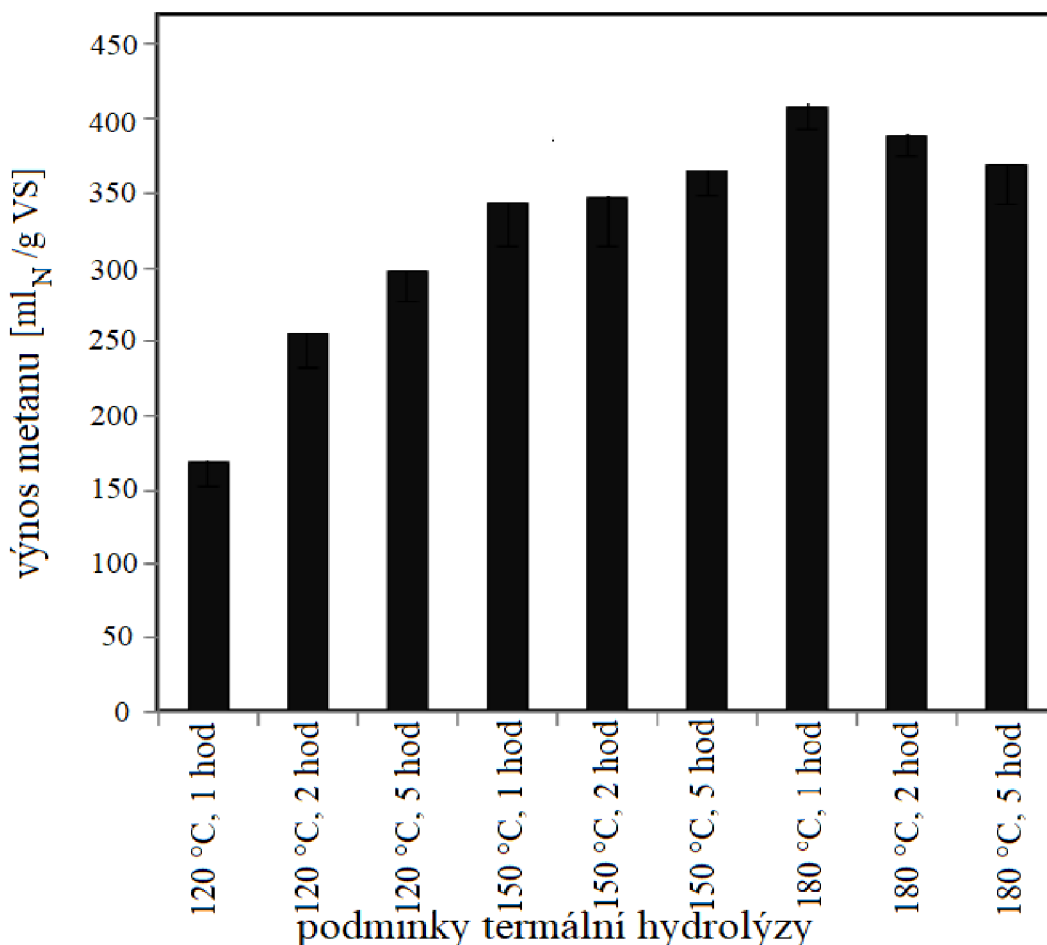


graf 5: Výnos metanu z pevné frakce při různých podmínkách termální hydrolyzy, upraveno

Výtěžek metanu po aplikaci termální hydrolyzy dosáhl maximální hodnoty při teplotě 120 °C po dobu jedné hodiny 191,4 ml_N/g VS, což byl nárůst o 98 % vzhledem k výnosu metanu bez použití této technologie (96,5 ml_N/g VS). Při zvyšování teploty nad 120 °C došlo k výraznému poklesu metanu. Při působení teploty 180 °C byl výtěžek dokonce nižší než bez aplikování termální hydrolyzy. To bylo způsobeno tím, že vysoká teplota velmi snížila obsah xylanu, který pozitivně ovlivňuje anaerobní fermentaci. Navýšení výnosu metanu u nejméně intenzivně nastavených podmínek není autory této studie nijak vysvětleno. Z výsledků je zřejmé, že výnos metanu ovlivňuje především nižší teplota i kratší doba působení.

4.2.4. Anaerobní fermentace kapalné frakce

Výnosy metanu z hydrolyzátu jsou uvedeny v grafu 6.



graf 6: Výnos metanu z hydrolyzátu při různých podmínkách termální hydrolyzy, upraveno

V grafu 6 lze pozorovat opačnou tendenci než u kapalné frakce. S rostoucí teplotou se výnos metanu rapidně zvyšoval. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo za teploty 180 °C po dobu jedné hodiny, a to 406,9 ml_N/g VS. To koresponduje s výsledky složení hydrolyzátu za těchto podmínek, neboť se z hemicelulózy uvolnilo největší množství cukrů, což mělo pozitivní vliv na produkci metanu. Doba působení zpracování měla na výnos metanu větší podíl při nižších teplotách, naopak u nejvyšší teploty měla doba působení negativní vliv.

4.3. Finanční návratnost

Důležitým parametrem každé inovativní technologie je rentabilita. Ekonomickým zhodnocením a výnosem bioplynu po aplikaci termální hydrolyzy se zabývala studie [60]. Termální hydrolyza byla aplikována po dobu 30 min o teplotě 170 °C v laboratorních podmínkách na šesti typech substrátu. Nejvyšší nárůst výnosu metanu, a to až o 50 % po aplikování termální hydrolyzy je zatelný u BRKO s podílem lignocelulóзовé biomasy. Aplikace termální hydrolyzy může zvýšit příjem BPS až o 40 %, dokonce až zdvojnásobit, pokud se započítají náklady spojené s digestátem. Optimální podmínky termální hydrolyzy

mohou vést k významným úsporám až 5 eur/t. Vysoké teploty lze částečně dosáhnout využitím tepla z kogenerace. V praxi by po aplikaci termální hydrolýzy BPS zpracovávající BRKO s podílem lignocelulózové biomasy o objemu 30 000 t/rok mohla vést k zisku až půl milionu eur ročně. Aplikace termální hydrolýzy je velice účinným nástrojem ke zvýšení produkce bioplynu a tím i zisku.

4.4. Zhodnocení

Termální hydrolýza je metoda, kterou lze zvýšit produkci bioplynu. Aplikací termální hydrolýzy se molekuly vody o vysoké teplotě dostanou skrz lignocelulózu, kde pomáhají redukovat lignin. Z výsledků provedených na stéblu světlíce barvířské lze říci, že největší efektivita z pevné frakce, a to nárůst o 98 %, tato metoda dosáhla při nejméně intenzivních nastavených podmínkách, a to při 120 °C po dobu jedné hodiny. U kapalné složky je vidět opačný trend, největší produkce metanu nastala za teploty 180 °C. Nastavení optimálních podmínek se liší pro různé druhy lignocelulózové biomasy. Ze studie provedené na kakaových luscích vyplývají optimální podmínky působení vody o teplotě 150 °C po dobu 15 minut [61]. Nastavení optimální teploty a doby působení má výrazný vliv na výnos bioplynu a liší se pro různé typy substrátu. To má vysoký vliv na provozní náklady. Ze studie, ve které byla aplikována voda o relativně vysoké teplotě (170 °C) po dobu 30 minut však vyplývá, že výnos bioplynu se zvýšil až o 50 %, což vedlo k úsporám až 5 eur/t a k navýšení zisku až půl milionu eur ročně u BPS o objemu 30 000 t/rok.

Tato technologie je vysoce efektivní při aplikování na lignocelulózové biomase a dosahuje vyšších výnosů bioplynu o desítky procent. Tato hojně dostupná biomasa může částečně vyřešit problém s nedostupností biomasy. Teplo potřebné pro tuto technologii lze využít z kogenerace BPS, čímž se výrazně snižují provozní náklady.

5. Biometan

Bioplyn lze získat anaerobní fermentací různých organických materiálů. Bioplyn se skládá z metanu (okolo 60 %), oxidu uhličitého (okolo 40 %) a různých nečistot, především sulfanu a vody. Poměr těchto látek závisí na typu substrátu, který se fermentuje. Proto, aby se mohl bioplyn využít jako biopalivo, je nutné ho purifikovat a odstranit většinu CO₂ [10]. Takto upravený bioplyn se nazývá biometan a obsahuje až 99 % metanu. Biometan lze použít jako palivo pro vozidla, protože má velmi podobné vlastnosti jako zemní plyn. Dopravní sektor je vysoce závislý na ropě, tuto závislost napomáhají snížit právě biopaliva. Spolu s elektřinou a teplem je mobilita jednou ze základních oblastí, kde lidé spotřebovávají energii [20].

Anaerobní fermentace organických odpadů v BPS zachycuje a využívá vysoké množství metanu, který by jinak vznikal rozkladem organické hmoty v přírodě, emitoval by do atmosféry a napomáhal tak skleníkovému efektu. Z tohoto důvodu jsou emise oxidu uhličitého vzniklé spalováním biometanu částečně zanedbatelné a celková uhlíková stopa je relativně nízká [62]. Toto tvrzení je ovšem také závislé na tom, z čeho se biometan vyrábí. K roku 2017 bylo v EU 224 BPS s možností upgradu na biometan, ovšem 181 z nich jsou tzv. zařízení první generace, které využívají k výrobě bioplynu biomasu jako je cukr, škrob a oleje. Pouze zbylých 43 BPS jsou tzv. zařízení druhé generace, které využívají více udržitelné lignocelulózní biomasy, nepotravinových plodin a biologického odpadu [63].

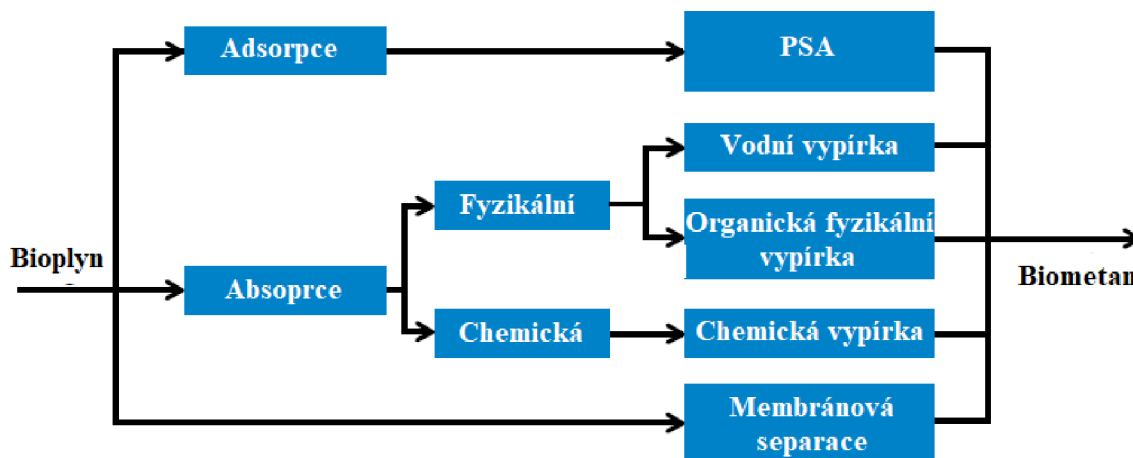
5.1. Upgrade bioplynu

Upgrade, někdy též označován jako purifikace, je čištění bioplynu k získání biometanu. To se provádí odstraněním vodní páry, sulfanu a oxidu uhličitého. Sulfan je vysoce korozivní a může vést k poškození spalovacích motorů. Navíc jeho spalováním uniká do ovzduší oxid siřičitý, což má negativní dopad na životní prostředí [64]. Sulfan může být odstraněn již během procesu anaerobní fermentace přidáním různých oxidů a solí do fermentoru [10].

Vodní pára se separuje pomocí tepelného čerpadla již v BPS. Bioplyn je ve výměníku tepla ochlazen a zkondenzovaná voda se separuje. Poté se bioplyn znovu ohřeje kompresní částí chladicího agregátu. Další jednoduchý způsob odstranění vlhkosti je pomocí zabudování plynovodu mezi fermentorem a kogenerační jednotkou do země. Tím se dosáhne požadované teploty ke kondenzaci [30].

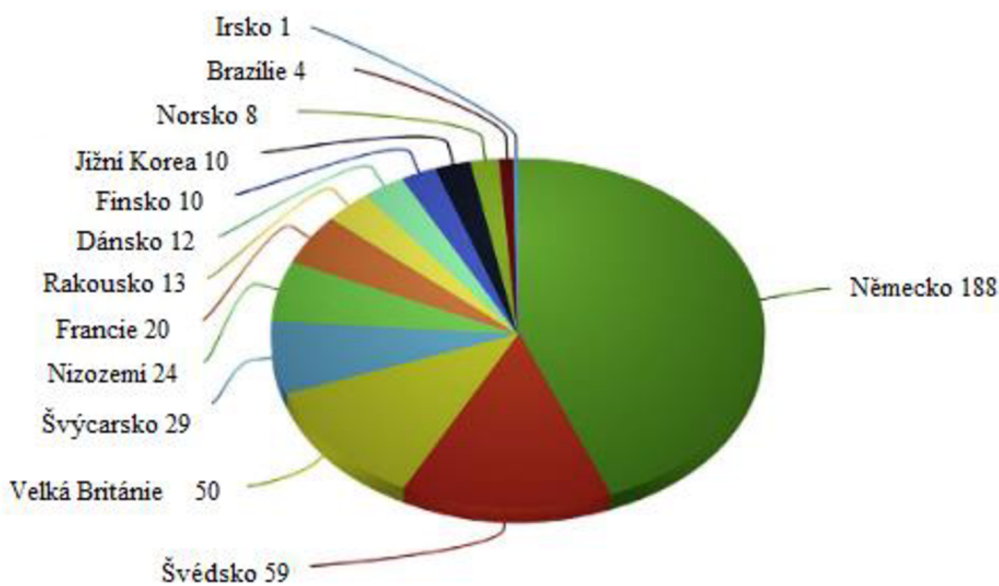
Oxid uhličitý se odstraňuje především k dosažení vyššího spalného tepla a k získání podobného složení jako má zemní plyn. Technologie, které eliminují oxid uhličitý, lze rozdělit do dvou kategorií na fyzikálně – chemické a biotechnologické. Tradiční technologie založené na fyzikálně – chemických principech stále dominují na trhu, v posledních letech se ovšem rozvíjejí perspektivní biotechnologické metody, které separovaný oxid uhličitý dokáží zhodnotit [64].

V současné době existuje pět komerčních technologií separující oxid uhličitý, které jsou založeny na fyzikálních či chemických principech. Schéma těchto technologií je zobrazeno na obr. 16.



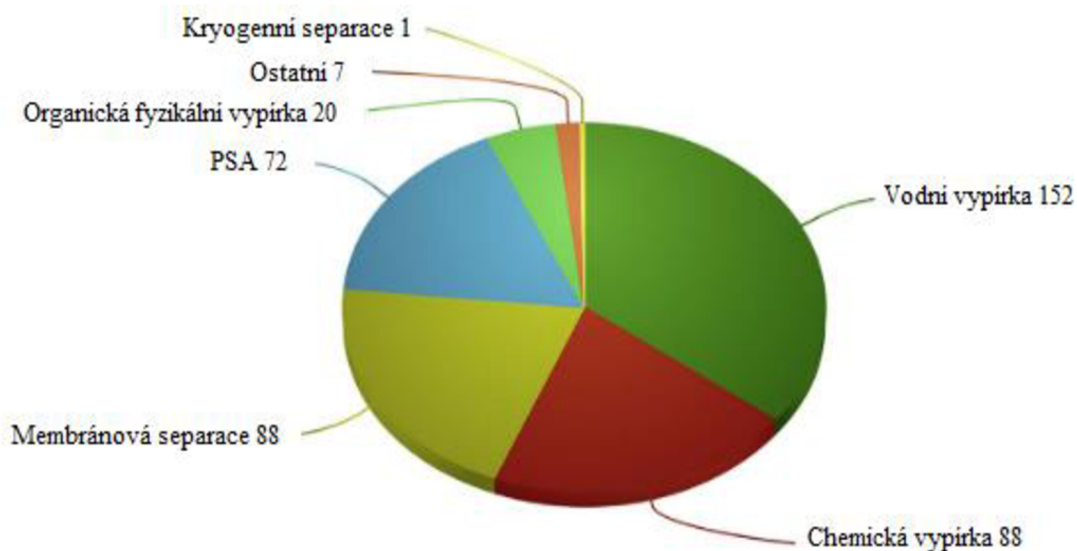
obr. 16: Schéma fyzikálně – chemických metod separující oxid uhličitý, upraveno [10]

Celosvětově ve výrobě biometanu dominují země jako je Švédsko, Velká Británie a především Německo, jak vyplývá z grafu 7.



graf 7: Státy a počty jejich BPS s upgradem na biometan, upraveno [11]

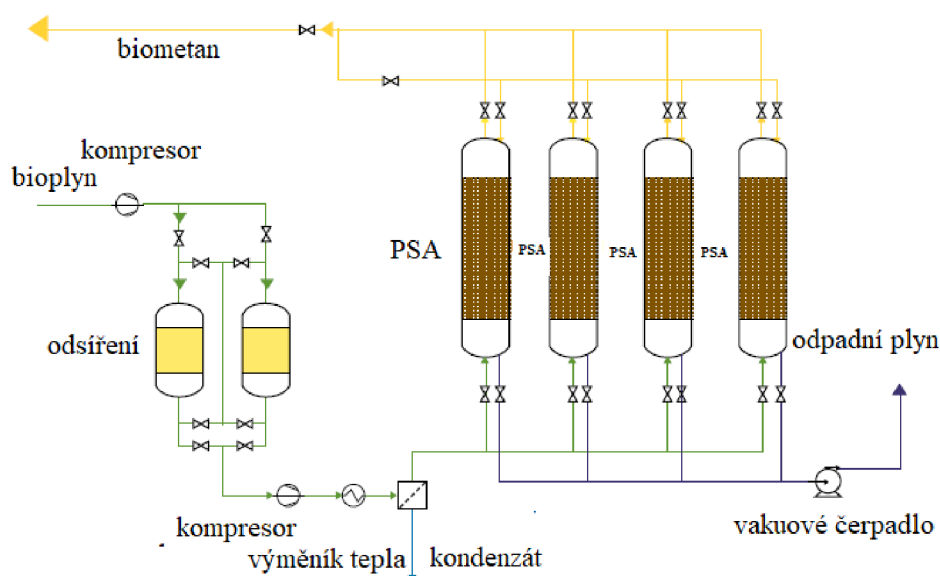
V ČR se momentálně staví první BPS s možností upgradu bioplynu [49]. Zastoupení jednotlivých technologií je zobrazeno v grafu 8, ze kterého vyplývá dominantní postavení vodní vypírky. Mezi další frekventované technologie patří chemická vypírka, membránová separace a PSA, které budou podrobněji popsány v následující podkapitole.



graf 8: Zastoupení komerčních technologií separující oxid uhličitý z bioplynu, upraveno [11]

5.1.1. PSA (Pressure swing adsorption)

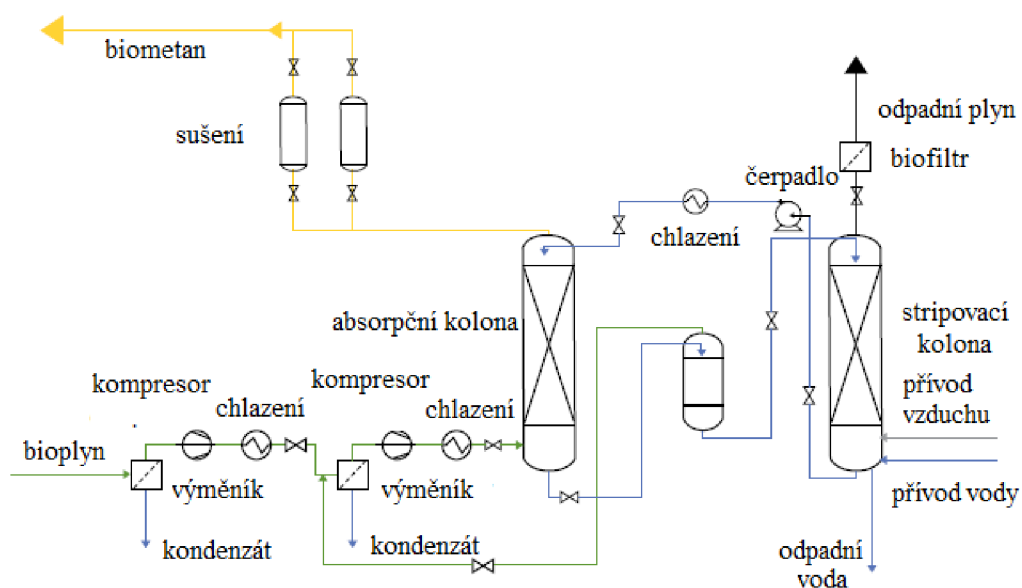
Tato technologie je založena na různé molekulární charakteristice a afinitě k adsorpčnímu materiálu. Jako adsorpční materiál se nejčastěji používá aktivní uhlí, silikagel či zeolit. Princip této metody spočívá v zachycování plynných nečistot (oxidu uhličitého a sulfanu) bioplynu na pevných látkách za vyššího tlaku [64]. Adsorpce nečistot na aktivním uhlí se provádí v tlakové nádobě o tlaku 4 až 7 barů. Stlačený bioplyn se vstříkne do adsorpční kolony, ve kterém aktivní uhlí selektivně zachytí oxid uhličitý, zatímco metan je schopný proudit skrz adsorbent až k hornímu okraji nádoby [11]. Po nasycení adsorbentu, kdy už není schopný zachytit více, se v nádobě sníží tlak a vypustí se oxid uhličitý. Pro zachování kontinuálního procesu se instaluje několik adsorpčních kolon v různých fázích adsorpce [10]. Čistota biometanu dosahuje 96 až 98 %, nicméně až 4 % metanu se mohou ztratit během vypouštění oxidu uhličitého [11]. Schéma této technologie je zobrazeno na obr. 17.



obr. 17: Schéma PSA technologie, upraveno [10]

5.1.2. Vodní vypírka

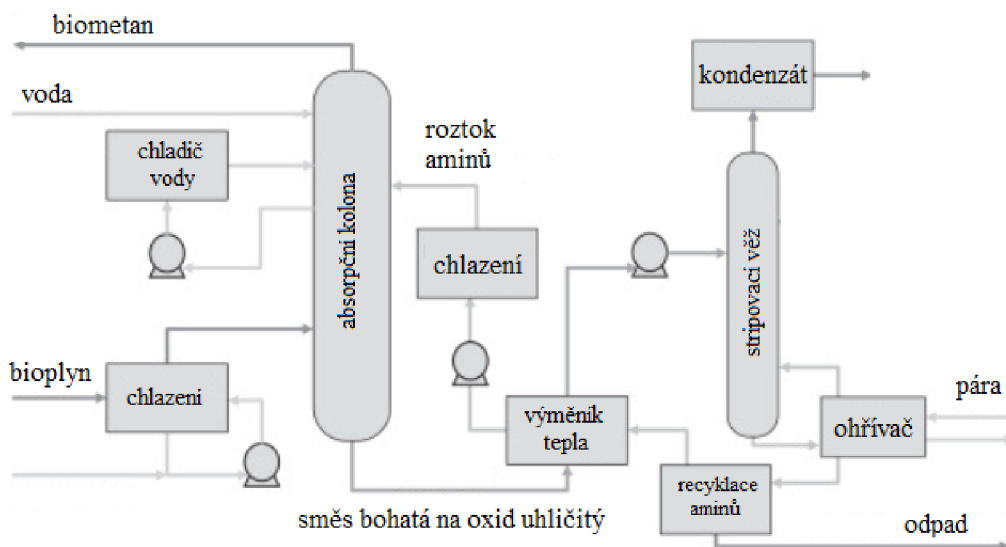
Tato technologie je založena na rozdílné rozpustnosti oxidu uhličitého a metanu ve vodě. Oxid uhličitý je více rozpustný ve vodě než metan (při teplotě 25 °C až 26krát). Zpočátku se zvýší tlak bioplynu na 6 až 10 barů a vstříkne se do absorpční kolony ze spodní strany, zatímco voda je přiváděna ze shora nádrže. Protože se metan ve vodě nerozpouští, shlukuje se na vrchu nádoby. Biometan se poté vypustí z horní části nádrže, zatímco voda obohacená o oxid uhličitý a stopy sulfanu putuje do druhé nádrže, ve které se sníží tlak. Tím se uvolní stopy metanu, které se ve vodě rozpustily [11]. Nečistoty jsou poté uvolněny z vody ve stripovací koloně spolu s párou [64]. Poté, co se biometan vysuší, má čistotu až 99 %. Schéma této technologie je zobrazeno na obr. 18.



obr. 18: Schéma technologie vodní vypírky, upraveno [10]

5.1.3. Chemická vypírka

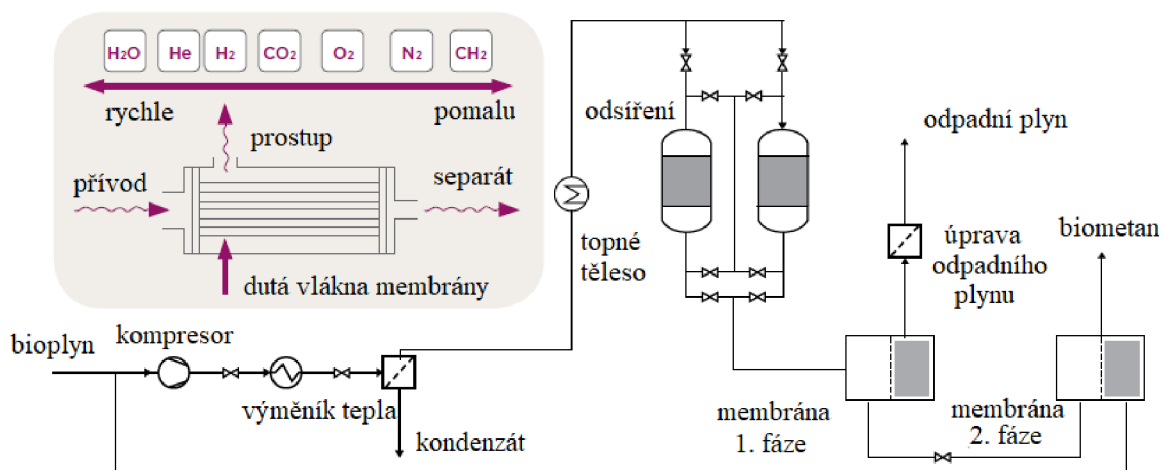
Chemická vypírka využívá vodné roztoky aminů k navázání oxidu uhličitého. Skládá se z absorpční a stripovací kolony. Bioplyn o tlaku 1 až 2 bary se přivede ze spodu do absorpční kolony, zatímco roztok aminů proudí z vrchu kolony. Exotermická reakce způsobí, že je oxid uhličitý navázán do vodného roztoku. Tato směs pak putuje do stripovací kolony, kde je teplota až 160 °C. Takto vysoká teplota má za následek narušení chemických vazeb a uvolnění oxidu uhličitého a páry, která na konci procesu zkondenzuje a je možné ji znovu využít. Schéma chemické vypírky je zobrazeno na obr. 19



obr. 19: Schéma chemické vypírky, upraveno [65]

5.1.4. Membránová separace

Tato technologie je založena na selektivní průchodnosti molekul přes membránu. Poté, co jsou z bioplynu odstraněny nečistoty, převážně sulfan, se bioplyn stlačí na tlak 4 až 16 barů a začne procházet přes speciální membránu. Molekuly CO_2 jí snadno projdou, zatímco metan jako relativně velká molekula se přes ní nedostane. Tím vzniká plyn s vysokým obsahem metanu neboli biometan [10]. Schéma principu je znázorněno na obr. 20.



obr. 20: Schéma membránové separace, upraveno [10]

Tyto speciální membrány můžeme rozdělit na symetrické, asymetrické a kompozitní.

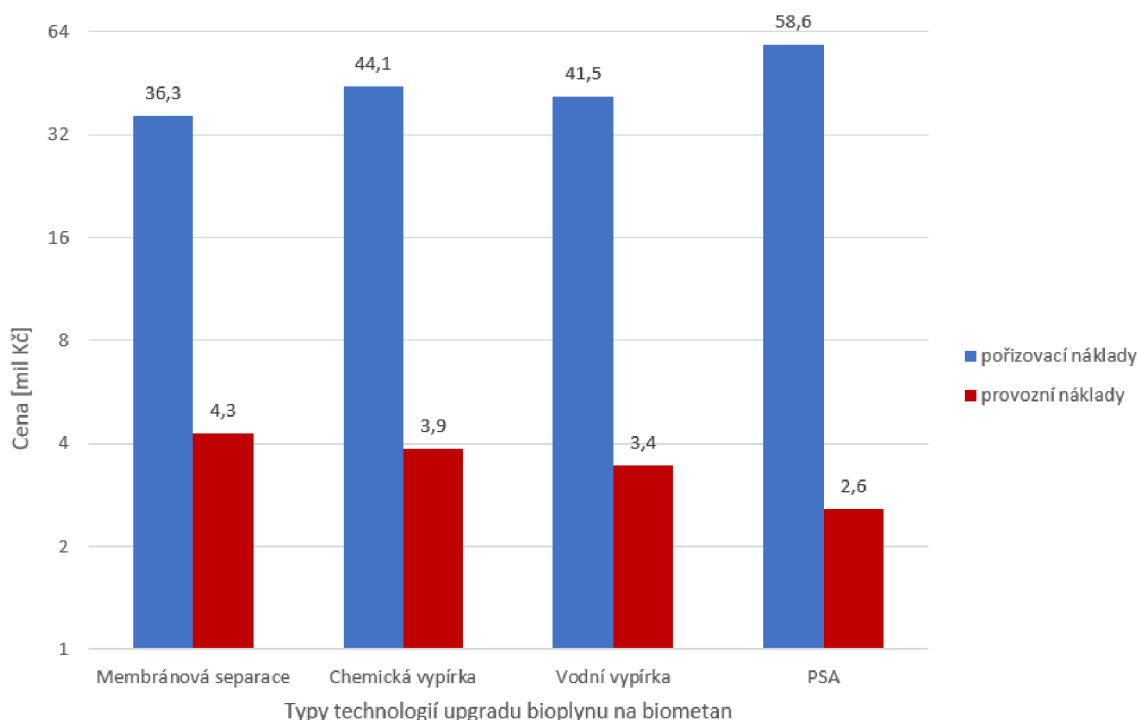
- Symetrické membrány – jsou vyrobeny z jednoho materiálu o tloušťce v řádech desetin až jednotek milimetrů [66].

- Asymetrické membrány – obsahují speciální aktivní vrstvu o tloušťce v řádech desetin až desítek mikrometrů, která je umístěna na pórovité podpůrné vrstvě zlepšující mechanické vlastnosti membrány [66].
- Kompozitní membrány – jsou vyrobeny z několika druhů materiálů. Separace oxidu uhličitého probíhá taktéž na aktivní vrstvě, ta je však oddělena od podpůrné vrstvy dalšími mezivrstvami [66].

V technologické praxi se nejvíce využívají asymetrické a kompozitní membrány. Materiál membrány musí být chemicky odolný vůči oxidu uhličitému a vysoké teplotě, která může dosahovat až 50 °C. Z tohoto důvodu se pro separaci oxidu uhličitého z bioplynu používají převážně membrány polymerní ze silikonového kaučuku nebo acetátu celulózy. Únik metanu během separace lze eliminovat použitím více separačních stupňů zapojených v sérii [66]. Membrány mohou simultánně odstranit oxid uhličitý i sulfan, nicméně se v praxi sulfan odstraňuje předem, z důvodu snížení životnosti membrány [64].

5.1.5. Ekonomika fyzikálně – chemických technologií upgradu bioplynu

Příklad investičních a provozních nákladů pro BPS o kapacitě 400 m³/h bioplynu vycházející z diplomové práce [67] je uveden v grafu 9. Předpokladem je obsah metanu v bioplynu 55 %. U všech technologií kromě chemické absorpce jsou započítány investice pro nakládání s odpadním plynem.



graf 9: Srovnání pořizovacích a ročních provozních nákladů jednotlivých technologií pro výrobu biometanu o objemu 400 m³/h bioplynu [67]

Z grafu 9 vyplývá, že celkové pořizovací náklady jsou nejnižší u technologie membránové separace, a to až o 5,2 mil. Kč nižší než u druhé nejlevnější technologie – vodní vypírky. Membránová separace má však nejvyšší provozní náklady a to přes 4 mil. Kč ročně. Nejvyšší

pořizovací a zároveň nejnižší provozní náklady má technologie PSA. Při průměrné patnáctileté životnosti jsou celkové náklady nejnižší u vodní vypírky, a to 93,1 mil. Kč. Z tohoto důvodu se jedná o celosvětově nejrozšířenější technologii [11].

5.1.6. Chemoautotrofní technologie

Biologické technologie zabývající se upgradem bioplynu dělíme na chemoautotrofní a fotosyntetické. Většina těchto technologií jsou v počáteční fázi implementace do praxe. Hlavní výhodou těchto technologií je skutečnost, že separovaný oxid uhličitý dokáží zhodnotit. Chemoautotrofní metoda je založena na působení hydrogenotrofních metanogenů, které využívají vodík k přeměně oxidu uhličitého na metan dle níže uvedené rovnice [11].



Tato technologie slouží také k ukládání přebytečné energie vyrobené větrnými či solárními elektrárnami. Baterie používané k uložení elektřiny mají nízkou kapacitu, vysoké výrobní náklady a často obsahují toxické chemikálie. Samotný vodík má nicméně několik nevýhod, např. nízká objemová energetická hustota, která jej činí špatně skladovatelným [11].

Aby však měla tato technologie nízký dopad na životní prostředí, je nutné získat vodík hydrolýzou vody, pomocí zbytkové elektřiny z OZE. Tato technologie je velmi atraktivní, protože spojuje větrné či solární zdroje energie s bioplynem. Tento proces je slibným prostředkem k přeměně elektřiny na snadněji skladovatelný energetický nosič jako je metan. Tuto metodu lze implementovat do stávajících BPS, čímž se snižují počáteční investiční náklady. Tím, že se oxid uhličitý přímo využije k přeměně na metan, dochází ke zvýšení konečné energetické hodnoty biometanu [11]. Chemoautotrofní technologie vyžaduje dlouhý čas k adaptaci mikroorganismů, aby efektivně fermentovali oxid uhličitý a vodík, při mezofilních podmínkách až 8 měsíců, jak vyplývá ze studie [68].

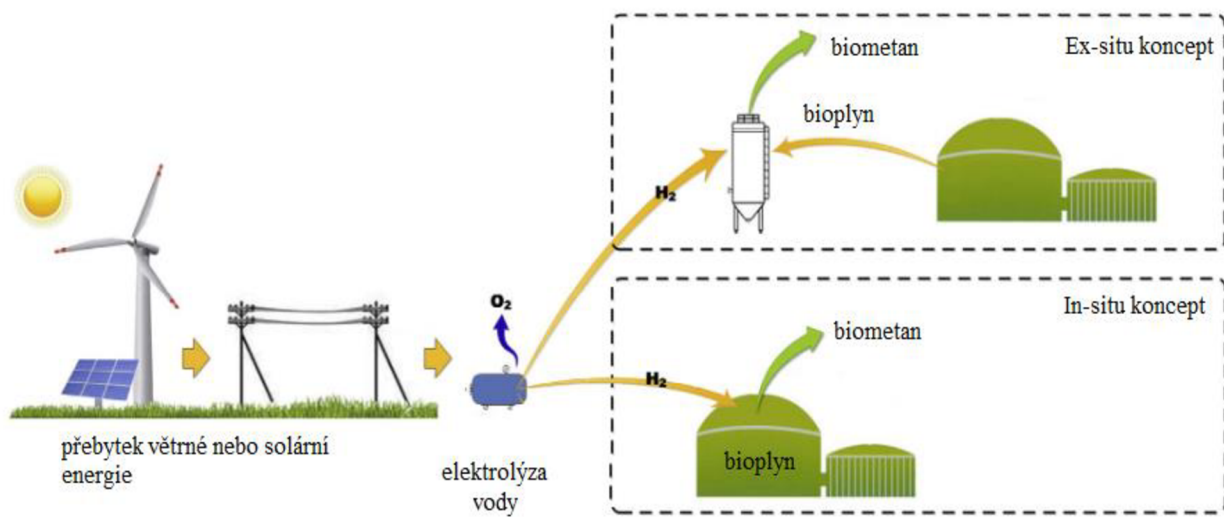
Chemoautotrofní technologii lze rozdělit do tří kategorií na in – situ, ex – situ a hybridní koncept. První dvě zmíněné technologie jsou již experimentálně ověřené, zatímco hybridní koncept je stále v raném vývoji, proto v této práci nebude zmíněn [11].

- In – situ koncept – vodík se vstříkne přímo do fermentoru, kde reaguje s oxidem uhličitým v bioplynu za vzniku metanu. Tato technologie dosahuje čistoty až 99 %, pokud je dodrženo optimální pH. Přísun vodíku totiž způsobí zvýšení pH až k hodnotě 8,5, což vede k inhibici metanogeneze [11].
- Ex – situ koncept – Oxid uhličitý reaguje s vodíkem v externí koloně, která obsahuje hydrogenotrofní kulturu, což má za následek tvorbu biometanu. Tato technologie má několik výhod jako je stabilita rozkladu na bioplyn, protože se k upgradu využívá externí jednotky, další výhodou je jednodušší biochemický proces, protože zde nedochází k anaerobní fermentaci. Využívá se zpravidla termofilních podmínek. [11].

Hlavní výhodou in – situ konceptu oproti ex – situ konceptu je nižší investice u existující BPS do rozšíření fermentoru. Hlavním problémem představuje specifické množství vodíku, které se musí neustále přizpůsobovat aktuálnímu obsahu oxidu uhličitého v anaerobní

fermentaci, což má za následek vyšší náklady na měřicí zařízení a prvky spojené s automatizací procesu. Na druhé straně ex – situ koncept má výhodu v tom, že jeho biochemický proces je stabilnější a dosahuje vyšší účinnosti. Zvýšení efektivity lze dosáhnout pomocí aplikace keramické membrány [69].

Energetická spotřeba je důležitým faktorem v porovnávání s fyzikálně – chemickými metodami. Celkové energetické nároky u ex – situ konceptu s keramickou membránou činí 0,44 Kwh/m³ bioplynu, což je vyšší hodnota než u PSA nebo vodní vypírky (0,2 až 0,3 kWh/m³ bioplynu). Pomocí chemoautotrofní technologie lze však separovaný oxid uhličitý přeměnit na metan, čímž se zvýší jeho produkce. Z 1 m³ bioplynu lze tak získat až 0,35 m³ nového metanu. Celkové energetické náklady této technologie tak dosahují 13 % energie, které se získá ze spalení nově vzniklého metanu. Potenciální energie z biometanu dosahuje v klasické BPS 6 kWh/m³ a lze ji zvýšit až a 9,5 kWh/m³ pomocí chemoautotrofní technologie. Výroba vodíku však vyžaduje 7,2 kWh/m³ bioplynu, proto je vhodné využívat OZE v případě, že je elektrická síť nevytížená. Během těchto sezónních přebytků (např. solární energie v letních měsících) bude tato technologie energeticky přínosná [70]. Schéma In – situ a ex – situ je zobrazeno na obr. 21.



obr. 21: Schéma chemoautotrofní technologie, upraveno [11]

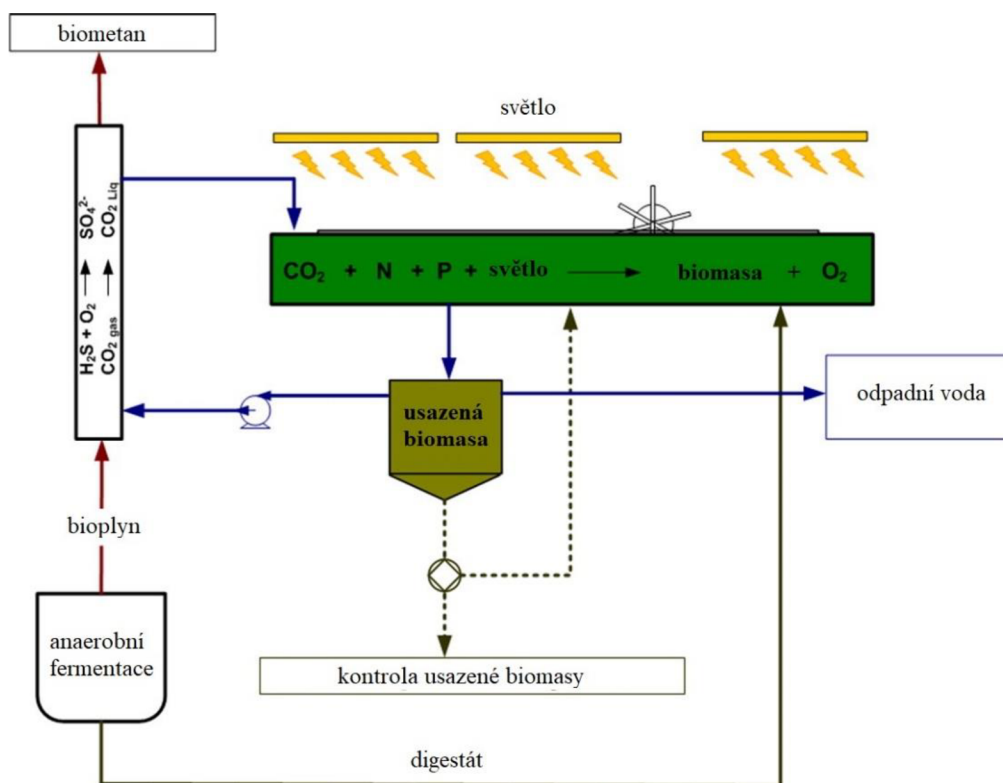
5.1.7. Fotosyntetická technologie

Tato biotechnologická metoda využívá fototrofních organismů k přeměně oxidu uhličitého z bioplynu. Tyto organismy využívají oxid uhličitý spolu se slunečním zářením a živinami k přeměně na kyslík, teplo a biomasu. Obsah metanu se tedy zvýší až na 94 až 98 %. Přínosem této technologie je mimo jiné výroba aktivní biomasy, která může být dále zhodnocena. Oxid uhličitý je tedy zužitkován, není pouze zachycen v kapalném médiu jako u konvenčních fyzikálně – chemických technologií [11].

Fototrofní organismy, které zde zastávají katalyzační funkci, jsou nejčastěji řasy v uzavřených nebo otevřených fotobioreaktorech. Uzavřené systémy mají vysoký fotosyntetický výkon, nízké požadavky z hlediska půdy a vody. Jejich nevýhodou jsou však vysoké investiční a energetické náklady. Otevřené systémy však mají nižší fotosyntetický příjem

oxidu uhličitého, vyšší požadavky vzhledem k přírodním zdrojům. Pořizovací náklady jsou však nižší [11].

Efektivitu této technologie negativně ovlivňuje vznikající kyslík při použití pouze jednoho druhu řas. Kyslík, který při fotosyntéze vzniká, má negativní vliv na kvalitu biometanu. Této skutečnosti lze však využít při aplikaci několika druhů mikroorganismů a využít kyslík jako oxidační činidlo sulfanu [11]. Schéma fotosyntetické technologie je zobrazeno na obr. 22.

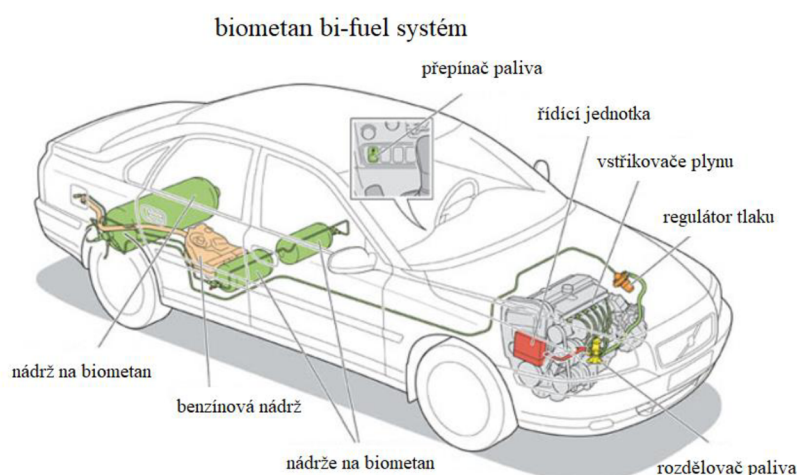


obr. 22: Schéma fotosyntetické technologie, upraveno [71]

Spotřeba elektrické energie je velice nízká v porovnání s ostatními komerčními technologiemi, jak vyplývá ze studie [72], kde byla hodnocena fotosyntetická technologie o kapacitě $300\text{ Nm}^3/\text{h}$ bioplynu. Spotřeba elektrické energie se pohybuje okolo $0,08\text{ kWh}/\text{Nm}^3$ biometanu. Největší podíl na spotřebě energie má odvodnění pomocí lisu a sušení řas, které se následně použijí jako hnojivo. Provozní náklady jsou $0,77\text{ Kč}$ za Nm^3/h biometanu. Obsah metanu v bioplynu byl uveden v rozmezí 55 až 70 %. Vezme – li se v úvahu průměrná hodnota obsahu metanu, tedy 62,5 %, roční provozní náklady dosahují částky 1,26 milionů Kč, což je o 51 % méně než u technologie PSA a o 71 % méně než u technologie membránové separace. Investiční náklady jsou odhadovány na 155 tisíc Kč za Nm^3/h biometanu, což při kapacitě $400\text{ Nm}^3/\text{h}$ dosahuje 62 milionů Kč. K relativně rychlé návratnosti vysoké počáteční investice však přispívá prodej odpadní biomasy ke hnojení a nízké provozní náklady. Tato technologie představuje ekologickou alternativu ke komerčně používaným technologiím pro výrobu biometanu s výrazně nižšími provozními náklady [72].

5.2. Biometan a palivo

Protože biometan má velmi podobné vlastnosti jako fosilní zemní plyn, představuje vhodnou ekologickou alternativu. Počet vozidel s pohonem na zemní plyn v posledních letech celosvětově roste. Biometan je dodáván do čerpacích stanic pomocí veřejného plynovodu. Alternativně se může převážet ve vysokotlakých (200 až 250 bar) nádobách. Biometan lze natankovat do vozidel s pohonem na zemní plyn bez specifických požadavků. Vozidla s pohonem na benzín lze konvertovat na tzv. bi – fuel, tedy přidat druhou nádrž na biometan, jak lze vidět na obr. 23. Takovéto vozidlo pak může jezdit na benzín i na biometan a má téměř stejnou efektivitu a výkonnost, dojezdová vzdálenost závisí na velikosti nádrže, obvykle se pohybuje okolo 400 až 500 km [10].



obr. 23: Bi – fuel, upraveno [73]

Plynový zážehový motor operuje pouze na plyn. Biometan má oproti benzínu vyšší oktanové číslo, čímž lze docílit vyššího kompresního poměru než u klasického zážehového motoru a zvýšit efektivitu. Tyto motory jsou nejčastěji používány v dodávkách nebo v autobusech městské hromadné dopravy. Na delší vzdálenosti je lepší využívat zkapalněný zemní plyn [10].

5.3. Biometan a vytápění

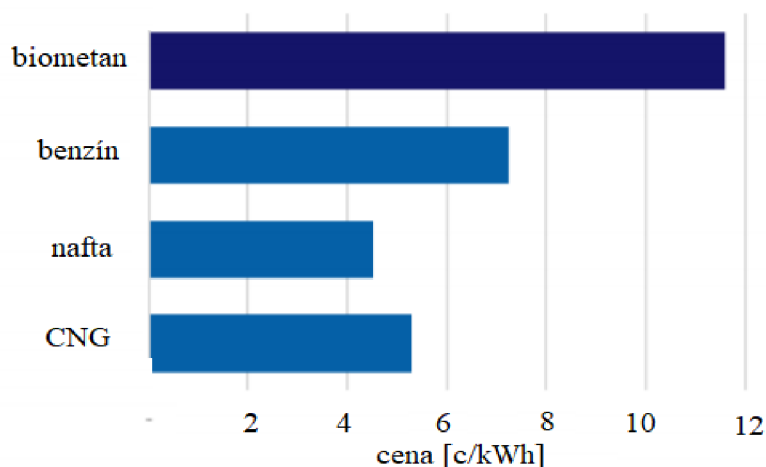
Zemní plyn lze také nahradit biometanem v konvenčních plynových kotlích či domácích spotřebičích. Mnoho dodavatelů nabízí směs biometanu se zemním plynem v různém poměru (5 až 20 % biometanu) [62].

5.4. Překážky v rozšíření

Produkce biometanu čelí několika překážkám, které limitují jeho masové používání [10].

- Dostupnost biomasy – decentralizace dostupné biomasy vede k relativně malé produkci bioplynu nebo vysoké náročnosti na dopravení organických látek do BPS. To vede k navýšení cen biometanu hlavně v případě, pokud se jedná o zemědělské vedlejší produkty jako hlavní příjem substrátu [10].
- Cena – relativně vysoká cena biometanu v porovnání s fosilními palivy ho činí méně konkurenceschopný, jak lze vidět v grafu 10 [74]. Jedná se o tzv. sdruženou cenu

energie, která zohledňuje náklady v průběhu celého životního cyklu daného způsobem produkce [75]. Ta je na irském trhu až o 7 centů za kilowatthodinu vyšší než u nafty, jak vyplývá ze studie [74].



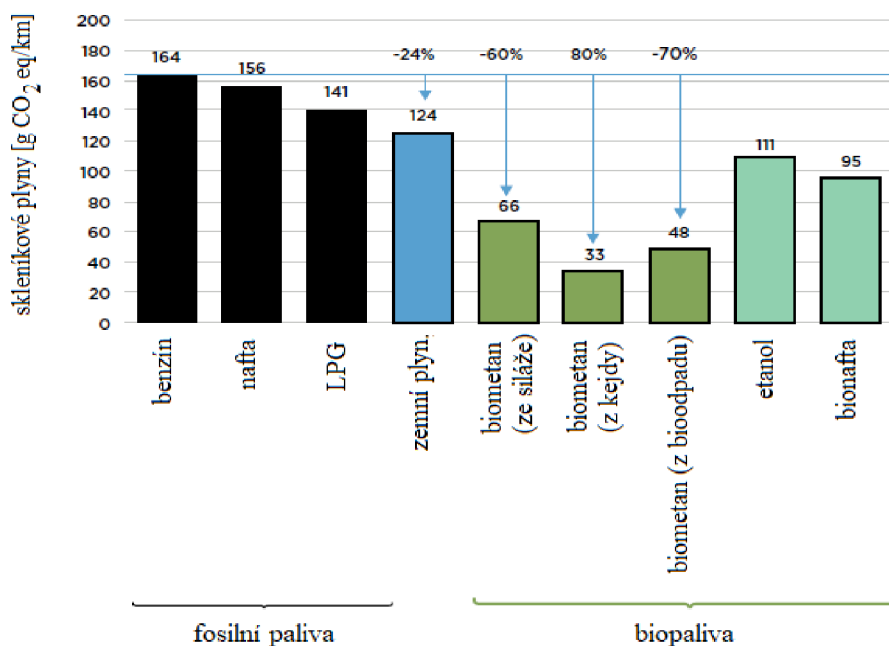
graf 10: Srovnání ceny pohonných hmot, upraveno [74]

Z tohoto důvodu je nutné výrobu biometanu dotovat. V roce 2012 byla vydána evropská bioekonomická strategie, která měla za cíl podpořit produkty obnovitelných zdrojů. Tato strategie pomohla navýšit financování biohospodářství v EU o 200 mld. eur v roce 2015. Do roku 2030 je cílem EU zajistit 25 % své přepravy prostřednictvím biopaliv. Tento odvážný cíl bude ovšem v současné době vyžadovat velké dotace [63].

- Reklama – nedostatečné povědomí o výhodách biometanu má za následek nedostačující podporu tuzemských politiků i veřejnosti [10].
- Nejistota – neustále se měnící regulace nepodporuje investory, aby investovali do projektů spojené s bioplynem. Spolehlivé regulace by měly být garantovány nejméně 15 let, což je průměrná doba, kdy se zaplatí počáteční investice [10].
- Nedostačující infrastruktura – nedostačující plynovody a zejména nízká síť čerpacích stanic umožňující prodej biometanu vede k nízkému zájmu uživatelů osobní dopravy k pořízení vozidla s pohonem na zemní plyn [10].

5.5. Udržitelnost

Předpokládaná redukce skleníkových plynů u vozidel s pohonem na biometan je větší než 50 % oproti fosilním palivům. Snížení emisí skleníkových plynů však nevyplývá pouze z nahrazení pohonných hmot ekologičtější variantou, ale i z využití odpadu, který by se jinak v přírodě sám rozkládal a emitoval by metan do ovzduší. Mezi hlavní skleníkové plyny patří metan, oxid uhličitý a oxidy dusíku. Vyhodnocení emisí skleníkových plynů osobního automobilu jednotlivých paliv je znázorněno v grafu 11 [10].



graf 11: Srovnání pohonných hmot osobního automobilu dle emisí skleníkových plynů, upraveno [10]

Výsledky jsou uvedeny v gramech ekvivalentu oxidu uhličitého, tedy množství CO₂, které by mělo ekvivalentní příspěvek ke skleníkovému jevu atmosféry stejný jako množství příslušného plynu. Z výsledků je zřejmé, že biometan má značně nižší emise skleníkových plynů než konvenční benzín nebo nafta. Ve vyhodnocení jsou započítány emise způsobené výrobou (od dodávky biomasy do BPS až po úpravu na biometan a jeho distribuci plynovodem). Emise biometanu závisí na typu biomasy, ze které byl vyroben [10].

Biometan vyrobený z plodin typu kukuřice má menší emise skleníkových plynů o 60 % oproti benzínu. Tyto emise jsou způsobeny převážně pěstováním a sklízením, úprava bioplynu na biometan představuje asi třetinu těchto emisí. Ještě většího snížení emisí dosáhl biometan z biomasy živočišného původu, a to až o 80 % oproti benzínu, což je způsobeno především využitím metanu, který by jinak unikl do atmosféry. Biometan z komunálního organického odpadu redukoval své emise o 70 % vzhledem k benzínu [10].

5.6. Zhodnocení

Biometan se vyrábí upgradem bioplynu, kdy se odstraní nečistoty jako je voda, sulfan, a především oxid uhličitý. Biometan má v porovnání s ostatními pohonnými hmotami vysokou cenu, a to až o 7 centů za kilowatthodinu vyšší než u nafty. To je způsobeno převážně vysokou cenou jeho výroby. Na trhu dominují fyzikálně – chemické metody, které umožňují odstranit z bioplynu nežádoucí příměsi. Tyto technologie mají vysokou účinnost, jejich investiční a provozní náklady, které vycházejí z diplomové práce [67], jsou však relativně vysoké. Pro technologie o kapacitě 400 Nm³/h bioplynu se investiční náklady pohybují od 36,3 mil. Kč pro membránovou separaci až po 58,6 mil. Kč pro technologii PSA. Investiční náklady na celosvětově nejrozšířenější technologii upgradu na biometan – vodní vypírku dosahují 41,5 mil. Kč. Roční provozní náklady se pohybují od 2,6 mil. Kč pro technologii PSA

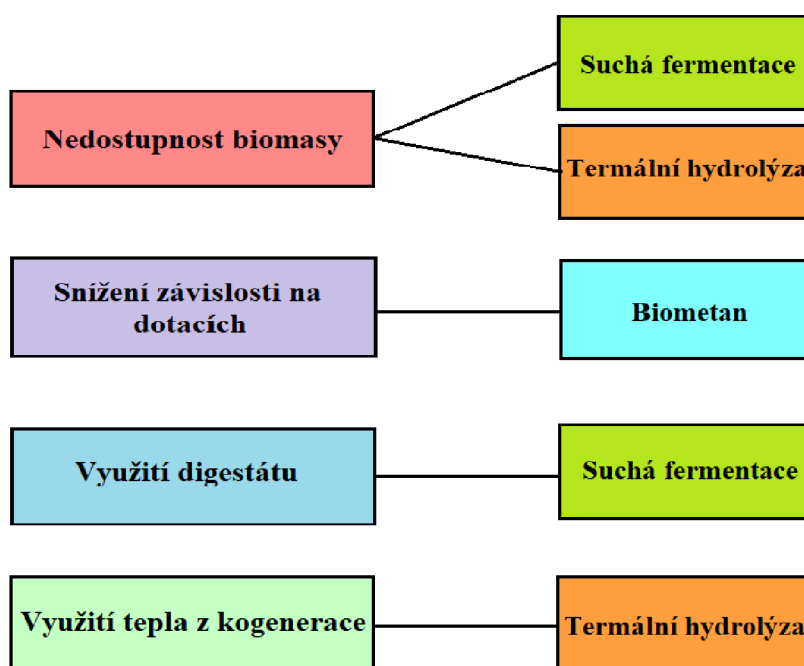
až po 4,3 mil. Kč u membránové separace. V posledních letech dosáhly velkého rozvoje i biotechnologické metody upgradu bioplynu. Jejich hlavní výhodou je skutečnost, že dokáží separovaný oxid uhličitý zhodnotit. U chemoautotrofní technologie oxid uhličitý reaguje s vodíkem za vzniku metanu. Aby však tato metoda byla energeticky přínosná, je nutné vyrábět vodík elektrolýzou vody za použití OZE, když je elektrická síť nevytížená. Tím lze efektivně uložit nadbytečnou elektrickou energii. Fotosyntetická technologie využívá speciálních fototrofních mikroorganismů, které nežádoucí oxid uhličitý přemění na kyslík, teplo a biomasu. Vznikající kyslík lze využít jako oxidační činidlo sulfanu, čímž se přemění na méně závadné látky. Biomasu tvořenou převážně z řas lze využít jako kvalitní organické hnojivo, čímž lze urychlit návratnost počáteční investice. Investiční náklady u této technologie se pro kapacitu 400 Nm³/h pohybují okolo 62 mil. Kč. Tato velmi vysoká částka je však vykompenzovaná velmi nízkými provozními náklady, které se pohybují okolo 1,26 mil. Kč, což je až o 71 % méně než u technologie membránové separace.

Aplikování biotechnologických metod k výrobě biometanu do praxe by mělo pozitivní vliv na životní prostředí a může vést ke zvýšení konkurenceschopnosti biometanu mezi ostatními palivy bez nutnosti dotací. Dalším praktickým využitím těchto metod je efektivní uložení přebytečné energie vyrobené z OZE do biometanu.

6. Závěr

Cílem této práce byla rešerše tří inovativních oblastí vývoje pro efektivní provoz BPS, představení postupů, charakteristika hlavních výhod a nevýhod a zhodnocení jednotlivých technologií s ohledem na praktickou využitelnost.

V úvodní části práce jsou popsány základní charakteristiky spojené s BPS, a to provoz, produkty anaerobní fermentace a nedostatky týkající se provozu BPS. Hlavními identifikovatelnými nedostatky jsou neefektivita využití tepla, dostupnost velkého množství biomasy, nadprodukce digestátu a především závislost na dotacích. Na obr. 24 je pro přehlednost uvedeno schéma, které zobrazuje řešení těchto nedostatků pomocí uvedených technologií.



obr. 24: Schéma nedostatků BPS a jejich možná řešení

První zmíněná technologie se nazývá suchá fermentace. Mezi hlavní výhody patří různorodost biomasy a využití bioodpadů, které lze fermentovat, a to bez nutnosti ředění, čímž se snižuje spotřeba vody. To je důležité především v oblastech, kde je vody nedostatek. Suchá fermentace má nižší náklady na energie než konvenční mokrá fermentace, což je způsobeno zajištěním pohybu bakterií perkolátem, nikoli pomocí míchadel. Suchá fermentace má potenciál dosáhnout stejné produkce bioplynu, klíčovým faktorem je nastavení optimálních podmínek pro každou BPS. V praxi se však produkce může snížit až o polovinu. Retenční doba suché fermentace se liší pro každý substrát, v zásadě je však delší než u konvenční fermentace, což je způsobeno pomalejším pohybem metanogenních bakterií. Tato skutečnost může mít velký vliv na výnos bioplynu. Pořizovací náklady BPS na m³ vyprodukovaného bioplynu jsou až třikrát vyšší než u klasické. To je způsobeno nižším výnosem bioplynu i větší kapacitou fermentorů a investicí do externí nádrže na perkolát. Tato technologie má význam především ve využití a zhodnocení BRKO, který by jinak skončil na skládkách a přispíval tak k emisím

skleníkových plynů. Nedostupnost velkého množství biomasy může být vyřešeno pomocí suché fermentace vzhledem k diverzitě vstupních materiálů. Digestát lze kromě hnojení využít k inokulaci, čímž se snižují náklady na transport.

Další inovativní technologie, která je představena, se nazývá termální hydrolýza. Pomocí této technologie předúpravy lze efektivně využít lignocelulózovou biomasu k anaerobní fermentaci. Termální hydrolýza je založena na principu, kdy se molekuly vody o vysoké teplotě dostanou skrz lignocelulózu a částečně redukuje lignin. To má za následek rychlejší buněčný rozklad a tím i zvýšení výnosu bioplynu. Nastavení optimální teploty a doby působení má výrazný vliv na výnos bioplynu a liší se pro různé typy substrátu. Teplota se pohybuje od 120 °C do 180 °C, doba působení se taktéž liší, od jednotek minut po jednotky hodin. To má vysoký vliv na provozní náklady. Ze studie, kde byla aplikována voda o teplotě 170 °C po dobu 30 minut však vyplývá, že výnos bioplynu se zvýšil až o 50 %, což vedlo k úsporám až 5 eur/t a k navýšení zisku až půl milionu eur ročně u BPS o objemu 30 000 t/rok. Tato technologie je vysoce efektivní při aplikaci na lignocelulózovou biomasu a dosahuje vyššího výnosu bioplynu o desítky procent. Tato hojně dostupná biomasa může částečně vyřešit problém s nedostupností biomasy. Pomocí této technologie lze využít nevyužité teplo z kogenerace, čímž se výrazně snižují náklady.

Třetí oblast vývoje BPS, která je v této práci představena a zabývá se následným využitím bioplynu, je jeho úprava na biometan. Na trhu dominují fyzikálně – chemické metody, které umožňují separaci oxidu uhličitého z bioplynu. Tyto technologie jsou velmi účinné, jejich hlavní nevýhodou jsou však vysoké investiční a provozní náklady. V posledních letech se vyvíjí nové biotechnologické metody, které mají společnou jednu výhodu a to, že nežádoucí separovaný oxid uhličitý dokáží zhodnotit. U chemoautotrofní technologie dochází ke zvýšení výnosu metanu tím, že s oxidem uhličitým v bioplynu reaguje vodík za vzniku metanu. Hlavní nevýhodou je však energeticky náročná výroba vodíku elektrolýzou vody. Aby byla tato technologie energeticky přínosná, je nutné vyrábět vodík z OZE, když je nedostatečně vytižena elektrická síť. Tím lze do biometanu uložit energii z OZE v přebytku. U fotosyntetické technologie dochází působením fototrofních organismů k přeměně oxidu uhličitého na kyslík, teplo a biomasu. Kyslík lze zúčtovat při odsíření, protože reaguje se sulfanem. Aktivní biomasu lze využít jako organické hnojivo. Investiční náklady na tuto technologii jsou velmi vysoké, její hlavní výhodou jsou však velmi nízké provozní náklady. návratnost vysoké počáteční investice lze urychlit prodejem tohoto hnojiva. V současné době masovému rozšíření použití biometanu ovšem brání nedostačující síť čerpacích stanic, malé povědomí veřejnosti a především finančně nákladný upgrade na biometan, který musí být dotován, aby byl konkurenceschopný na trhu s pohonnými hmotami. Právě snížení nákladů na výrobu biometanu má vysoký potenciál v biotechnologických metodách.

Oblasti vývoje představené v této práci lze kombinovat a vzájemně si nekonkurují. Společným rysem uvedených technologií je fakt, že jejich větší rozmach je podmíněn snížením investičních a provozních nákladů. Uplatnění těchto technologií je nutné vždy hodnotit individuálně na základě konkrétních provozních podmínek v BPS.

Seznam použité literatury

- [1] FINSTERWALDER, Tobias, Rainer JANSSEN a Michael KÖTTNER A SPOL. *Biogas handbook* [online]. Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008 [cit. 2019-05-03]. ISBN 978-87-992962-0-0. Dostupné z: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/files/2013/10/BiogasHandbook.pdf>
- [2] TOMÁŠEK, Karel. BPS zvýší podíl čisté energie. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 16. 4. 2007 [cit. 2019-02-06]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bps-zvysi-podil-ciste-energie>
- [3] TOMESCU, Mihai Florin. Share of renewable energy in gross final energy consumption. *European Environment Agency* [online]. Kodaň, 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/renewable-gross-final-energy-consumption-4/assessment-3>
- [4] BUFKA, Aleš, Jana VEVERKOVÁ a Diana ANDRONIC. Obnovitelné zdroje energie v roce 2017. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. Praha, 2018, 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/energetika/statistika/obnovitelne-zdroje-energie/2018/10/Obnovitelne-zdroje-energie-v-roce-2017.pdf>
- [5] *Česká bioplynová asociace* [online]. České Budějovice, 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/statistiky-vyroby-bioplynu/roci.html>
- [6] BUDÍN, Jan. V pondělí vstoupí v platnost nová evropská pravidla pro OZE a energetickou účinnost. *O energetice* [online]. 2018 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/energeticka-legislativa-eu/pondeli-vstoupi-platnost-nova-evropska-pravidla-oze-energetickou-ucinnost/>
- [7] MORAVEC, Adam. Od prasečího perpetuum mobile k bioplynové velmoci. *Biom.cz* [online]. 2014 [cit. 2019-05-18]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/od-praseciho-perpetuum-mobile-k-bioplynove-velmoci>
- [8] DA BORSO, Francesco, Alessandro CHIUMENTI a Sonia LIMINA. Dry anaerobic digestion of cow manure and agricultural products in a full-scale plant: Efficiency and comparison with wet fermentation. *Waste Management* [online]. 25. 4. 2017, , 704-710 [cit. 2019-05-04]. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X17301939#b0050>
- [9] CZ BIOM – ČESKÉ SDRUŽENÍ PRO BIOMASU. *Využití odpadních materiálů na bázi lignocelulózy jako suroviny pro výrobu bioetanolu*. [online] © 2001-2018 [cit. 14-03-14] Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadnich-materialu-na-bazi-lignocelulozy-jako-suroviny-pro-vyrobu-bioetanolu>
- [10] BOSHELL, Francisco, Angela CLINKSCALES, Jens GIERSDORF, Dolf GIELEN a Arthur WELLINGER. *IRENA: Biogas for road vehicles: Technology brief* [online]. 2017. 2017 [cit. 2019-05-03]. ISBN 978-92-9260-002-0. Dostupné z: <https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief>

- [11] ANGELIAKI, Irini, Stefano CAMPANARO a Gang LUO A SPOL. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances* [online]. 2018, 16. 1. 2018, **36**(2), 452-466 [cit. 2019-05-05]. ISSN 0734-9750. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S073497501830011>
- [12] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. FCC PUBLIC, 2004. ISBN 80-86534-06-5.
- [13] KAJAN, Miroslav. Bioplyn z odpadů živočišné výroby. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. Opletalova 7/918 111 44 Praha 1, 23. 8. 2005 [cit. 2019-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplyn-z-odpadu-zivocisne-vyroby>
- [14] ŠEDIVÝ, Pavel. Pěstování energetických plodin na devastovaných půdách. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 31. 12. 2008 [cit. 2019-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/pestovani-energetickych-plodin-na-devastovanych-pudach>
- [15] KAŠINSKÝ, Jan a Vladimír WAGNER. Jaký je potenciál využití biomasy v Česku a ve světě. *O energetice* [online]. 18. 2. 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/jaky-potencial-vyuziti-biomasy-cesku-ve-svete/#comments>
- [16] Mapa bioplynových stanic. *CZBA - Česká bioplynová asociace* [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.czba.cz/mapa-bioplynovych-stanic.html>
- [17] PETŘÍKOVÁ, Vlasta. Plodiny pro zemědělské bioplynové stanice. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu* [online]. 27. 2. 2012 [cit. 2019-05-03]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/plodiny-pro-zemedelske-bioplynove-stanice>
- [18] Metodický pokyn ke schvalování provozu bioplynových stanic a stanovování závazných podmínek provozu z hlediska ochrany životního prostředí. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. 2014 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/schvalovani_bioplynovych_stanic/\\$FILE/000-Metodicky_dokument_BPS-20150402.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/schvalovani_bioplynovych_stanic/$FILE/000-Metodicky_dokument_BPS-20150402.pdf)
- [19] *ZEMĚDĚLSKÁ a.s. Opava-Kylešovice* [online]. Opava [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.zasok.cz/bioplynova-stanice-4/>
- [20] *Biofuels: Bioenergy* [online]. OT Gülzow, Hofplatz 1 18276 Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) Agency for Renewable Resources, 2016 [cit. 2019-05-03].
- [21] SCHULZ, Heinz, Andreas KRIEG, Hans MITTERLEITNER a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi: teorie – projektování – stavba zařízení – příklady*. Ostrava: HEL, 2004, 167 s. ISBN 80-86167-21-6.
- [22] SEVEN. Energetická efektivnost bioplynových stanic: Možná opatření pro vyšší stupeň využití bioplynu [online]. SEVEN Středisko pro efektivní využívání energie / SEVEN Energy Americká 579/17, 120 00 Praha 2 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>
- [23] KÁRA, Jaroslav, Zdeněk PASTOREK a Evžen PŘIBYL. *VÝROBA A VYUŽITÍ BIOPLYNU V ZEMĚDĚLSTVÍ*. Praha: VÚZT, 2007, 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2007/086.PDF>

- [24] POKORNÝ. *Typy anaerobních fermentoriů*. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~pokornd/Bioplyn/8.%20typy%20fermentor%C5%AF.pdf>
- [25] ČEZ ENERGO, S.R.O. Letecký pohled na bioplynovou stanici Čičov. *ČEZ Energo, s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://virtualniprohlidky.cez.cz/cez-cicov/>
- [26] CZ BIOM. Volba vhodné kogenerační jednotky na bioplyn. *CZ Biom - České sdružení pro biomasu*. 2015. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/volba-vhodne-kogeneracni-jednotky-na-bioplyn>
- [27] ČEZ ENERGO, S.R.O. Kogenerační jednotka. *ČEZ Energo, s.r.o.* [online]. Praha [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <http://www.cezenergo.cz/cs/o-kogeneraci/kogeneracni-jednotka.html>
- [28] AGRIKOMP BOHEMIA S.R.O. *HAVARIJNÍ FLÉRA* [online]. In: . Brno [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://agrikomp.com/images/cs-CZ/pdf/havarijni_flera_letak.pdf
- [29] BENDA, V., H. DOLEŽALOVÁ, P. DUŠIČKA, et al. *Obnovitelné zdroje energie*. Jana Masaryka 2559/56b, 120 00 Praha 2 - Vinohrady: Vydavatelství odborného tisku Profi Press, 2012. ISBN 978-80-86726-48-9.
- [30] DOHÝNYOS, Michal a František STRAKA. *Bioplyn: příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů*. 2. rozš. a dopl. vyd. Praha: GAS, 2006. ISBN 80-7328-090-6.
- [31] DUFFKOVÁ, Renata a Gabriela MÜHLBACHOVÁ. Metodický postup pro efektivní užití digestátu ze zemědělských bioplynových stanic: Certifikovaná metodika [online]. 2016. [cit. 2019-02-09]. ISBN 978-80-87361-62-7. Dostupné z: http://www.ecotrend.cz/files/ecotrend/uploads/files/2016_CM_digestat%20_end_ZZ.pdf
- [32] FUKA, Vladislav. Trendy v aplikaci kejdy a digestátu. *Zemědělec*. 2015, 11(41), 1. ISSN 1211-3816. Dostupné z: <http://www.pal.cz/O-nas/Aktuality/Trendy-v-aplikaci-kejdy-a-digestatu>
- [33] KARIMI, Keikhosro, Forough MOMAYEZ a Mohammad J. TAHERZADEH. Energy recovery from industrial crop wastes by dry anaerobic digestion: A review. *Industrial Crops and Products* [online]. 22. 12. 2018, , 673-687 [cit. 2019-05-04]. ISSN 0926-6690. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669018311038>
- [34] RUTZ, Dominik, Rita RAMANAUSKAITE a Rainer JANSSEN. *Udržitelné využívání tepla z bioplynových stanic*. Mnichov: WIP Renewable Energies, 2012. Dostupné také z: <http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/2013/03/BiogasHeat-Handbook-CZ.pdf>
- [35] KOUTNÝ, Roman. Využití tepla z bioplynové stanice pro sušení. *Energie 21* [online]. Profi press s.r.o., 19. 4. 2013 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://energie21.cz/vyuziti-tepla-z-bioplynove-stanice-pro-suseni/>
- [36] BATYSTA, Marek, Lucie HAVELKOVÁ, Tomáš KHEL a Jan VOPRAVIL. Studie zabývající se základní problematikou eroze půdy a jejím současným stavem v Ústeckém a Jihomoravském kraji České republiky. *Ministerstvo zemědělství* [online]. Praha: SOWAC, 2013 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/278296/Studie_zabyvajici_se_zakladni_problematikou_eroze_pudy_a_jejim_soucasnymstavem_v_Usteckem_a_Jihomoravskem_kraji_CR.pdf

- [37] GARBS, Matthias a Jutta GELDERMAN. Analysis of selected economic and environmental impacts of long distance manure transports to biogas plants. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2. 1. 2018, (109), 71-84 [cit. 2019-05-19]. ISSN 0961-9534. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953417304099>
- [38] DROSG, Bernhard, Werner FUCHS a Bernd LINKE A SPOL. *Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing* [online]. IEA Bioenergy, 2015 [cit. 2019-05-04]. ISBN 978-1-910154-16-8. Dostupné z: http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/Technical%20Brochures/NUTRIENT_RECOVERY_RZ_web1.pdf
- [39] POLÁČKOVÁ A KOLEKTIV, Jana. *Metodika kalkulací nákladů a výnosů bioplynových stanic v zemědělských podnicích* [online]. Praha, 2013 [cit. 2019-05-04]. ISBN 978-80-7271-203-8. Dostupné z: https://www.uzei.cz/data/usr_001_cz_soubory/metodika_bps.pdf
- [40] Často kladené dotazy. *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.eru.cz/poze/casto-kladene-dotazy>
- [41] N Á V R H Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. X/2018, ze dne Y. srpna 2018, kterým se stanovuje podpora pro podporované zdroje energie. *Energetický regulační úřad* [online]. 2019 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/4697557/180822_N%C3%A1vrh+CR+POZE+na+rok+2019_do+VKP.pdf/edf4ca64-8b21-4b5d-b102-37f437bfff7a
- [42] EIKMEYER, Felix, Sebastian JAENICKE a Irena MAUS. Comparative metagenomics of biogas-producing microbial communities from production-scale biogas plants operating under wet or dry fermentation conditions. *Biotechnology for Biofuels* [online]. 8. 2. 2015 [cit. 2019-05-07]. ISSN 1754-6834. Dostupné z: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13068-014-0193-8>
- [43] CHANDOLIAS, K., OSADOLOR, O. A., PATINVOH, R. J., Cost effective dry anaerobic digestion in textile bioreactors: Experimental and economic evaluation. *Bioresource Technology* [online] 2017, 245 (Part A): 549-559 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241731386X?via%3Dihub>
- [44] HORVÁTH, I., LUNDIN, M., PATINVOH, R. J., Dry anaerobic co-digestion of citrus wastes with keratin-rich and lignocellulosic solid organic wastes: Batch vs. Continuous Processes. *Waste and Biomass Valorization*. [online] 2018. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/327667787_Dry_Anaerobic_Co-Digestion_of_Citrus_Wastes_with_Keratin_and_Lignocellulosic_Wastes_Batch_And_Continuous_Processes/citation/download
- [45] PATINVOH, Regina Jijoho. *Biological pretreatment and dry digestion processes for biogas production*. Borås, Sweden, 2017. Disertační práce. University of Borås. Dostupné z: <https://hb.diva-portal.org/smash/get/diva2:1141448/FULLTEXT01.pdf>.
- [46] BEKON. *Energy for the future dry fermentation* [online]. 2016 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.bekon.eu/wp-content/uploads/2016/02/Brochure-BEKON-english1.pdf>

- [47] FU, Yanran, Tao LUO a Zili MEI. Dry Anaerobic Digestion Technologies for Agricultural Straw and Acceptability in China. *Sustainability*. 2018, **10**(12). Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/329408126_Dry_Anaerobic_Digestion_Technologies_for_Agricultural_Straw_and_Acceptability_in_China
- [48] ANGELONIDI, Eleni a Stephen R. SMITH. A comparison of wet and dry anaerobic digestion processes for the treatment of municipal solid waste and food waste. *Water and Environment Journal* [online]. 2015, (29) [cit. 2019-05-04]. ISSN 1747-6585. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/wej.12130>
- [49] E-mailová korespondence s Ing. Janem Matějkou, místopředseda představenstva české bioplynové asociace. [online], 18.4.2019. info@czba.cz
- [50] KOLÁŘ, Karel, Anna MAROŮŠKOVÁ a Vojtěch STEHEL. Intracellular disintegration by shockwave pretreatment accelerates “dry fermentation”. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* [online]. 2018, 20. 3. 2018, **40**(6) [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2018.1454553>
- [51] DU, Jing, Yuting QIAN a Haoli QU. Comparative Analysis of Single-stage and Two-stage Fermentation Systems under Various Process Conditions. *BioResources*. 2017, **12**(1), 326-343. Dostupné z: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/12/BioRes_12_1_326_Du_QQXHJXLC_Compar_Anal_Single_Dual_Stage_Methods_Fermentation_10670.pdf
- [52] YASUDA, Atsushi, Eisuke KURAYA a Akiko TOUYAMA. Underwater shockwave pretreatment process for improving carotenoid content and yield of extracted carrot (*Daucus carota* L.) juice. *Journal of Food Engineering Volume 211*. 2017, **2**(11), 15-21. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877417301814#fig1>
- [53] QIAN, M.Y., J. LI, H. LI, R.H., J. LI a M. NELLES. Industrial scale garage-type dry fermentation of municipal solid waste to biogas. *Bioresource Technology*[online]. 26. 2. 2016, (217), 82-89 [cit. 2019-05-07]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852416302139>
- [54] KUMAR, Adepu Kiran a Shaishav SHARMA. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a 3. *Bioresour Bioprocess*. 2017, **4**(1), 7-25. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5241333/>
- [55] ALLAF, Karim, Mohamad AZEMI, Md. Sohrab HOSSAIN a Harun SARIP. A review of the thermal pretreatment of lignocellulosic biomass towards glucose production: Autohydrolysis with DIC technology. *BioResources* [online]. 2016, 11(4) [cit. 2019-05-04]. ISSN 10625-10653. Dostupné z: <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/a-review-of-the-thermal-pretreatment-of-lignocellulosic-biomass-towards-glucose-production-autohydrolysis-with-dic-technology/>
- [56] AHMAD, Fiaz, Maria BERNADETE, Edson LUIZ SULVA a Amâncio VARESCHE. Hydrothermal processing of biomass for anaerobic digestion – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 14. 9. 2018, (98), 108-124 [cit. 2019-05-04]. ISSN 1364-0321. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118306579#f0005>

- [57] HASHEMI, S, K KEIKHOSRO a S MIRMOHAMADSADEGHI. Hydrothermal pretreatment of safflower straw to enhance biogas production. *Energy* [online]. 1. 4. 2019, **172**, 545-554 [cit. 2019-05-19]. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219301653>
- [58] DU, Jing, Xivu LU a Yuting QUIAN. Hydrothermal and alkaline thermal pretreatment at mild temperature in solid state for physicochemical properties and biogas production from anaerobic digestion of rice straw. *Renewable Energy* [online]. (139), 261-267 [cit. 2019-05-19]. ISSN 0960-1481. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119301107>
- [59] KVĚTENA ČR. *Světlice barviřská* [online]. © 2003 – 2018 Petr Kocián. [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <http://www.kvetenacr.cz/detail.asp?IDdetail=704>
- [60] CANO, R., A. NIELFA a M. FDZ-POLANCO. Thermal hydrolysis integration in the anaerobic digestion process of different solid wastes: Energy and economic feasibility study. *Bioresource Technology* [online]. 10. 2. 2014, (168), 14-22 [cit. 2019-05-07]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414001783>
- [61] ANTWI, Edward, Nils ENGLER a Michael NELLES. Anaerobic digestion and the effect of hydrothermal pretreatment on the biogas yield of cocoa pods residues. *Waste Management* [online]. 17. 3. 2019, , 131-140 [cit. 2019-05-07]. ISSN 0956-053X. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19301667>
- [62] EBA - EUROPEAN BIOGAS ASSOCIATION. *Biomethane in transport* [online]. 2016 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2016/05/BiomethInTransport.pdf>
- [63] HASSAN, Shady S., Amit K. JAISWAL a Gwilym A. WILLIAMS. Trends in Biotechnology [online]. 19. 3. 2019, 37(3), 231-234 [cit. 2019-05-07]. ISSN 0167-7799. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167779918301938>
- [64] BAILON ALLEGUE, Laura a Jørgen HINGE. DANISH TECHNOLOGICAL INSTITUTE: Biogas upgrading evaluation of methods for H₂S removal. 2016
- [65] RACKLEY, Stephen A. *Carbon Capture and Storage* [online]. 2nd edition. 2017 [cit. 2019-05-19]. ISBN 978-0-12-812041-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/C2015-0-01587-8>
- [66] CIAHOTNÝ, Karel, Kristýna HÁDKOVÁ a Veronika VRBOVÁ. Testování membránových modulů pro separaci CO₂ z bioplynu. *Paliva*[online]. Fakulta technologie ochrany prostředí VŠCHT Praha, 25. 9. 2014, (3), 78-82 [cit. 2019-05-07]. ISSN 1804-2058. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/24>
- [67] PAVLÍČEK, Petr. *Ekonomická efektivnost výroby biometanu*. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Jaroslav Knápek.
- [68] RACHBAUER, Lydia, Gregor VOITL a Günther BOCHMANN. Biological biogas upgrading capacity of a hydrogenotrophic community in a trickle-bed reactor. *Applied Energy*. 2016, **80**(1), 483-490. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916310388>

- [69] LECKER, Bernhard, Lukas ILLI a Andreas LEMMER. Biological hydrogen methanation – A review. *Bioresource Technology*. 2017, **24**(5), 1220-1228. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417314906>
- [70] ALFARO, Natalia, Israel DÍAZ a Fernando FDZ. POLANCO. Evaluation of process performance, energy consumption and microbiota characterization in a ceramic membrane bioreactor for ex-situ biomethanation of H₂ and CO₂. *Bioresource Technology* [online]. 23. 2. 2018, (258), 142-150 [cit. 2019-05-09]. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418302840>
- [71] BLANCO, Saúl, Alma TERADO-CERVANTES, Raquel LEBRERO, Raúl MUNOZ, Rebeca PÉREZ a Mayara L. SEREJO. Photosynthetic biogas upgrading to bio-methane: Boosting nutrient recovery via biomass productivity control. *Algal Research* [online]. 2016, 4. 5. 2016, **17**, 46-52 [cit. 2019-04-21]. ISSN 2211-9264. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926416301412#f0005>
- [72] TOLEDO-CERVANTES, Alma, José ESTRADA a Raquel LEBRERO. A comparative analysis of biogas upgrading technologies: Photosynthetic vs physical/chemical processes. *Algal Research*. 2017, **2**(5), 237-243. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211926417300814>
- [73] MILOJEVIĆ, Saša, Milan STANOJEVIĆ a Radivoje PEŠIĆ. EXPERIENCES RELATED TO THE INSPECTION OF MOTOR VEHICLES RUNNING ON NATURAL GAS IN THE REPUBLIC OF SERBIA. *Internation Congress Motor Vehicles & Motors 2018* [online]. 2018 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328381581_EXPERIENCES_RELATED_TO_THE_INSPECTION_OF_MOTOR_VEHICLES_RUNNING_ON_NATURAL_GAS_IN_THE_REPUBLIC_OF_SERBIA
- [74] RICARDO ENERGY & ENVIRONMENT. *Assessment of Cost and Benefits of Biogas and Biomethane in Ireland* [online]. 2017 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.seai.ie/resources/publications/Assessment-of-Cost-and-Benefits-of-Biogas-and-Biomethane-in-Ireland.pdf>
- [75] CIHLÁŘ, Jan. Který energetický zdroj je nejlevnější? Náklady na výrobu energie, externality a dotace. *O energetice* [online]. 1. 9. 2015 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://oenergetice.cz/trh-s-elektrinou/ktery-energeticky-zdroj-je-nejlevnejsi-naklady-na-vyrodu-energie-externality-a-dotace/?fbclid=IwAR2TjBX8-ZuI3Bb1GHG3WDN4OgrGogw6RI9GIMK945QqGGJIG9CqskgqK_Q

Seznam použitých zkratek a symbolů

BPS – bioplynová stanice

OZE – obnovitelné zdroje energie

EU – Evropská unie

ČR – Česká republika

BRKO – biologicky rozložitelný komunální odpad

ČOV – čistírna odpadních vod

VS – těkavé pevné látky (Volatile Solids)

PSA – Pressure Swing Adsorption

HMF – 5 – hydroxymethylfurfural

Seznam obrázků

obr. 1: Zemědělská bioplynová stanice Kylešovice [19].....	14
obr. 2: Schéma uspořádání typické zemědělské bioplynové stanice, upraveno [20]	15
obr. 3: Základní typy míchadel [23]	16
obr. 4: Horizontální fermentor, upraveno [24]	17
obr. 5: Vertikální fermentor, upraveno [24]	18
obr. 6: Kogenerační jednotka [27].....	19
obr. 7: Kryté koncové sklady [1]	19
obr. 8: Vznik bioplynu, upraveno [10]	20
obr. 9: Aplikace digestátu [32]	21
obr. 10: Parametry ovlivňující suchou fermentaci, upraveno [33].....	26
obr. 11: Technologie BEKON, upraveno [46]	28
obr. 12: Dranco systém, upraveno [47]	28
obr. 13: Valorga systém, upraveno [47]	29
obr. 14: Srovnání buněk mrkve před (A) a po (B) po 1 cyklu rázové vlny [52]	30
obr. 15: Schéma rozkladu lignocelulózy biomasy pomocí termální hydrolýzy [55].....	34
obr. 16: Schéma fyzikálně – chemických metod separující oxid uhličitý, upraveno [10]	42
obr. 17: Schéma PSA technologie, upraveno [10]	43
obr. 18: Schéma technologie vodní vypírky, upraveno [10]	44
obr. 19: Schéma chemické vypírky, upraveno [65].....	45
obr. 20: Schéma membránové separace, upraveno [10].....	45
obr. 21: Schéma chemoautotrofní technologie, upraveno [11]	48
obr. 22: Schéma fotosyntetické technologie, upraveno [71]	49
obr. 23: Bi – fuel, upraveno [73]	50
obr. 24: Schéma nedostatků BPS a jejich možná řešení	54

Seznam grafů

graf 1: Závislost ceny dopravy digestátu na vzdálenosti různými dopravními prostředky, upraveno [38]	23
graf 2: Vývoj celkové elektřiny z bioplynu [4]	24
graf 3: Pořizovací náklady na m ³ bioplynu [48]	29
graf 4: Retenční doba suché fermentace v jednotlivých fermentorech	31
graf 5: Výnos metanu z pevné frakce při různých podmínkách termální hydrolýzy, upraveno	38
graf 6: Výnos metanu z hydrolyzátu při různých podmínkách termální hydrolýzy, upraveno	39
graf 7: Státy a počty jejich BPS s upgradem na biometan, upraveno [11]	42
graf 8: Zastoupení komerčních technologií separující oxid uhličitý z bioplynu, upraveno [11]	43
graf 9: Srovnání pořizovacích a ročních provozních nákladů jednotlivých technologií pro výrobu biometanu o objemu 400 m ³ /h bioplynu [67]	46
graf 10: Srovnání ceny pohonných hmot, upraveno [74]	51
graf 11: Srovnání pohonných hmot osobního automobilu dle emisí skleníkových plynů, upraveno [10]	52

Seznam tabulek

tab. 1: Základní charakteristiky produkce bioplynu suchou fermentací	32
tab. 2: Složení pevné složky lignocelulózy biomasy při nastavených podmínkách termální hydrolýzy, upraveno	36
tab. 3: Složení hydrolyzátu po aplikaci termální hydrolýzy, upraveno	37
tab. 4: Podíl metanu a oxidu uhličitého při různých podmínkách termální hydrolýzy, upraveno	37