

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Fakulta agrobiologie,
potravinových a přírodních zdrojů**

**Racionální přístupy k výstavbě a provozu bioplynových
stanic**

Bakalářská práce

Jakub Tegel

Ochrana krajiny a využívání přírodních zdrojů

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

© 2024 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Racionální přístupy k výstavbě a provozu bioplynových stanic jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 24.4.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Pavlu Švehlovi Ph.D. Za jeho vstřícnost a ochotu při konzultacích, za věnovaný čas, cenné rady a připomínky.

Racionální přístupy k výstavbě a provozu bioplynových stanic

Souhrn

Bakalářská práce vytváří souhrn možností vedoucí k racionalizaci výstavby a provozování bioplynových stanic. Nejprve je představena bioplynová stanice, průběh anaerobní fermentace a produkty vzniklé při jejím provozu. Jsou prezentovány způsoby využití bioplynu a fermentačního zbytku, včetně jeho separace a zpracování. Práce popisuje různé metody úprav fermentačního zbytku s důrazem na využitelnost v praxi a energetickou náročnost procesů. Pevnou frakci lze dle polohy a zaměření bioplynové stanice využít jako stelivo pro hospodářská zvířata, k hnojení zemědělské půdy nebo lze kompostovat. Frakce kapalná, tedy fugát se může fyzikálně, chemicky a biologicky upravovat. Fugát je nejčastěji využit pro hnojení zemědělské půdy nebo se jeho část vrací zpět do procesu anaerobní fermentace. Úpravy fugátu jsou zaměřené na jeho zkoncentrování a zároveň snížení ztrát dusíku způsobené skladováním a aplikací. Jsou definovány různé typy bioplynových stanic a jejich vztah ke zpracování biomasy. Představeny jsou i budoucí vize a cíle provozu bioplynových stanic dle požadavků Evropské unie o udržitelnosti obnovitelných zdrojů. Bioplynové stanice budou muset hledat jiné zdroje substrátu než cíleně pěstovanou biomasu s čímž se pojí řada legislativních požadavků, které musí být splněny. Zde je otázkou, zda bioplynové stanice nezmění celou svou koncepci od výroby elektrické energie k výrobě biometanu aby splnily ambiciózní cíle nastavené Evropskou unií. Z důvodů omezení dotací na provoz bioplynových stanic v posledních letech, musí tato zařízení hledat dodatečné zdroje příjmu. Jednou z možností je i úprava fermentačního zbytku vedoucí k navýšení jeho tržní hodnoty, jako v případě tepelného zahuštění nitrifikovaného fugátu. Výsledný produkt je alternativou k minerálním dusíkatým hnojivům, která v době psaní této práce zdražila o téměř dvojnásobek. Na základě skutečností popsaných v této práci a konzultacemi se zástupci firem zabývající se vývojem a výstavbou těchto zařízení je navržena racionální bioplynová stanice s udržitelným zdrojem substrátu, energetickou soběstačností a optimální návratností investic.

Klíčová slova: bioplynová stanice, anaerobní fermentace, využití bioplynu, separát, fugát, racionalizace provozu

Rational approaches to the management of products arising from the operation of biogas plants.

Summary

The bachelor's thesis creates a summary of the rationalization of the construction and operation of biogas plants. The biogas plant, the course of anaerobic digestion and the products created during its operation are presented. Methods of using biogas and digestate, including its separation and processing, are presented. The thesis describes various methods of treatment of digestate with an emphasis on usability in practice and the energy requirements of the processes. Depending on the location and orientation of the biogas plant, the solid fraction can be used as litter for farm animals, used to fertilize agricultural land or composted and then mixed into growing substrates. The liquid fraction, i.e. fugate, can be modified physically, chemically and biologically. Fugate is most often used for fertilizing agricultural land or partly returned to the anaerobic digestion process. Treatments of the fugate are aimed at concentrating it and at the same time reducing nitrogen losses caused by storage and application. Different types of biogas plants and their relationship to biomass processing are defined. The future vision and goals of biogas plants according to the requirements of the European Union on the sustainability of renewable resources are also presented. Biogas plants will have to look for another sources of substrate than purposefully grown biomass, which leads to a number of legislative requirements that must be met. The question here is whether biogas plants will not change their entire concept from electricity production to biomethane production in order to meet the ambitious goals set by the European Union. Due to the reduction of subsidies for the operation of biogas plants in recent years, these facilities have to look for additional sources of income. One of the possibilities is the modification of the digestion residue leading to an increase in its market value, as in the case of thermal thickening of nitrified fugate. The resulting product is an alternative to mineral nitrogen fertilizers, which have almost doubled in price at the time of writing this thesis. Based on the facts described in this work and consultations with companies involved in the development and construction of these devices, is designed a rational biogas plant with a sustainable source of substrate, energy self-sufficiency and optimal return on investment.

Keywords: biogas plant, anaerobic digestion, use of biogas, separate, fugate, rationalization of operation

Obsah

1 Úvod	1
2 Cíl práce.....	2
3 Bioplynová stanice.....	3
3.1 Struktura hlavních technologických prvků BPS.....	3
3.2 Druhy BPS podle vstupních surovin	4
3.3 Výroba energie bioplynovou stanicí	5
3.3.1 Produkce biometanu	5
3.3.2 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla.....	7
3.4 Anaerobní fermentace	7
3.4.1.1 Hydrolýza.....	8
3.4.1.2 Acidogeneze.....	8
3.4.1.3 Acetogeneze	8
3.4.1.4 Metanogeneze	9
3.5 Vstupní suroviny anaerobní fermentace	9
3.6 Průběh anaerobní fermentace na BPS	10
3.6.1 Rozdělení anaerobní fermentace z hlediska teploty ve fermentoru.....	10
3.6.2 Rozdělení anaerobní fermentace dle provozní sušiny substrátu.....	11
3.6.3 Rozdělení anaerobní fermentace dle dávkování vstupního substrátu	11
3.7 Hlavní produkt bioplyn	12
3.7.1 Vlastnosti bioplynu.....	13
3.8 Vedlejší produkt fermentačního zbytku	14
3.8.1 Vlastnosti fermentačního zbytku	14
3.9 Úpravy fermentačního zbytku	15
3.9.1 Způsoby separace fermentačního zbytku	16
3.9.1.1 Šnekový separátor fermentačního zbytku	17
3.9.1.2 Separace dekantací odštědivkou	18
3.9.1.3 Další technologie separace fermentačního zbytku	19
3.10 Zpracování separátu	20
3.10.1 Kompostování separátu	20
3.10.2 Sušení separátu	21
3.11 Konvenční zpracování fugátu	22
3.11.1 Stripování amoniaku.....	22
3.11.2 Membránové separace	23
3.11.3 Vakuové odpařování.....	24
3.11.4 Ostatní konvenční úpravy fugátu.....	24

3.12 Racionální přístupy k úpravě fugátu.....	25
3.12.1 Biologická nitrifikace fugátu	25
3.13 Využití fermentačního zbytku v praxi.....	27
3.13.1 Vliv fermentačního zbytku na půdní organickou hmotu	29
3.13.2 Změny fyzikálních vlastností půdy po aplikaci fermentačního zbytku.....	29
3.14 Výstavba a provozování bioplynových stanic.....	31
3.14.1 Průmyslové BPS	31
3.14.2 Komunální BPS	32
3.14.3 Zemědělské BPS.....	34
3.14.4 Modulární BPS	37
3.15 Model racionálního přístupu k výstavbě a provozu bioplynové stanic.....	38
4 Závěr	42
5 Literatura.....	43

1 Úvod

V současné době je svět stále závislý hlavně na výrobě energie z fosilních paliv, což jsou neobnovitelné zdroje, protože jejich obnova je pomalejší než jejich spotřeba. V posledních letech se do popředí zájmu dostaly obnovitelné zdroje s nízkou uhlíkovou stopou. Jedná se hlavně o energii slunce, větru, geotermální energie a energie z biomasy. Biomasu lze přímo spalovat, využít k produkci biopaliv a významnou roli hraje i anaerobní fermentace realizovaná v objektech bioplynových stanic (BPS). Jedná se o proces, který je trvale obnovitelný, protože hlavní surovina je vlastně úložiště sluneční energie prostřednictvím fotosyntézy. Hlavním produktem anaerobní fermentace je bioplyn, jedná se o směs energeticky bohatého metanu a oxidu uhličitého spolu s dalšími plynnými látkami. Spalováním bioplynu se uvolňuje velké množství energie, která je využívána ke generování elektrické energie a tepla. Spalování bioplynu je mimořádně ekologické, protože produkty dokonalého spalování jsou oxid uhličitý a vodní pára. Oxid uhličitý vzniká stejně jako při spalování fosilních paliv, ale rozdíl je hlavně v tom, že uhlík vázaný v bioplynu byl zároveň odebrán z atmosféry při fotosyntéze rostlin. Tímto je uhlíkový cyklus uzavřen v krátké době jednoho roku či dvou let (Seadi et al. 2013). Zajímavý je i vedlejší produkt anaerobní fermentace, jedná se o tekutý materiál se sušinou obvykle okolo 10 %, který je označován jako fermentační zbytek, resp. digestát. Fermentační zbytek je v některých provozech BPS separován na pevnou složku (tzv. separát) a na kapalnou frakci (tzv. fugát). Fugát obsahuje pestrou škálu živin, což ho předurčuje k využití ve výživě rostlin (Svehla et al. 2019). Z nezpracovaných výkalů hospodářských zvířat se při jejich skladování vyplaví nebo vytěká významná část důležitých živin, zpracování v procesu anaerobní fermentace tyto emise může minimalizovat a umožňuje lepší dostupnost živin u fermentačního zbytku (Seadi et al. 2013).

Další přínosy BPS jsou socioekonomické. Jedná se hlavně o podporu zaměstnanosti zemědělských oblastí, a tedy zejména venkova. Vyrobena elektřina generuje další příjem zemědělců a přímo se tak může podílet na modernizaci a rozvoji zemědělských družstev. Významným produktem BPS je i fermentační zbytek po anaerobní fermentaci, který je využíván hlavně jako hnojivo, které zároveň doplňuje organické látky do půdního profilu (Seadi et al. 2013, Drogg et al. 2015).

V poslední době je v souvislosti s produkcí bioplynu zmiňována hlavně energetická bezpečnost a soběstačnost. Česká republika patří k top deseti státům evropské unie v počtu BPS na 100 tis. obyvatel, dle České Bioplynové asociace k datu 31. 12. 2022 bylo provozováno 540 BPS s celkovým instalovaným výkonem 380,5 MW, a tím má bioplyn čtvrtinový podíl na výrobě energie ze všech obnovitelných zdrojů.

Předkládaná bakalářská práce definuje podmínky, za kterých se jako účelné jeví zpracovávat organický materiál s využitím anaerobních biochemických procesů a produkovat z tohoto materiálu bioplyn. Představuje vhodné postupy vedoucí k optimálnímu využití vyprodukovaného bioplynu i vedlejších produktů provozu bioplynových stanic zejména fermentačního zbytku a jeho separovaných složek, tedy separátu a fugátu.

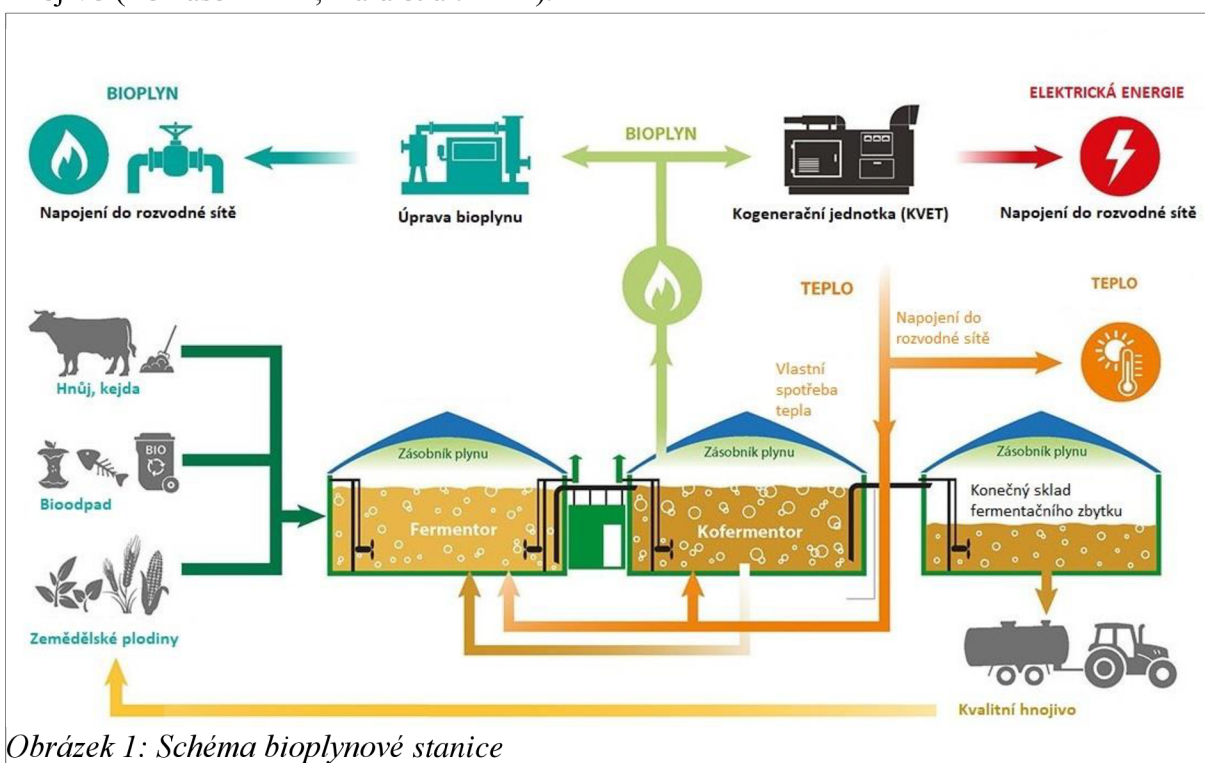
2 Cíl práce

Hlavním cílem práce bylo vytvořit literární rešerši na téma „Racionální přístupy k výstavbě a provozu bioplynových stanic“. Presentovány byly různé metody a postupy zpracování vedlejších produktů provozu zemědělských bioplynových stanic. Představeny byly vhodné postupy vedoucí k optimálnímu využití produkovaného bioplynu i vedlejších produktů provozu bioplynových stanic. Důraz byl kladen zejména na racionalizaci provozu zařízení z hlediska legislativy a využívání přírodních zdrojů.

3 Bioplynová stanice

Bioplynové stanice (BPS) jsou technologická zařízení, ve kterých se anaerobními procesy rozkládá biomasa za vzniku bioplynu. Bioplyn představuje jeden z alternativních zdrojů energie. Nejčastěji se využívá ke kombinované výrobě elektrické energie a tepla, kdy se bioplyn spaluje v kogeneračních jednotkách, jež jsou součástí BPS. Elektrická energie je distribuována do rozvodné elektrické sítě, přebytečné teplo je možné použít např. k vytápění přílehlých objektů, fermentorů BPS nebo k sušení zemědělských plodin (Seadi et al. 2013).

BPS jsou ekologická zařízení, která zpracovávají širokou škálu materiálů organického původu a produkují bioplyn. Ten se nejčastěji spaluje v kogenerační jednotce a vzniká elektrická energie a teplo nebo se bioplyn čistí (upgraduje) aby byl následně vtlačěn do distribuční rozvodné sítě zemního plynu. BPS zpracovávají také jinak těžko odbouratelný organický odpad, který se na konci procesu využívá v zemědělství jako vysoce kvalitní hnojivo (Tomášek 2007; Kára et al. 2007).



3.1 Struktura hlavních technologických prvků BPS

Zdroj organických materiálů je biomasa. Biomasa je obecný pojem pro materiál vhodný pro využití k energetickým účelům formou metanogenní fermentace. Za biomasu je v užším pojetí považována organická hmota rostlinného původu vznikající na bázi fotosyntetické konverze sluneční energie. Pod pojmem biomasa si však můžeme představit substanci biologického původu, která zahrnuje rostlinnou biomasu (fytomasu) pěstovanou na půdě, hydroponicky nebo ve vodě, živočišnou biomasu, vedlejší organické produkty a organické rozložitelné odpady. Bioplyn lze získávat prakticky ze všech druhů biomasy kromě fytomasy s převládajícím podílem celulózy a ligninu (dřevní hmoty) (Kára et al. 2007).

Sběr a transport materiálu do příjmové nádrže nebo jámy musí odpovídat spotřebě BPS, proto je důležitá retenční kapacita tohoto prvku. Před uskladněním v přijímací nádrži musí být evidován druh, charakter, množství materiálu a odebrány vzorky (Kára et al. 2007).

Příjem a úprava materiálu. Jedná se hlavně o separaci hrubých příměsí, drcení, hygienizaci, ředění, aktivaci mikroflóry, předeřev materiálu, homogenizaci a automatické kontinuální dávkování do fermentoru (Kára et al. 2007). Větší BPS mohou být vybaveny příjmovou nádrží pro efektivnější dávkování a homogenizaci substrátu, hlavně pokud je substrát značně heterogenní jako např. BRKO. Čím více homogenní substrát BPS přijímá tím menší je potřeba příjmové nádrže. Proto většina zemědělských BPS má na vstupu pouze homogenizační jednotku spolu se šnekovým dávkovačem (Dvořáček et al. 2009).

Anaerobní fermentor je nejdůležitější součást BPS, která rozhoduje o kvalitativní funkci celého procesu (Kára et al. 2007). Reaktor je základní technologickou částí anaerobního procesu, obsahuje zařízení, pomocí kterých dochází k promíchávání a zahřívání substrátu, zde se rozmnožují mikrobiální kultury. Většina bioplynových stanic má reaktor uzavřený, válcový, betonový, kovový nebo plastový s osou svislou nebo vodorovnou. Řízený metanogenní proces znamená, že reaktor je vybaven míchacím zařízením, ohřevem, homogenizačním zařízením a dávkovacím zařízením (Kára et al. 2007). Vyhřívání nádrže zaručuje mikroorganismům vhodné podmínky pro zpracovávání organických látek (Seadi et al. 2013).

Dofermentor jako samostatný reaktor nalezneme hlavně u větších BPS. U menších BPS je to nejčastěji vnitřní prsteneček fermentační nádrže a slouží k dokončení procesu anaerobní fermentace, delšímu zdržení substrátu v procesu anaerobní fermentace a díky tomu větší ziskovosti bioplynu a lepšímu rozkladu fermentačního zbytku. Jde o fermentaci druhého stupně a mohou zde být i jiné podmínky než v hlavním fermentoru. Substrát se do dofermentoru dostává pomocí samovolného přepadu nebo přečerpávací jednotkou. I zde panují vhodné podmínky pro mikroorganismy a je nutné, aby byl substrát promícháván pomocí míchadel (Kára et al. 2007; Seadi et al. 2013).

Bioplynová koncovka obsahuje potrubí na dopravu bioplynu, bezpečnostní zařízení proti zpětnému zahoření plynu – fléru, kompresor, zásobník (plynojem), regulační a kontrolní prvky, zařízení na úpravu bioplynu (čištění od vlhkosti, CO₂, H₂S, mechanických nečistot atd.) a zařízení na konečné využití bioplynu, nejčastěji kogenerační jednotku (Kára et al. 2007).

Skladovací jímka fermentačního zbytku, prostřednictvím samovolného plynotěsného přepadu je sem pravidelně přiváděn fermentační zbytek. Koncová jímka je konstruovaná na objem skladování fermentačního zbytku až na 6 měsíců. Vyrobený fermentační zbytek se využívá v souladu s příslušnými předpisy pro hnojení orné půdy, nebo je separován na pevnou (separát) a kapalnou (fugát) složku (Kára et al. 2007; Seadi et al. 2013).

3.2 Druhy BPS podle vstupních surovin

Zemědělské bioplynové stanice zpracovávají hlavně cíleně pěstovanou biomasu a statková hnojiva. Je zde možné zpracovávat biologicky rozložitelné odpady z rostlinné a živočišné výroby, dále biologicky rozložitelný komunální odpad podle zákona č. 185/2001 Sb., O odpadech. Získaný fermentační zbytek je ve většině případů použit jako hnojivo nebo stelivo pod hospodářská zvířata (Vítěz et al., 2013; Věstník MŽP ČR, částka 2/2014).

Průmyslové bioplynové stanice zpracovávají kaly z čistíren odpadních vod (ČOV) za účelem stabilizace těchto kalů nebo vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě. V případě, že většinu substrátu tvoří odpady podle zákona o odpadech, mluvíme o komunálních bioplynových stanicích. Pokud BPS zpracovává pouze kal z ČOV, není nutné budovat koncový sklad na uložení anaerobně stabilizovaného kalu. Tyto BPS mají ve svém provozním řádu zahrnuty podmínky nakládání s anaerobně stabilizovaným kalem. Stabilizovaný kal je využíván dle obsahu rizikových prvků, pokud

splňuje limity stanovené Ministerstvem životního prostředí, je možné jej využít jako hnojivo, v opačném případě je nutné jej skládkovat (Vítěz et al., 2013; Věstník MŽP ČR, částka 2/2014).

Komunální bioplynové stanice zpracovávají hlavně biologicky rozložitelný komunální odpad tzv. BRKO, gastroodpad z kuchyní a jídelen se zbytky z domácností a lehce rozložitelný zahradní odpad jako je posečená tráva, zelenina, ovoce. Nejčastěji se jedná o městské svozové BPS. Důležitá je zde hygienizace vstupního substrátu při teplotě minimálně 70 °C po dobu jedné hodiny. Fermentační zbytek těchto BPS může být kompostován a využíván jako hnojivo. Pokud obsahuje nerozložitelný materiál např. plasty nebo nesplňuje limity obsahu rizikových prvků musí být skládkován (Vítěz et al., 2013; Věstník MŽP ČR, částka 2/2014).

3.3 Výroba energie bioplynovou stanicí

Bioplynové stanice v České republice vyrábí a dodávají hlavně elektrickou energii a teplo. V poslední době roste také podíl vyrobeného biometanu. Část takto vzniklé energie je využita přímo v BPS jako technologická vlastní spotřeba – TVS. Dle zákona č.165/2012 Sb. O podporovaných zdrojích energie se jedná o spotřebu elektrické energie na výrobu elektřiny v hlavním výrobním zařízení i pomocných provozech, které s výrobou přímo souvisí, včetně přeměny nebo úpravy substrátu, ztrátách v rozvodech a transformaci pro dodávku do distribuční soustavy. Spotřeba TVS charakterizuje energetickou efektivnost bioplynové stanice a nelze na ní uplatnit podporu formou výkupních cen ani zeleného bonusu. Další energie je využita k pokrytí potřeb uvnitř areálu BPS, která nesouvisí přímo s provozem BPS, jedná se o spotřebu elektrické energie administrativních budov, stání a dalších služeb. Tato energie také není prodána do distribuční sítě a jedná se o Ostatní vlastní spotřebu – OVS, na tuto spotřebu lze uplatnit podporu formou výkupních cen nebo zeleného bonusu. Velkým problémem BPS je izolovanost nebo odlehlost zařízení od potencionálních přímých odběratelů energie, což limituje využívání odpadního tepla mimo areál BPS (Interní informace CZ Biom 2024).

3.3.1 Produkce biometanu

Biometan vzniká navýšením energetického obsahu v bioplynu, tzv. procesem zušlechtění (upgrading). Pomocí technologie membránové separace se oxid uhličitý z bioplynu separuje a docílí se tím kvality zemního plynu, tzv. biometanu (> 95 % metanu). Tento plyn může být následně vtlačen do distribuční sítě zemního plynu nebo může být využit jako alternativní palivo pro automobily. Proces zušlechtění bioplynu se skládá ze tří základních kroků, předčištění bioplynu, komprese šroubovým kompresorem a membránové separace. Bioplyn je nejdříve vysušen zchlazením klimatizační jednotkou a následně je z něj odstraněn sirovodík reakcí s železným prachem, těkavé organické látky a siloxany. Posléze je bioplyn stlačen kompresorem a postoupen do fáze membránové separace, kde se z bioplynu separují výrazně větší molekuly oxidu uhličitého od metanu. Metan je propouštěn skrz membránu, zatímco oxid uhličitý zůstává pod membránou, takovýto systém má vysokou účinnost. Membrány jsou v patentovém víceúrovňovém uspořádání k maximalizaci výtěžnosti metanu z bioplynu (Seadi et al. 2013; Veolia 2024). Celý proces, má účinnost 99,5% výtěžnosti metanu. Výroba biometanu je technologicky náročnější proces než kogenerace, také nevzniká elektrická energie ani teplo pro provoz BPS, proto je kogenerační jednotka přítomna i u BPS, které vyrábí biometan (Drosg et al. 2015; Seadi et al. 2013). Dle interních informací společnosti agriKomp (2024) se jedná o velmi složité zařízení s mnoha nastavitelnými parametry, jehož seřízení na požadovanou efektivitu je otázkou několika dní či

týdnů. K provozním nákladům je nutné připočít hlavně spotřebu energie na klimatizační jednotku a kompresi šroubovým kompresorem či zvýšené náklady na údržbu membránového systému.

Budoucnost podpory biometanu je velice důležitá, protože tím nejen snižujeme závislost na fosilních palivech, ale zároveň zvyšujeme soběstačnost ve strategické surovině. Česká republika má velmi omezený zdroj zemního plynu cca 2 % spotřeby, zbytek pokrývá import, ten donedávna probíhal hlavně prostřednictvím plynovodu z Ruské federace. Vlivem války na Ukrajině je nyní dodávka zajištěna z více zdrojů, kdy největším zdrojem je Norský plyn a LNG (zkapalněný zemní plyn) terminál v Belgii dále pak a import z Ruska, minoritu tvoří dodávky jak LNG, tak CNG (stlačený zemní plyn) z Alžírsko a Ázerbájdžánu. LNG má jednu podstatnou nevýhodu v podobě uhlíkové stopy způsobené lodní přepravou. Proto logickou cestou je navyšování produkce biometanu, kdy je tento plyn využíván v místech výroby a nemusíme tak platit další tranzitní poplatky a rezervovanou kapacitu v LNG terminálech a zásobnících (Rada Evropské unie 2024). Biometan se nyní dostává do popředí.

Dle směrnice Evropské unie má biometan vyrobený z výkalů hospodářských zvířat emisní faktor až $-120 \text{ t CO}_2 \cdot \text{TJ}^{-1}$ oproti tomu zemní plyn má emisní faktor $+55,45 \text{ t CO}_2 \cdot \text{TJ}^{-1}$, proto některé společnosti nakoupí energeticky bohatý biometan, který energeticky využijí, místo aby museli nakupovat emisní povolenky na spálený zemní plyn. Na základě tohoto mechanismu strmě stoupá zájem o biometan, a tak i jeho cena. Dle interních informací společnosti agriKomp (2024) je již nyní rentabilnější výroba biometanu než výroba elektřiny z bioplynu právě díky výše popsané skutečnosti. V případě, že není možné připojit BPS k distribuční rozvodné soustavě zemního plynu, je možné produkovat jak bioCNG, tak i bioLNG, tyto technologie jsou sice zatíženy náklady na kompresi a zkapalnění plynu, ale o to vyšší je tržní hodnota produktů. Dle směrnic a politiky Evropské unie v oblasti obnovitelných zdrojů se počítá s masivním nasazením bioCNG v osobní automobilové dopravě. Na využití bioCNG v zemědělské technice se zaměřuje společnost New Holland Inc. jejich stroje na CNG budou uvedeny na trh v roce 2024. Odhady společnosti Energetické služby Veolia Energie ČR (2024) prezentují možnost nahradit do roku 2030 až 25 % spotřeby zemního plynu v domácnostech biometanem. Oxid uhličitý separovaný v membránovém procesu je možné jímat a zkapalňovat pro další použití. Tento CO_2 lze využít v mnoha průmyslových odvětvích například pro obohacování vzduchu ve sklenících, výrobu technického plynu nebo ve výrobě potravin a nápojů. (agriKomp 2024)



Obrázek 2: Ukázka zařízení na upgrading bioplynu od společnosti agriKomp

3.3.2 Kombinovaná výroba elektřiny a tepla

Nejjednodušším způsobem využití bioplynu je jeho přímé spalování v plynových kotelnách nebo hořácích, což se často používá pro bioplyn vytvářený malými modulárními fermentory. Bioplyn může být spalován k výrobě tepla buď na místě, nebo může být přepravován potrubím ke konečným uživatelům. Bioplyn určený ke spalování musí projít kondenzací, filtrací hrubých nečistot případně kompresí (Seadi et al. 2013).

Výroba energie a tepla pomocí kogeneračních jednotek je běžné využití bioplynu v mnoha zemích s rozvinutým odvětvím bioplynu, neboť se považuje za velmi efektivní způsob využití bioplynu k produkci energie. Před spálením v kogenerační jednotce je plyn vysušen, chlazen, odstraněny sirovodíky, halogenové uhlovodíky a siloxany. Bioplyn je spalován v plynovém motoru s účinností až 90 %, kdy produkuje 35–45 % elektřiny a 50–60 % tepla. Nejběžnějšími typy kombinovaných elektráren jsou tepelné blokové elektrárny se spalovacími motory připojenými ke generátoru – kogenerace. Generátory obvykle rotují s konstantní rychlostí 60 otáček za sekundu, aby byly kompatibilní s frekvencí elektrické sítě. Alternativou k výše zmíněným jsou mikro plynové turbíny, Stirlingovy motory a palivové články, všechny zmíněné technologie procházející významným vývojem v posledních letech (Seadi et al. 2013).

V České republice je nejčastěji využíván koncept kombinované výroby energie a tepla (KVET) pomocí kogeneračních jednotek, kdy bioplynové stanice ročně vyrobí cca 2600 GWh elektrické energie a cca 17 280 TJ tepla. Podíl vyrobené elektrické energie mezi obnovitelnými zdroji je asi 24 %. BPS se v roce 2022 dle dat České bioplynové asociace podílely na celkové výrobě elektrické energie, která byla 84,5 TWh jen z 3 %. Úlohou bioplynových stanic by neměla být náhrada konvenčních centralizovaných zdrojů. O to důležitější je role BPS jako lokálních decentralizovaných zdrojů ve spolupráci s ostatními obnovitelnými zdroji a vytvoření alternativní distribuční soustavy (DS).

Modelovým příkladem takovéto DS by mohla být obec do 1000 obyvatel bez energeticky náročného průmyslového provozu. Hlavní výrobu elektrické energie by zajišťovaly solární panely, které by přebytky ukládaly do vlastních nebo komunitních baterií případně ohřívaly teplou vodu v zásobnících. V nepříznivých podmínkách, hlavně v zimním období a v noci by produkci energie přebírala velmi flexibilní BPS doplněná o soustavu plynových, které by akumulovaly vzniklý bioplyn v období dostatku energie. Soustava kogeneračních jednotek o různém výkonu by umožňovala rychlou reakci na poptávku po elektrické energii a zároveň i produkci tepla, kterým by centrálně zásobovala celou obec. Tento systém by mohl celý rok fungovat bez dodávek elektrické energie z centrální DS s předpokladem přebytků energie v letním období. Zajímavým a inspirativním konceptem může být projekt Smart solution Varnsdorf, který podle výše popsaného konceptu zapojuje více BPS, solární, větrnou i malou vodní elektrárnu, to vše zálohované plynovou kogenerační jednotkou pro spalování zemního plynu, protože se již jedná o větší město včetně průmyslových oblastí s vyššími výkyvy v poptávce po energii. Tato chytrá řešení komunitních energetik jsou budoucností výroby elektrické energie. Největšími benefity by byla nízká cena energie, energetická soběstačnost, nízko emisní výroba elektrické energie obnovitelnými zdroji a spotřeba v místě výroby. Tím by se značně eliminovali ztráty energie v distribuční soustavě vzniklé přenosem a transformací elektrické energie.

3.4 Anaerobní fermentace

Fermentace probíhající bez přístupu volného kyslíku neboli metanizace, je souborem procesů, které na sebe musí přesně navazovat. Při těchto procesech rozkládá směsná kultura mikroorganismů biologicky rozložitelnou organickou hmotu na metan a oxid uhličitý.

Rozkladem organických látek získávají energii. Tyto směsné kultury jsou složeny z různých mikroorganismů, které se dělí do skupin dle fází procesu methanogeneze. Produkty jedné skupiny jsou substrátem skupiny druhé, proto výpadek jedné skupiny naruší průběh celého procesu. Anaerobní fermentace se vyskytuje v přirozených anaerobních prostředích, jež vznikají v sedimentech, zamokřených půdách, rýžových polích, trávicích systémech apod. Ale přirozeně tyto procesy probíhají velmi pomalu, hlavním důvodem je nízká teplota a nízká koncentrace aktivní biomasy. Mikroorganismy zodpovědné za metanogenezi patří do unikátní genealogické skupiny, o které panuje přesvědčení, že se vytvořila dávno před tím, než se v zemské atmosféře objevil kyslík (Matějka et al 2014).

Biologický proces rozkladu je ovlivněn řadou procesních a materiálových parametrů, jako jsou například složení zpracovávaného materiálu, teplota prostředí nebo hodnota pH. Po plném prozkoumání a popsání procesu anaerobní fermentace mohlo dojít k intenzifikaci celého procesu, tak aby mohl být využit jak pro biologické čištění odpadních vod za anaerobních podmínek nebo pro zpracování biomasy v bioplynových stanicích (Straka 2003; Kára et al. 2007).

Pro popis anaerobního metabolismu byly vytvořeny postupem času tři modely (Howgrave-Graham et al. 1991). Nejstarší model předpokládal dvoufázový proces, který zahrnoval acidogenní fázi, během které jsou produkovány mastné kyseliny a metanogenní fázi, v jejímž průběhu metanogenní organismy přeměňují tyto kyseliny na CO_2 a CH_4 , ale mohou také k produkci metanu využít CO_2 a H_2 . Třífázový model, popsáný Mackiem a Bryantem (1981), začíná fermentační fází, ve které jsou komplexní organické materiály (např. Uhlovodíky, proteiny a lipidy) konvertovány na mastné kyseliny, alkoholy, CO_2 a amoniak. Ve druhé fázi vodík produkující acetogenní bakterie štěpí tyto produkty na H_2 , CO_2 , acetát a nižší mastné kyseliny. Ve třetí fázi využívají metanogenní mikroorganismy H_2 , CO_2 a acetát pro produkci metanu a mikrobiální biomasy. Dnes se využívá nejnovějšího čtyřfázového modelu, který je popsán níže (Sahm 1981; Sam-Soon et al., 1987).

3.4.1.1 Hydrolýza

V této fázi mikroorganismy rozkládají pomocí extracelulárních hydrolytických enzymů organické makromolekulární látky zejména polysacharidy, proteiny a lipidy na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě. Důležitý je obsah vlhkosti nad 50 % hmotnosti. Takto enzymaticky rozložené látky jsou schopné transportu přes buněčnou stěnu bakterií. Rozklad materiálu, který obsahuje polysacharidy (celulózu, hemicelulózu) je mnohem pomalejší, než rozklad materiálů obsahujících bílkoviny a tuky, což je z důvodu stabilních β vazeb polysacharidů (Altmann et al. 2010; Kára et al. 2007; Sahm 1981; Sam-Soon et al. 1987).

3.4.1.2 Acidogeneze

Produkty hydrolýzy jsou transportovány do buněk, kde jsou rozkládány na jednodušší organické látky jako organické kyseliny, alkoholy, vodík a oxid uhličitý. Velice důležitou skutečností je, že acidogenní mikroorganismy nespotřebovávají ve svém metabolismu mastné kyseliny, ty tak mohou být substrátem v následujícím stupni anaerobní fermentace, acetogenezi. Této fáze se účastí rozsáhlé spektrum obligátních a fakultativních anaerobních bakterií (Altmann et al. 2010; Sahm 1981; Sam-Soon et al. 1987).

3.4.1.3 Acetogeneze

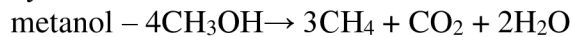
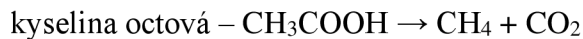
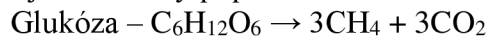
Při procesu acetogeneze probíhá rozklad vyšších mastných kyselin, kyseliny mléčné, máselné, valerové a dalších na vodík a kyselinu octovou. Zde syntrofní bakterie produkují velké

množství vodíku a oxidu uhličitého. Pokud je celý systém nastaven správně, v dalším kroku je vodík odčerpán pro produkci metanu. Pokud je však systém v nerovnováze vodík inhibuje činnost acetogenních bakterií, výsledkem jsou vysoké koncentrace vyšších kyselin ve fermentovaném substrátu (Altmann et al. 2010; Pastorek et al. 2004; Sahn 1981; Sam-Soon et al., 1987).

3.4.1.4 Metanogeneze

V terminální stádiu označovaném jako metanogeneze jsou rozkládány jednoduché organické látky na metan a oxid uhličitý, tedy dvě hlavní složky bioplynu. Jedná se o dvě hlavní skupiny mikroorganismů, metanogenní a hydrogentrofní, první skupina rozkládá kyselinu octovou za vzniku metanu a oxidu uhličitého, druhá skupina odčerpává vodík z procesu acetogeneze a syntetizuje jej s oxidem uhličitým za vzniku metanu a vody. Pro stabilitu procesu anaerobní fermentace organických materiálů je velmi důležitá optimální rovnováha v kinetice jednotlivých fází probíhajících s odlišnou kinetickou rychlostí. Metanogenní fáze probíhá přibližně 5x pomaleji než zbylé tři fáze (Altmann et al. 2010; Pastorek et al. 2004).

Zjednodušený popis anaerobní fermentace:



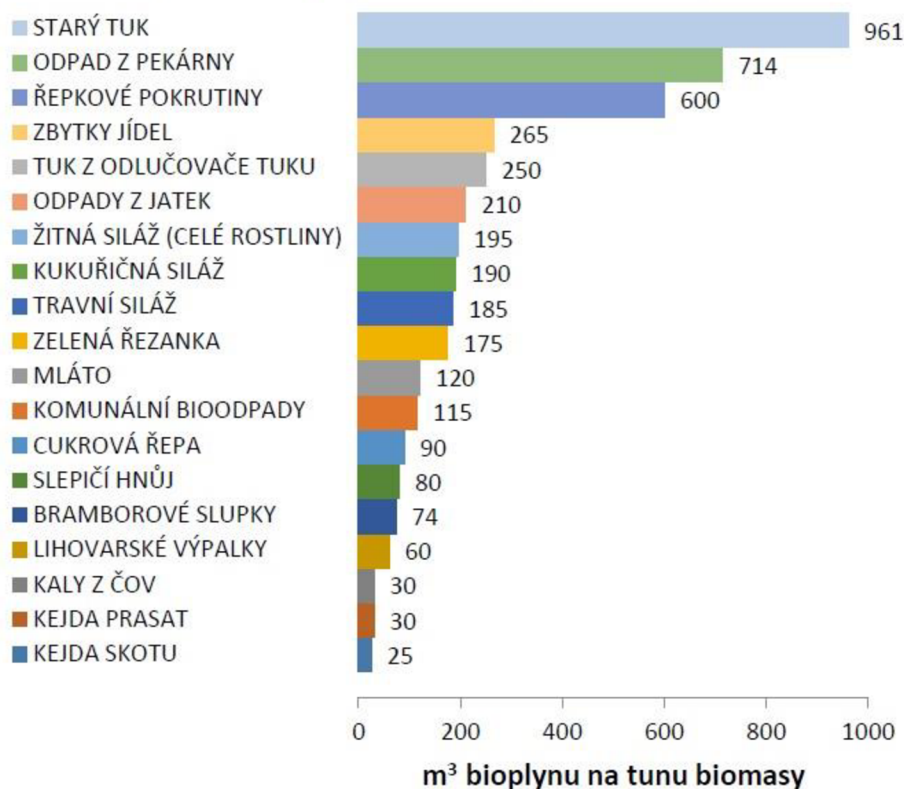
3.5 Vstupní suroviny anaerobní fermentace

Obecně lze konstatovat, že vstupní suroviny by měly mít nízký obsah anorganického podílu (popelovin) a vysoký podíl biologicky rozložitelných látek. Obsah sušiny by se měl pohybovat u suché fermentace v rozmezí 22–25 % u mokré v rozsahu 8–14 %. Vyšší hodnoty lze vyřešit příměsí vody, avšak nízké hodnoty sušiny by vedly k negativní energetické bilanci anaerobní fermentace, proto je třeba takový substrát homogenizovat s jinými substráty o vyšším obsahu sušiny. Významným faktorem je pH, které by mělo být blízko neutrální hodnotě pH = 7. Ideální substrát by měl také obsahovat poměr uhlíku ku dusíku přibližně 30 : 1, tohoto poměru lze nejlépe dosáhnout smícháním různých surovin. Na rozvoj mikroorganismů také negativně působí především všechny druhy antibiotik používaných jako léčiva pro zvířata nebo preventivně jako součást krmných směsí pro drůbež (Pastorek et al. 2004).

Nejčastějšími substráty jsou dle Pastorka (2004):

- Zvířecí hnůj a kejda
- Zemědělské odpady a vedlejší produkty
- Organické odpady z potravinářského průmyslu a zemědělství (rostlinného a živočišného původu)
- Organický podíl komunálního odpadu a gastroodpad (rostlinného a živočišného původu)
- Kal z čistíren odpadních vod

Výnos bioplynu z tuny biomasy



- Cíleně pěstované energetické plodiny např. kukuřice, jetele, žito

Obrázek 3 Teoretická výtěžnost produkce bioplynu z 1 t biomasy v přirozeném stavu.

Z výše uvedeného vyplývá, že nejlepším substrátem pro aerobní fermentaci je kombinace zemědělských rostlinných plodin nebo odpadů, které mají vysoký obsah uhlíku a zvířecí exkrementy nebo živočišné odpady potravinářského průmyslu, které substrátu dodají potřebný dusík. Zvláště cenné jsou v tomto případě tuky a oleje, ze kterých je nevyšší produkce bioplynu na tunu suroviny, jejich obsah by však neměl překročit 5 % objemu suroviny (Pastorek et al. 2004).

3.6 Průběh anaerobní fermentace na BPS

K tomu, abychom dokázali hodnotit energetickou účinnost BPS a racionalizovat její provozování je nutné představit celý proces anaerobní fermentace na bioplynové stanici a zmínit jednotlivé technologické prvky.

3.6.1 Rozdělení anaerobní fermentace z hlediska teploty ve fermentoru.

- Psychrofilní 5–30 °C
- Mezofilní 30–40 °C
- Termofilní 45–60 °C
- Hypertermofilní nad 60 °C

Výhodou procesů prováděných za vyšších teplot je hlavně efektivní hygienizace materiálu či vyšší rychlost rozkladu snadno rozložitelných organických látek. Nevýhodou je vyšší spotřeba tepla k ohřevu fermentorů a často i nižší kvalita bioplynu. Proto nejběžnější aplikace je při teplotě kolem 40 °C (Kára et al. 2007; Pastorek et al. 2004; Schulz et al. 2004).

3.6.2 Rozdělení anaerobní fermentace dle provozní sušiny substrátu.

- Mokrý fermentace – rozklad organického substrátu s podílem sušiny 4–12 %
- Suchá fermentace – rozklad organického substrátu s vysokým podílem sušiny až 40 %

Výhodou mokré fermentace je snadný kontinuální provoz, stabilní produkce bioplynu, jednoduchá technologie míchání a snadnější manipulace s fermentačním zbytkem. Z hlediska četnosti výrazně převažuje aplikace mokré fermentace což je často dáno historicky, kdy BPS zpracovávali hlavně chlévskou mrvu a kejdu. Výhodou suché fermentace je diskontinuální nebo sezónní provoz, snížení objemu fermentovaného substrátu a nižší náklady při přepravě fermentačního zbytku, autoři se však přiklání k nižší výtěžnosti bioplynu při suché fermentaci (Kára et al. 2007; Pastorek et al. 2004; Schulz et al. 2004).

3.6.3 Rozdělení anaerobní fermentace dle dávkování vstupního substrátu.

Bioplynová stanice může být, z hlediska dávkování vstupního materiálu, provozována kontinuálně nebo diskontinuálně.

U kontinuálního provozu je materiál dávkován do fermentoru nepřetržitě, čímž je docíleno i kontinuální předvídatelné produkce bioplynu v konstantní kvalitě a objemu po celou dobu fermentace. Aby bylo možno dávkovat materiál v nižších dávkách, pravidelně během celého dne, kontinuálně provozované systémy zpracovávají materiály s nižším obsahem sušiny, do 12 %. Jsou zde vyšší provozní náklady na zajištění kontinuity celého procesu, zařízení je konstrukčně složitější. Technicky se jedná o přečerpávající čerpadla a dávkovače substrátu. Kontinuální provoz umožňuje vysoce efektivní využití fermentorů. (Vítěz et al. 2013; Kára et al. 2009).

U diskontinuálního provozu je naopak veškerý materiál do fermentoru dávkován najednou. Doba jednoho pracovního cyklu odpovídá době zdržení materiálu ve fermentoru, přičemž je materiál sprchován tzv. perkolátem (tekutou složkou fermentované biomasy). Oproti kontinuálnímu systému je produkce bioplynu u diskontinuálního provozu nejvyšší na začátku procesu a časem pozvolně klesá. Po skončení fermentace je fermentor vyprázdněn a následně znovu naplněn čerstvým materiálem. K eliminaci nestálé produkce bioplynu se obvykle využívá paralelní provoz více fermentorů, z nichž každý se nachází v jiném technologickém stadiu produkce. Tento způsob je využíván u bioplynových stanic pracujících se sušinou ve fermentoru nad 30 %. Vyprazdňování fermentoru může probíhat automatizovaně, ale nejčastěji se substrát vybírá manipulační technikou např. kolovým nakladačem (Vítěz et al. 2013; Kára et al. 2009).

3.5.1 Technologie anaerobního fermentoru

Anaerobní fermentor může být horizontální nebo vertikální. Nejčastější konstrukcí horizontálního fermentoru je válcová ocelová nádrž či železobetonové konstrukce čtvercového průřezu. Hranaté horizontální fermentory jsou vhodnější pro suchou fermentaci. Hlavní výhodou horizontálního fermentoru je možnost instalace výkonného mechanického míchadla, které je nezbytné u suché fermentace. Tím se dosáhne dobrého promíchání ve směru průtoku a minimálního promísení v podélném směru. To má za následek tzv. pístové proudění, tím se tolik nemísí nová biomasa s již částečně fermentovanou. Nevýhodou této konstrukce je však velký prostor zastavěné plochy k relativně nízkému objemu a vysoké tepelné ztráty fermentoru (Schulz et al. 2004).

Vertikální fermentor je nejčastěji kruhová nádrž železobetonové konstrukce. Hlavní výhodou této konstrukce je lepší poměr mezi zastavěnou plochou a objemem, čímž se efektivně využívá objem a snižují tepelné ztráty. Je zde možné instalovat pouze jednu skupinu míchadel o nižším nominálním výkonu, protože směs je promíchávána rovnoměrně nedochází

zde k pístovému proudění (Schulz et al. 2004). Tyto fermentory jsou nejvíce využívány pro mokrou diskontinuální fermentaci. Navíc lze fermentory koncipovat jako nadzemní nebo částečně zapuštěné, vždy však záleží na použité technologii a podloží. Velmi důležitou vlastností fermentorů je jejich plynotěsnost, a to včetně spojů a potrubí. Celkových konceptů provedení fermentoru v BPS může být několik typů: Fermentor s integrovaným plynojemem nebo je plynojem samostatnou nádrží, fermentor s dofermentorem typu kruh v kruhu s integrovaným plynojemem nebo opět odděleně, fermentor a dofermentor jako samostatné nádrže s integrovanými plynojemy nebo odděleně. Objem fermentorů záleží na zpracovávaném materiálu, době zdržení a výkonu BPS, proto se vyskytují objemy od 500 m³ u menších BPS až po 20 000 m³ (Pastorek et al. 2004; Schulz et al. 2004). Dle statistik České bioplynové asociace má průměrná zemědělská BPS v České republice fermentor o objemu kolem 6 000 m³.

Důležitou součástí fermentoru je také izolace, zpravidla vícevrstevná, nejčastěji minerální vata krytá oplechováním, izolace tak efektivně snižuje spotřebu tepla na ohřev fermentorů hlavně v zimním období.

Míchadla jsou mechanickou součástí fermentoru. Musí zajistit účinné promíchávání substrátu, aby se vytvořily optimální podmínky pro tvorbu bioplynu, zamezilo se vytváření koláče na hladině nebo sedimentu u dna a stěn a zároveň nedocházelo k plýtvání cennou elektrickou energií, jsou zároveň nejvýznamnějším spotřebičem ve fermentační zóně.

Na trhu jsou dnes nabízena řešení vybavující fermentory míchadly s celkovým elektrickým příkonem v širokém rozmezí 10–20 W/m³ míchaného objemu. Obecně menšího měrného příkonu vykazují technologie schopné pracovat s vyšší sušinou nad 10 %, míchadla u nich však pracují s vyšším zatížením a vyšší frekvencí míchání. Z hlediska energetické efektivity procesu je nejvhodnější porovnávat tuto spotřebu míchadly k celkové hrubé výrobě elektřiny, jelikož je tím rozhodujícím ukazatelem efektivity stanice. Typický poměr bývá mezi 2–4 % celkové roční výroby elektřiny, dobré provozy přitom nepřesahují 3 % (SEVEN energy 2013).

Nepostradatelnou technologií jsou čerpadla materiálu, čerpání hustých materiálů, jakým je fermentační zbytek v nádržích BPS, vyžaduje speciální míchací techniku, která je přizpůsobena na charakter tohoto média. Proto jsou čerpadla často vybavena řezacím ústrojím schopným rozmělnit organický materiál a průchodností až 55 mm, což snižuje riziko zacpání čerpadel. V nabídce je opět široká škála čerpadel s nebo bez řezacího ústrojí s výkony od 150 do 300 m³/h a výkonem až 25 kW. Nejúspornějším řešením, je minimalizovat použití čerpadel a využít gravitačního přepadu mezi fermentory nebo koncovým skladem, ovšem ne vždy to povaha fermentovaného substrátu dovoluje (SEVEN energy 2013).

Je-li spolu s dalšími zásadními parametry proces (stupeň pH, teplota atd.) optimalizován, podaří se do podoby bioplynu transformovat i více než 90 % původní organicky rozložitelné hmoty. Při nedostatečném zdržení to však může být i méně než 70 %. Klíčem k tomu je správné dimenzování fermentoru, které by mělo být přizpůsobeno charakteru vstupu a zejména teplotním podmínkám, za kterých proces probíhá (Pastorek et al. 2004; SEVEN energy 2013).

3.7 Hlavní produkt bioplyn

Bioplyn je plyný produkt vzniklý výše popsaným procesem anaerobní fermentace. Takto vzniklý plyn může vznikat přirozeně v prostředích bez přístupu kyslíku tedy například v mokřadech anebo v člověkem technologicky řízené anaerobní fermentaci přímo ve fermentoru BPS (Seadi et al. 2013). Přestože samotný bioplyn nemá výrazný zápach, mohou se při procesu anaerobní fermentace uvolňovat nepříjemné pachy z organických látek, které jsou rozkládány. To závisí na typech organických materiálů používaných k výrobě bioplynu

a na podmínkách fermentace. Nepříjemný zápach může být také způsoben látkami s obsahem síry nebo amoniakem (Drosg et al. 2015). Chemické složení plynu je v ideálním případě fungující anaerobní fermentace více jak 50 % obj. metanu a 45-25 % obj. oxidu uhličitého. V praxi se setkáváme s požadovanou koncentrací 50-70 % obj. metanu, avšak velmi záleží na vstupních surovinách anaerobní fermentace, protože zatímco u tuků dochází k výrazné produkci metanu ve směsi, a to i přes 70 % obj., v případě sacharidů a polysacharidů je to kolem 50 % obj. (Kathijotes et al. 2015). Obsah metanu je velmi důležitý pro následující energetické využití bioplynu, a to ať formou přímého spalování v plynových kotlech pro produkci tepla, v kogenerační jednotce pro kombinovanou výrobu energie a tepla anebo v motorech vozidel určených k jejich pohonu (Altmann et al. 2010; Pastorek et al. 2004; Seadi et al. 2013).

Dalšími příměsemi v bioplynu často bývá vodní pára, která by neměla přesáhnout 7 % obj. a často je nutné tuto nežádoucí vlhkost odstraňovat. Obsah vodní páry závisí hlavně na teplotě fermentace. Výrazné technologické komplikace může vytvořit i obsah sirovodíku, který pokud překročí 0,05 % obj. může reagovat s kovovými materiály potrubí, ale i při samotném spalování může vytvářet komplikace ve formě zanášení spalovacích trysek nebo vstřikovačů. Vznik sirovodíku je spojen hlavně s fermentací exkrementů drůbeže a prasat (Seadi et al. 2013). V bioplynu je přítomen i vodík, který nebyl využit v procesu metanogeneze, pokud jeho obsah nepřesáhne 2 % obj., nejedná se o problém. V případě vyšších koncentrací vodík inhibuje acetogenezi a může signalizovat inhibici metanogeneze, tento stav je nutné řešit úpravou podmínek anaerobní fermentace. Přírozenou příměsí je vzdušný dusík do 2 % obj. nebo argon, který prochází celým procesem jako inertní plyn. Rovněž obsah plyného amoniaku do 1 % obj. je normální (Altmann et al. 2010; Kára et al. 2007; Seadi et al. 2013). Důvodem proměnlivosti obsahu jednotlivých plynů a jejich zastoupení je, že se jedná o biologický rozklad heterogenní organické hmoty a vždy tak záleží na výše uvážených podmínkách fermentace a technologických znalostech obsluhy, která je povinná optimalizovat fermentační proces v průběhu celého roku, kdy se nejen mění skladba dostupného substrátu, ale i venkovní teplota. Také koncentrace některých látek nad jejich optimální rozhraní může identifikovat problém v procesu fermentace a tím usnadnit řízení procesu (Kára et al. 2007; Seadi et al. 2013).

3.7.1 Vlastnosti bioplynu

Metan je hlavní složkou bioplynu a slouží jako zdroj energie a určuje hodnotu jeho výhřevnosti. Vyšší obsah metanu znamená lepší energetický výkon. Kvalitní bioplyn obsahuje vysoký podíl metanu přesahující 50 %. Výhřevnost metanu je $9,965 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, pokud tuto hodnotu vynásobíme celkovým objemem metanu v bioplynu, dostaneme hodnotu výhřevnosti konkrétního bioplynu. Příklad konkrétního výpočtu je uveden v kapitole 3.14.3.

Vlhkost v bioplynu může ovlivnit jeho spalitelnost a energetickou hodnotu. Vysoká vlhkost může vést k nižšímu energetickému výkonu a také může být nežádoucí při některých technologických aplikacích. Při vyšším obsahu vlhkosti je proto nutné před využitím bioplyn sušit. Stabilita produkce bioplynu umožňuje jeho efektivní využití jako paliva. Fluktuační v kvalitě mohou ovlivnit spolehlivost energetických zařízení, která využívají bioplyn (Kára et al. 2007; Seadi et al. 2013).

3.8 Vedlejší produkt fermentační zbytek

Fermentační zbytek vznikající jako vedlejší produkt po anaerobní fermentaci po výrobě bioplynu, je tmavě šedá až černá hustá heterogenní tekutina s typickým zemitým zápachem o obsahu sušiny 5 až 10 % hmotnostních a významným podílem nerozložené pevné organické

fáze (60–80 % organických látek v sušině). Ve srovnání s klasickými statkovými hnojivými má fermentační zbytek vzhledem ke vstupním surovinám obdobný obsah dusíku (0,3 až 0,8 % v původní hmotě) a vyšší hodnotu pH 7 až 9 (Tlustoš et al. 2014). Objemy vyprodukovaného fermentačního zbytku se pohybují mezi 95 a 98 % z původně přivedeného množství substrátu do reaktoru. Zbýlých 2–5 % je přeměněno na bioplyn (Kathijotes et al. 2015).

Fermentační zbytek je obvykle pozitivně hodnocen kvůli obsahu živin a dopadu na půdní mikroflóru s ohledem na vysoký obsah dusíku, fosforu a draslíku. Je nutné zdůraznit, že dusík a draslík jsou přítomny hlavně v kapalné formě, zatímco fosfor je převážně přítomen v pevné formě, což je velmi důležité pro další zpracování fermentačního zbytku. Účinnost fermentačního zbytku jako hnojiva prokázaly mnohočetné studie zaměřené na růst rostlin v substrátech obohacených fermentačním zbytkem nebo přímo hnojené kapalnou složkou fermentačního zbytku. Zejména byly prokázány pozitivní účinky fermentačních zbytků z výkalů hospodářských zvířat a energetických plodin, které tak jsou výbornou alternativou k hnojení minerálními hnojivými (Bolzonella et al. 2018).

3.8.1 Vlastnosti fermentačního zbytku

Fermentační zbytek vykazuje neutrální, častěji však slabě zásadité hodnoty pH. Vyšší hodnota pH může být způsobena zvýšenou koncentrací celkového amoniakálního dusíku (Makádi et al. 2012). Na hodnotu pH má vliv rovněž použitý substrát. Fermentační zbytek z výkalů hospodářských zvířat je mírně zásaditý. Fermentační zbytky z rostlinných substrátů jsou neutrální až mírně zásadité (Al Seadi et al. 2013). Vyšší hodnoty pH mohou v současné době zmírňovat dopady okyselování půd. Ovšem přináší komplikaci v podobě ztrát těkavého amoniaku, neboť jeho zastoupení v rámci amoniakálního dusíku s rostoucí hodnotou pH roste (Makádi et al. 2012).

Kvalitní fermentační zbytek se vyznačuje tím, že obsahuje hodnotné minerální a organické látky, zápach je minimální, popřípadě žádný (Marada et al. 2008). Obsah organické hmoty a organického uhlíku závisí na podílu sloučenin uhlíku, které jsou biochemickými procesy během anaerobní fermentace transformovány na bioplyn. Obsah snadno rozložitelných organických látek závisí zejména na době zdržení substrátu v bioplynové stanici. Čím delší doba zdržení, tím méně snadno rozložitelných organických látek bude výsledný fermentační zbytek obsahovat (Stinner et al. 2008). Nutriční obsah a kvalita fermentačního zbytku jsou ovlivněny chemickým složením vstupních materiálů a jejich případnou předúpravou, procesními podmínkami (obsah sušiny, provozní teplota ve fermentoru, doba zdržení apod.), dobou a způsobem skladování (Drosg et al. 2015).

Významným faktorem je i vysoký obsah dusíku, ze kterého až 80 % představuje dusík amoniakální. Čím více amoniakálního dusíku obsahuje fermentační zbytek, tím hodnotnější je pro rostliny, avšak vysoké koncentrace amoniakálního dusíku, vzhledem k jeho těkavosti, způsobují ztráty při skladování, transportu a aplikaci (Makádi et al. 2012). Při aplikaci fermentačního zbytku na půdu se zhruba 15 % přítomného dusíku uvolní ve formě amoniaku do atmosféry v závislosti na způsobu aplikace, environmentálních podmínkách a podmínkách skladování daného stanoviště (Chiumenti et al. 2013). Během procesu anaerobní fermentace nedochází ke změnám obsahu živin, ale pouze ke změnám příslušné formy (Al Seadi et al. 2013). Výsledné koncentrace jednotlivých forem dusíku se tedy odvíjí od počátečního obsahu organického dusíku v substrátu (Drosg et al. 2015). Na celkovou koncentraci dusíku mohou mít vliv i další faktory, například parametry procesu, množství použité čisté vody a stupeň recirkulace fermentačního zbytku (Fuchs & Drosg 2013; Drosg et al. 2015).

Význam dusíku pro výživu rostlin je zásadní, proto jej řadíme mezi makroprvky. Dusík je nezbytným stavebním prvkem pro syntézu proteinů, což jsou základní stavební bloky buněčných struktur a jsou klíčové pro růst a obnovu rostlinných tkání. Dále je to významný

stavební prvek syntézy chlorofylu, DNA, rostlinných enzymů i sekundárních metabolitů např.: alkaloidů. Dusík je v půdě velmi mobilní, jeho dávkování je nutné upravit vzhledem k požadavkům výživy rostlin v průběhu vegetačního období. Dusík, který není takto využit rostlinami, může být vodou odplaven a kontaminovat tak povrchové vody a způsobit jejich eutrofizaci (Al Seadi et al. 2013).

V porovnání s kompostováním může mít fermentační zbytek z anaerobní fermentace vyšší obsahy fosforu 0,05 – 0,2 % a draslíku 0,3 – 0,5 %, v závislosti na použitém substrátu, a proto může být vhodný k doplnění těchto makroprvků do půdy (Makádi et al. 2012). Exkrementy hospodářských zvířat mají vysoký obsah makroprvků, což je dáno jejich přítomností v krmivech. Odpady živočišného původu jsou tak bohatým zdrojem rostlinných živin (Lukehurst et al. 2010).

Fosfor je důležitý makroprvek a rostlina jej potřebuje pro syntézu deoxyribonukleových kyselin, adenosintrifosfátu nebo produkci fosfolipidů pro výstavbu buněčné stěny, nedostatek tohoto prvku vede k pomalému růstu, špatnému rozvoji kořenů, a snížené schopnosti odolávat stresovým podmínkám, tím tedy k nízkým výnosům. Avšak opakovaná aplikace fosforu do půdy může vést k akumulaci v půdě, odkud se může dále dostávat do povrchových a spodních vod (Lukehurst et al. 2010).

Draslík se v tělech rostlin podílí na hospodaření s vodou tím, že udržuje pevnost buněčné stěny, aktivuje enzymy, je zvláště důležitý při tvorbě semenného materiálu a plodů. Zároveň zvyšuje odolnost vůči stresu a extrémům počasí (Lukehurst et al. 2010). Podstatný význam má i obsah hořčíku, který tvoří nedílnou součást chlorofylu, což ovlivňuje proces fotosyntézy (Koszel & Lorencowicz 2015). Neopominutelný je i obsah síry, její přítomnost je důležitá pro tvorbu potřebných aminokyselin v metabolismu rostlin (Möller & Müller 2012).

3.9 Úpravy fermentačního zbytku

V praxi se setkáváme s mnoha způsoby zpracování a využití fermentačního zbytku. První a nejjednodušší je přímé použití jako hnojiva aplikací do půdy společně se zaorávkou. Pokud chceme více optimalizovat pěstební proces, můžeme takto provést několik agronomických úkonů najednou, jedná se o: kypření ulehle půdy, hnojení fermentačním zbytkem přímo do vegetační vrstvy, plečkování a rozrušení plevelů a v neposlední řadě je možné do roztoku přimíchávat jak směs granulovaného vápence pro obohacení půdy Ca^{2+} ionty tak i inhibitory nitrifikace, které stabilizují amoniakální dusík, a tím umožní, aby byl v půdě přítomen pro rostliny delší dobu, příkladem může být přípravek Vizura firmy BASF s obsahem 14 % DMPP (3,4 - dimethylpyrazol fosfát).

Většina mechanizovaných aplikátorů však vyžaduje pouze tekutou frakci fermentačního zbytku tedy pouze fugát, zde se tedy dostáváme k první a nejrozšířenější úpravě fermentačního zbytku – jeho separaci na pevnou a kapalnou frakci (Al Seadi et al. 2013; Fuchs & Drosch 2013; Javor et al. 2023).



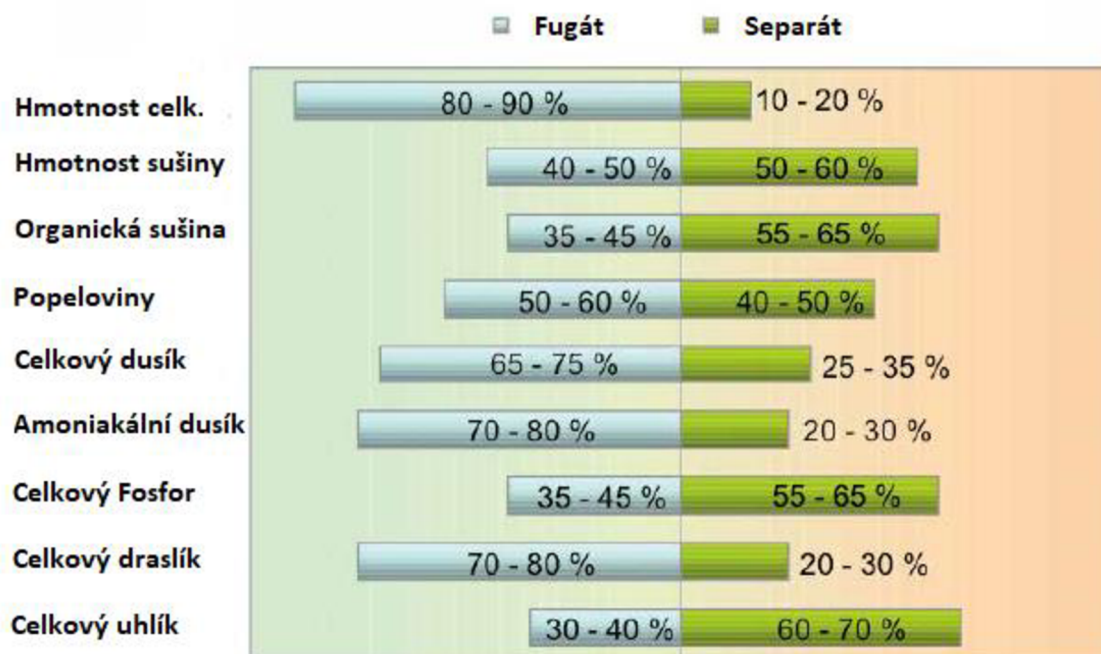
Obrázek 4: Lokální aplikace fermentačního zbytku při jarním pásovém zpracování půdy metodou strip-till

3.9.1 Způsoby separace fermentačního zbytku

Fermentační zbytek se různými separačními technikami dělí na tuhou frakci (separát) a tekutou frakci (fugát) (Vítěz et al. 2013). Separace pevné frakce a kapalně frakce je prvním, a často také jediným krokem zpracování fermentačního zbytku (Al Seadi et al. 2013; Fuchs & Drogg 2013). Zřídka se stává, že by se zpracovával surový fermentační zbytek bez předchozí separace (Fuchs & Drogg 2013). Separace na jednotlivé frakce navíc poskytuje i přirozené oddělení fosforu, draslíku a dusíku, kdy dusík a draslík zůstává v kapalně frakci a většina fosforu naopak v pevně (Nkoa 2014).

Perspektivně lze fermentační zbytek separovat do dvou odlišných proudů, jednoho kapalněho a druhého pevněho, s různým obsahem makroprvků. Tyto dva proudy lze dále zpracovávat k získání koncentrované formy živin tak, aby se minimalizovaly náklady na dopravu do různých zemědělských oblastí (Bolzonella et al. 2018).

Oddělenou pevnou frakci lze použít přímo pro zemědělské účely s výhodou výrazně nižších nákladů na dopravu kvůli nízkému obsahu vody a tedy i menšímu objemu. Další výhodou je, že pevnou frakci lze skladovat za výrazně výhodnějších legislativních podmínek, protože je zde výrazně nižší množství dusíku než ve fugátu. Alternativou k přímé aplikaci na půdu je další stabilizace kompostováním například v lokální kompostárně nebo přímé přimíchávání do obchodovatelných substrátů (Fuchs & Drogg 2013). V případě vysušení odpadním teplem BPS nebo například energií získanou z fotovoltaických panelů (Bolzonella et al. 2018) lze suchý separát využít jako stelivo pod hospodářská zvířata nebo peletovat a využít jako biopalivo. Nicméně s ohledem na obsah dusíku a tím vznik velkého množství NO_x při spalování separátu je nutné zařadit do procesu čištění spalin i katalytickou redukci NO_x , čímž se výrazně zvýší investiční náklady, proto se tato možnost prakticky nevyužívá (Fuchs & Drogg 2013).

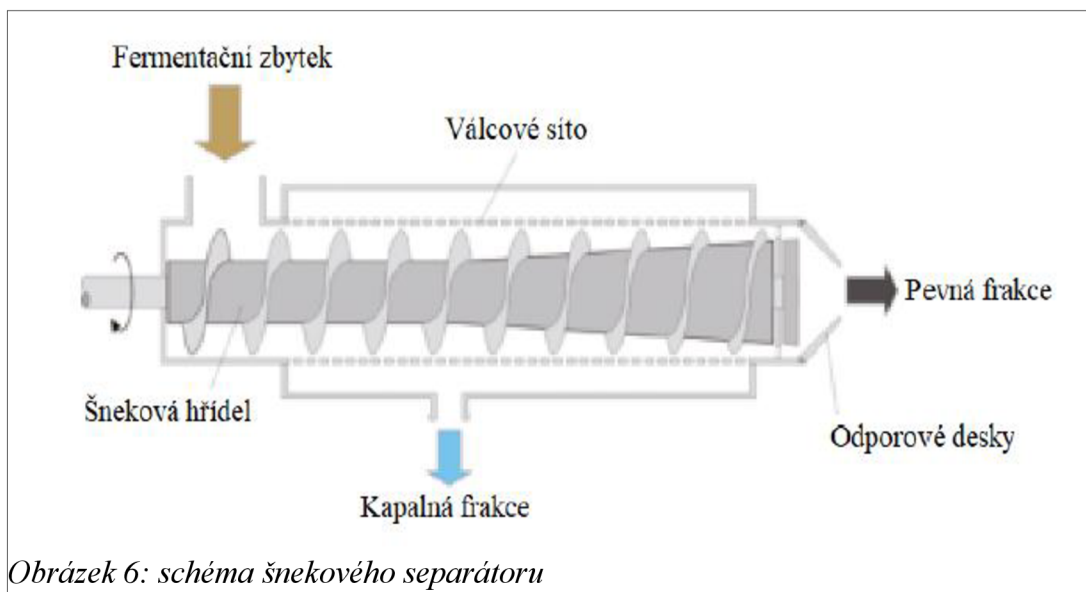


Obrázek 5: Rozdělení hlavních složek po separaci fermentačního zbytku

3.9.1.1 Šnekový separátor fermentačního zbytku

V moderních bioplynových stanicích se nejčastěji používá tlaková separace šnekovým lisem (Monfet et al. 2018). Šnekové lisovací separátory se nejvíce používají, pokud má fermentační zbytek vysoký obsah vlákniny. Z tohoto důvodu je šnekový separátor používán ve středních a velkých zemědělských bioplynových stanicích, které zpracovávají energetické plodiny (Al Seadi et al. 2013). Na obrázku 6 je zobrazeno schéma šnekového separátoru. Šroub přitlačuje vlákna proti válcovému sítu (bubnu). Kapalná frakce fermentačního zbytku opouští separátor skrz síto. Kvůli zvětšujícímu se průměru šroubu se tlak na materiál zvyšuje a díky tomu projde přes síto více kapaliny. Nakonec pevná frakce vystupuje na konci separátoru. Míru separace lze ovlivnit velikostí ok síta v bubnu, menší částice (průměr 0,5 – 1 mm) zůstávají v kapalině. Ke zvýšení odporu v bubnu lze využít i mechanicky nastavitelné odporové desky na výstupu ze separátoru. Pevná frakce zbavena vody je otáčením šnekové hřídele vytlačována koncovou částí z bubnu ven. (Fuchs & Drosg 2013).

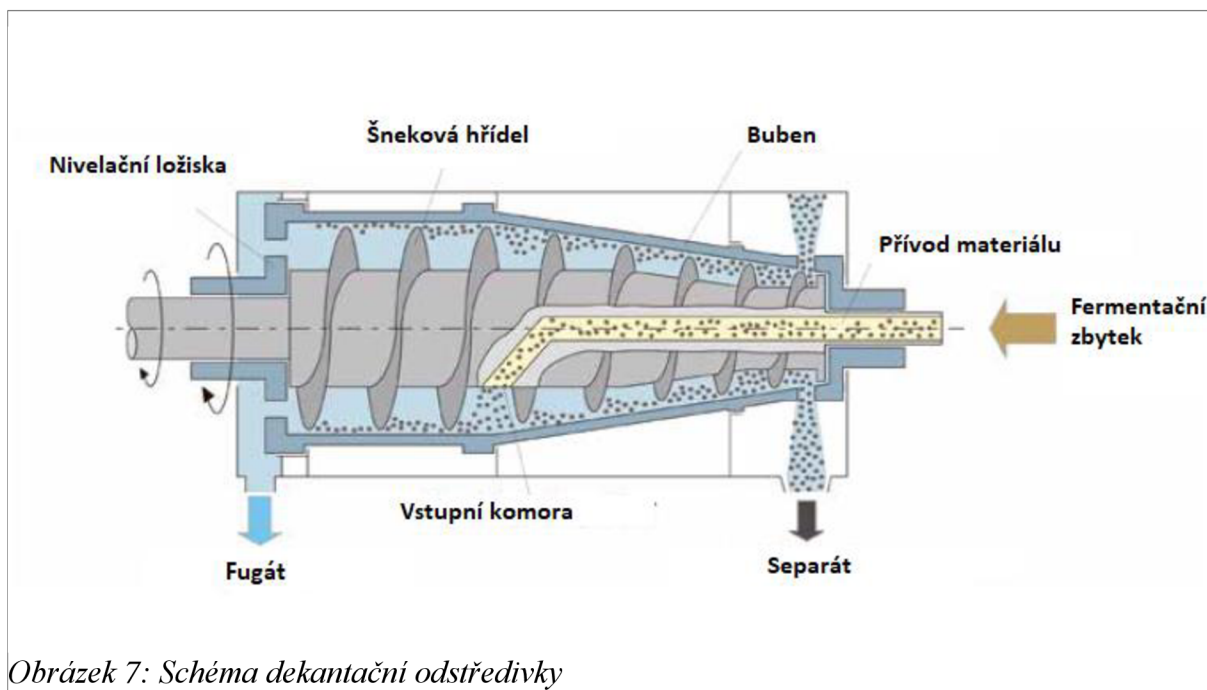
Na rozdíl od dekantčních odstředivek, separátor se šroubovým lisem nedokáže oddělit malé částice z fermentačního zbytku (Fuchs & Drosg 2013). Velkou výhodou šnekových lisů je jejich snadná obsluha, nízká hlučnost a relativně široký rozsah použití. Lze také konstatovat, že jde o velmi dostupnou technologii s nízkou počáteční investicí, snadnou obsluhou, vysokou účinností separace a nízkou spotřebou elektrické energie cca 0,4 – 0,7 kWh.m⁻³ (spotřeba závisí na velikosti ok síta v bubnu). Proto jsou šnekové lisy používány všude, kde to povaha odvodňovaného materiálu umožňuje (Al Seadi et al. 2013; Fuchs & Drosg 2013).



3.9.1.2 Separace dekantační odstředivkou

Odstředivky jsou využívány hlavně tam, kde je třeba oddělit malé částice a koloidy. Zároveň je možné je využít k oddělení většiny obsaženého fosforu, protože ten je součástí pevné frakce (Bolzonella et al. 2018). Schéma fungování odstředivky znázorňuje obrázek 7. Fermentační zbytek vstupuje do odstředivky přes centrální vstup a je dále dopravován do středu odstředivky. Ta se otáčí spolu se šnekovou hřídelí stejným směrem, avšak každá jinou rychlostí. Uvnitř bubny dochází k oddělení částic odstředivou silou. Separací výkon se odvíjí od velikosti, tvaru i hustoty separovaných částic. Oddělené částice se vlivem odstředivých sil hromadí na stěnách bubny, odtud jsou následně posunovány otáčením šnekové hřídele k výstupu. Současně dochází k vypouštění oddělené kapalné frakce na opačné straně (Drosg et al. 2015).

Tato technologie se u nás v ČR využívá velmi málo, a to hlavně tam, kde je kladen důraz na odstranění jemných částic například tam, kde poté chceme zpracovávat fugát metodou membránové separace, dále se nabízí využití v ČOV, avšak pro tento způsob jsou lepší a dostupnější technologie, jako například kalolis. Dalším omezujícím faktorem je, že spotřeba energie je na tuto technologii velmi vysoká 3–5 kWh.m⁻³ materiálu což je při množství zpracovaného materiálu limitující pro větší BPS. Zároveň investiční náklady, zvláště ty na údržbu jsou vyšší než při použití jiných technologií. Proto jedinou výhodou použití dekantační odstředivky je její vysoká účinnost oddělení malých částic z fugátu (Al Seadi et al. 2013; Drosg et al. 2015; CZ Biom 2024).



Obrázek 7: Schéma dekantační odstředivky

3.9.1.3 Další technologie separace fermentačního zbytku

Pásové filtry lze také použít pro separaci fermentačního zbytku. Existují dva základní typy: pásové filtrační lisy a vakuové pásové filtry. Pásový kalolis se skládá z uzavřených smyček textilního pásu navinutého kolem válců. Fermentační zbytek se aplikuje kontinuálně na začátku pásu. K prvnímu předběžnému odvodnění dochází gravitací. V dalším kroku je materiál stlačený mezi dvěma filtračními pásy. Toto stlačení vykonávají přítlačné válce. Nakonec se odvodněný separát odstraní z filtračního pásu. Filtr se čistí tlakovou vodou nebo fugátem a je tak znovu použit k filtraci. Celý proces lze ještě zefektivnit, pokud pod textilní pás aplikujeme podtlak (Drosg et al. 2015).

Tento systém je velmi efektivní pro menší hlavně komunální BPS, kde je separát následně použit ke kompostování, protože v něm zůstává nejvíce vlhkosti z výše zmíněných metod. Spotřeba energie je přímo úměrná potřebě odvodnění separátu a to 1–2 kWh/m³. Pokud chceme odstranit veškeré suspenze, musíme do fermentačního zbytku aplikovat flokulační (srážecí) činidla. Běžnými srážecími činidly jsou síran hlinitý ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), chlorid železitý (FeCl_3), síran železitý ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) a vápno ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Dávkování činidel výrazně prodražuje celý proces separace. Jistou nevýhodou systému je i potřeba většího prostoru pro technologické zařízení a potřeba výměny textilních filtrů (Al Seadi et al. 2013; Drosg et al. 2015).

Flotace je proces, který může být využíván jak k separaci fermentačního zbytku, tak k odstranění koloidů a drobných pevných částic po například šnekové separaci. Principem je dávkování flokulačních činidel a vzniku větších shluků (vloček). Ty jsou v nádrži následně malými bublinkami nadnášeny k hladině, kde vytvářejí souvislou plovoucí vrstvu, která je následně sbírána. Hlavní motivací k použití této technologie je buď příprava na technologii membránové separace fugátu, potřeba odstranění fosforu, protože ten je vázán právě na separovaný pevný podíl nebo obsah rizikových prvků, které je možné flokulačním činidlem vysrážet a odstranit, aby bylo možné fugát dále využívat (Al Seadi et al. 2013; Drosg et al. 2015; Bolzonella et al. 2018).

Síta a filtry jsou technologicky nejjednodušší variantou. Vibrující síta a zakřivené filtry jsou běžně používány při zpracování fermentačního zbytku, který je přímo aplikován na síto a veškerý pevný materiál zůstává na vrchu síta, kde je vibrační pohyb odstraňuje, zatímco

kapalina prochází skrz. Aby se zabránilo rychlému zanášení sít, jsou provozovány pod vibracemi. Typické rozměry ok síta jsou 150–250 µm pro vibrující síť a 100–300 µm pro vibrující zakřivená síta. Avšak příliš malé velikosti ok sít mohou vést k rychlému zanášení. Kromě sít jsou také používány předfiltry, které mají funkci zadržovat větší částice, například před membránovým systémem. Vzhledem k možnosti použití soustavy sít s různými rozměry ok je možné separovat od sebe i jednotlivé frakce. Výsledný separát však obsahuje velké množství vody, a proto se nehodí k sušení, ale spíše ke kompostování. Výhodou této technologie je levný provoz, nízké investiční a servisní náklady (Al Seadi et al. 2013; Drog et al. 2015, Bolzonella et al. 2018).

Odpařování a sušení je metodou, která je sice možná, ale naprosto nevhodná, možnost k odpařování fermentačního zbytku je několik, od přímého sušení na slunci v mělkých nádržích až po zahřívání fermentačního zbytku odpadním teplem z kogenerační jednotky nebo teplým vzduchem na fluidním loži, nejúspěšnější řešení je vakuová odparka. Avšak v průběhu odpařování se vypaří významná část amonného dusíku a tím si případný separát znehodnotíme. Navíc zařízení, které by efektivně odpařovalo vodu z větších BPS, by bylo značně náročné na prostor. Investiční a provozní náklady jsou naprosto nerentabilní i při využívání odpadního tepla z BPS. Jedinou výhodou je, že takto můžeme odstranit pouze část vody, a tím fermentační zbytek pouze zkoncentrovat pro další technologické využití (Drog et al. 2015; Bolzonella et al. 2018). V současné době existují i solární sušárny podobné skleníkům, na jejichž podlaze je rozprostřen fermentační zbytek a automatický vozík substrát na podlaze promíchává, toto využití je však opět prostorově náročné a vhodné spíše pro dosušení separátu (Wilken et al. 2018).

3.10 Zpracování separátu

Separát je tuhá a nerozložená frakce fermentačního zbytku, dle požadovaného dalšího technologického zpracování oddělena příslušným způsobem od kapaného fugátu. (Al Seadi et al. 2013; Dubský & Kaplan 2012). Separát představuje 10–20 % hmotnosti fermentačního zbytku, závisí zde hlavně na vstupním substrátu, který BPS zpracovává. Obecně se dá konstatovat, že nejvyšší výtěžnost separátu je ze zemědělských BPS zpracovávající kukuřičnou siláž a bioodpad. Na druhé straně nejmenší produkce je z průmyslových BPS zpracovávající čistírenské kaly (Al Seadi et al. 2013; Fuchs & Drog 2013). Separát obsahuje vysoké množství fosforu, který je vázán na pevnou frakci (Drog et al. 2015).

Nejjednodušší možnou aplikací surového separátu bez jakýchkoliv dalších úprav je přímá aplikace na půdu. Protože separát obsahuje velké množství amonného dusíku a fosforu, je možné jej použít i jako hnojivo za stejných legislativních podmínek jako aplikace statkového hnoje. Výhodou je však vyšší stupeň biodegradace organického uhlíku (Wilken et al. 2018; Drog et al. 2015). Další možností je využití separátu jako stelivo pod hospodářská zvířata, zde je vhodné separát vysušit, čímž se zbaví vlhkosti a části amonného dusíku.

Nicméně separát obsahuje stále velké množství odbouratelného materiálu, proto je zde riziko pokračování rozkladných procesů a vzniku nepříjemného zápachu (Drog et al. 2015).

3.10.1 Kompostování separátu

V procesu kompostování mikroorganismy zpracovávají organický materiál za aerobních podmínek na kompost, což je stabilizovaná organická hmota obsahující huminové látky. Kompost je ideální organické hnojivo, protože pomalu uvolňuje živiny a prokazatelně zlepšuje půdní vlastnosti. Nicméně separát je často velmi vlhký a již částečně degradovaný, proto je nutné přidat další organický materiál, jako je dřevěná štěpka nebo drcená sláma, aby došlo ke stabilnímu procesu kompostování. Další možností je využití vermikultury žížal.

Obecně kompostování zvyšuje koncentraci živin tím, že se zmenšuje objem kompostovaného materiálu, ale zároveň vede ke ztrátám dusíku (Drosg et al. 2015).

Metoda kompostování může být i využita při zvýšeném obsahu rizikových prvků v separátu, a to jednak zředěním v kompostovaném materiálu díky míchání s dalším kompostovatelným materiálem, kdy je běžné, že se separát míchá s jinou biomasou v poměru 1:2 v kompostárně a výsledný produkt pak již splňuje legislativní požadavky na obsah rizikových prvků v kompostu, což by samotný separát nesplňoval. V případě vysokého obsahu rizikových prvků je možné kompostovat samotný separát pro zmenšení objemu a hmotnosti separátu a jeho následné skládkování jako nebezpečný odpad (Wilken et al. 2018).

Kompostování je technologicky velmi nenáročný a levný proces, jeho účinnost a produkce kvalitního organického hnojiva je bezkonkurenční a je tak nejlepší možnou metodou zpracování separátu. Navíc může znamenat i významný ekonomický přínos pro BPS, kdy je zkompostovaný materiál míchán s rašelinou a pískem spolu s příslušnou úpravou pH za vzniku zahradnického substrátu, který se distribuuje ke konečnému spotřebiteli (CZ Biom 2024; Wilken et al. 2018).

3.10.2 Sušení separátu

Cílem je stabilizovat separát a také snížit jeho objem, a tím zvýšit koncentraci živin. Pokud je BPS vybavena kogenerační jednotkou, lze přebytečné teplo využít k sušení. Na výběr je široké spektrum technologií, jako je pásová sušárna, bubnová sušárna, sušení na fluidním loži, solární sušení a asistované solární sušení (viz. Obr. 8). Nejčastější technologií je pásová sušárna, která má jednoduchou konstrukci a dobrou účinnost včetně vysoké rychlosti sušení. Nevýhodou této technologie je nutnost čištění emisí, protože zde dochází k produkci prachu, těkavého amoniaku a zápachu. K čištění emisí se zpravidla používá prachový filtr a vypírka. Solární sušení může být pouze sezónní anebo může být podpořeno přebytečným teplem z BPS (Drosg et al. 2015; Wilken et al. 2018).



Obrázek 8: Asistované solární sušení separátu

3.11 Konvenční zpracování fugátu

Po separaci fermentačního zbytku kapalná frakce ještě obsahuje značné množství nerozpuštěných látek a živin, jedná se o zvýšené koncentrace amonného dusíku, draslíku a nižších mastných kyselin, obsah nerozpuštěných látek závisí hlavně na substrátu, který BPS zpracovává, ale také na použité technologii separace. Takto získaný fugát nesplňuje legislativní normy pro přímé vypouštění do povrchových vod a to hlavně kvůli vysokému obsahu živin, problematická je i likvidace v čistírnách odpadních vod (Švehla et al. 2020). Část fugátu je často využita k ředění substrátu vstupujícího do anaerobní fermentace v BPS, výhodou je, že obsahuje celé spektrum mikroorganismů nacházejících se v BPS, což zvyšuje stabilitu celého procesu. Recyklovaný fugát by neměl přesáhnout 40 % objemu substrátu, a to kvůli vlivu amoniakálního dusíku, který inhibuje průběh anaerobní fermentace (Bolzonella et al. 2018). Logicky tak vždy vzniká přebytek fugátu, který je nutno upravit a využít. V případě, že je součástí BPS i kompostárna, je možné fugátem zvyšovat vlhkost v kompostu pro optimální průběh kompostování, v tomto případě je již často volena technologie separace fermentačního zbytku tak, aby separát měl dostatečnou vlhkost. Zároveň je nutné snížit koncentraci amoniaku za účelem snížení emisí do ovzduší (Drosg et al. 2015).

Nejčastěji využívaným a technologicky nejjednodušším způsobem je fugát aplikovat přímo na půdu v době, kdy to umožňuje legislativa. Avšak pokud máme vysokou produkci fugátu i v období vegetačního klidu rostlin, nedostatečnou rozlohu pozemků, kde můžeme fugát aplikovat nebo chceme racionalizovat využití živin obsažených ve fugátu, je třeba jej upravit (Bolzonella et al. 2018; Drosg et al. 2015; Svehla et al. 2020).

3.11.1 Stripování amoniaku

Stripování plynu je fyzikálně – chemický proces, přičemž jsou těkavé látky odstraněny z kapaliny proudem plynu. Při zpracování fugátu je cílem odstranit nadbytečný obsah amoniaku. Celý proces je velmi složitý a náročný na energii. Nejprve je nutné odstranit přítomný oxid uhličitý, abychom dosáhli vyššího pH, také celou směs zahřát alespoň na 40 °C pro dostatečnou výtěžnost amoniaku. Proto se jako nejlepší stripovací médium jeví pára, která směs ohřívá, vytlačuje oxid uhličitý a zároveň stripuje amoniak. Tato metoda ovšem dává smysl pouze v případě, že vzniklý amoniak budeme průmyslově využívat, nejčastěji na produkci amonných solí. Ekonomicky se to však nevyplatí, protože amoniak získaný Haber-Boschovou syntézou není znečištěn oxidem uhličitým, je koncentrovanější a jeho výroba je levnější i výkonnější. To dokazuje i nasazení této technologie, kdy se jedná o jednotlivé případy použití, často výzkumného a experimentálního charakteru (Bolzonella et al. 2018; Drosg et al. 2015). Uvedený postup je ale selektivní, tedy umožňuje využít pouze amoniakální dusík a jeho efektivita je navíc omezená. Fugát, který je zbaven základní živiny – dusíku, se ve většině případů stává těžko využitelným a v podstatě odpadním materiálem (Svehla et al. 2021).

3.11.2 Membránové separace

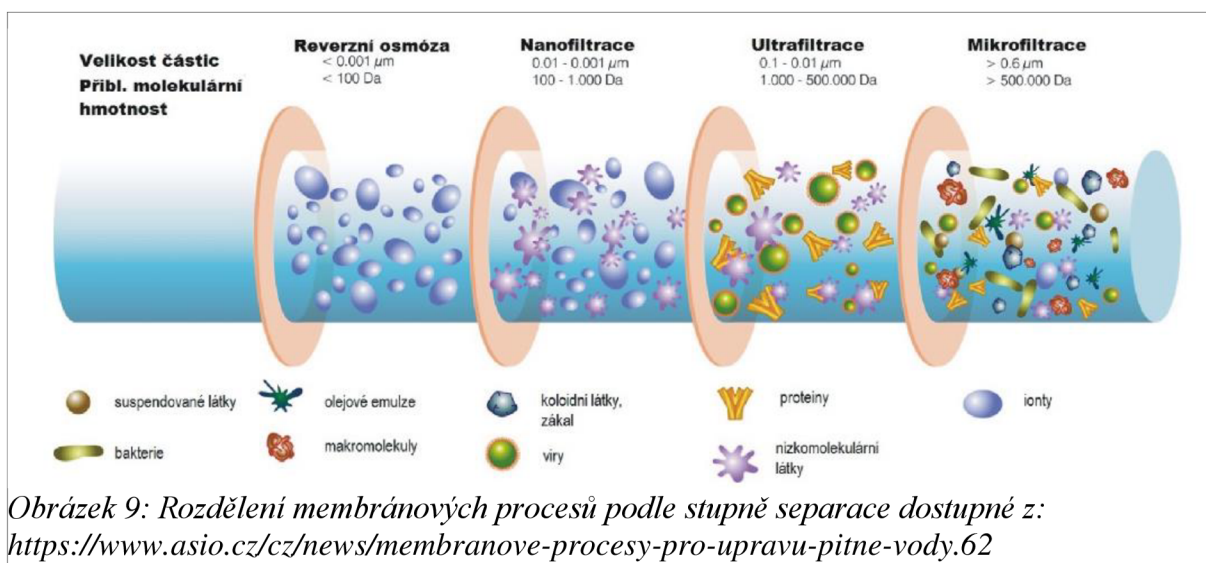
Membránové procesy vedou k zahuštění chemických látek původně obsažených ve fugátu do koncentráту, permeát je relativně čistou vodou, jejíž vlastnosti závisí na použité membráně a na dalších podmínkách procesu (Al Seadi et al., 2013). Membránová separace je fyzikální separace, kdy čištěná kapalina prochází skrz membránu. V závislosti na velikosti pórů membrány a aplikovaném tlaku, dochází k zadržování některých částic v koncentráту. Skrz semipermeabilní membránu, vlivem osmotických sil, prochází pouze částice o určité velikosti a voda. Konečným produktem je koncentrát bohatý na živiny a vyčištěná procesní voda, kterou je možno ředit substrát vstupující do procesu

anaerobní fermentace, vypouštět do čistírny odpadních vod nebo při splnění legislativních parametrů možné vypouštět do recipientu. Membránová separace je komplexní proces skládající se z několika kroků (Al Seadi et al. 2013; Fuchs & Drogg 2013; Drogg et al. 2015).

Nejdůležitější je fugát podrobit důkladnému odstranění pevných látek. Jedná o zásadní krok, kterým dojde k omezení zanášení membránových pórů. Pro omezení zanášení je vhodné zařadit separaci pomocí dekantační odstředivky nebo jemného textilního vakuového filtru s přidáním srážecího činidla, které podpoří odstranění pevných látek ideálně doplněný o separaci flotací nebo flokulací (Al Seadi et al. 2013; Drogg et al. 2015). Dalším krokem je samotná membránová separace. Hustý retentát, který vznikne po membránové separaci, je bohatý na obsah organických látek. Jedná se o částečně rozložený substrát s vysokým obsahem sušiny. Tento retentát se často vrací zpět do reaktoru BPS za účelem snížení jeho množství nebo je možné jej zpracovávat a sušit jako separát (Al Seadi et al. 2013). Permeát, který je výsledným produktem po membránové separaci, může obsahovat velké množství rozpuštěných iontů. Pro získání vyčištěné vody se permeát po mikrofiltraci zavádí do procesu reverzní osmózy, což se děje ve dvou krocích. Během prvního kroku dojde k odstranění většiny solí a rozpuštěných látek, nicméně po tomto kroku permeát stále obsahuje významnou část amonného dusíku, kterou není možné membránou zachytit (Fuchs & Drogg 2013; Drogg et al. 2015).

Nejčastěji se využívá pouze tzv. mikrofiltrace, jedná se o separaci částic do 0,1 μm , to vzhledem k nejnižším investičním i provozním nákladům, ale i vysokému obsahu živin v permeátu. Velmi zajímavou možností je využití takto vzniklého permeátu jako základ roztoku pro hydroponické pěstování rostlin a řas, zvláště převedení živin z fugátu do biomasy zelených řas se zdá být velmi perspektivní (Prajapati et al., 2014; Tale et al., 2014).

Aplikace membránových procesů pro tak heterogenní materiál, jakým je fugát, je stále velice technicky a ekonomicky složitým procesem (Svehla et al. 2021). Pokud by byl proces stabilní a čištění permeátu doplněno o reverzní osmózu, lze konstatovat, že díky němu můžeme veškerou nadbytečnou kapalinu vypouštět do čistírny odpadních vod a veškerou pevnou složku kompostovat. Výhodou je i zpracování, zmenšení objemu a zkoncentrování fugátů s vyšším obsahem rizikových prvků, které nelze aplikovat na půdu jako hnojivo. Energetická spotřeba je ovšem 10 kWh až 30 kWh na 1 m^3 zpracovávaného fugátu a časté zacpávání membránového systému heterogenním fugátem (Al Seadi et al. 2013; Drogg et al. 2015). Toto jsou nejvíce omezující faktory celého procesu, a proto se tato technologie v ČR nevyužívá (agriKomp 2024).



3.11.3 Vakuové odpařování

Tepelné zahušťování fugátu je po energetické stránce velice náročným procesem. Uvážíme-li však, že řada zemědělských bioplynových stanic provozovaných v ČR nenachází dostatečné uplatnění pro teplo produkované kogeneračními jednotkami, stává se variantou vcelku reálnou (Svehla et al. 2021).

Odpařování je možností pouze tam, kde je k dispozici přebytečné teplo z kogenerační jednotky a jeho využití není možné aplikovat výhodněji, např. izolovaná BPS daleko od objektů, které se dají vytápět nebo není dostatečná poptávka po technologickém teple v areálu BPS. Typicky tak můžeme definovat izolované BPS s velkým instalovaným výkonem. Významnou motivací k zařazení odpařování do technologie BPS může být poskytování dotací, což je příklad hlavně Německa (Drosg et al. 2015).

Nejčastěji se využívají výparníky s nuceným oběhem, alternativně také výparníky s přirozenou recirkulací. U výparníků s nuceným oběhem se používá oběhové čerpadlo, které čerpá fugát skrz tepelné výměníky, zatímco přirozené cirkulační výparníky využívají k cirkulaci stoupající páru.

Vysoký obsah amonného dusíku v destilátu je nežádoucí z pohledu dalšího využití tohoto produktu. Zároveň je převedením amoniaku do destilátu o živiny ochuzen tepelně zahuštěný fugát, jehož hodnota jako komplexního hnojiva je tím významně snížena. Intenzita přestupu amoniakálního dusíku do destilátu může být efektivně snížena okyselením fugátu přidávkou minerálních kyselin. To však významně prodražuje proces zpracování fugátu a zároveň v konečném důsledku může po aplikaci fugátu v rostlinné výrobě podporovat okyselení půdy (Drosg et al. 2015; Svehla et al. 2021).

Pro zabránění destilace amoniaku se na začátku procesu dává kyselina sírová ke snížení pH na hodnotu 4,5, tím se veškerý amoniak převede na amonný iont (NH_4^+) díky tomu dusík zůstane v koncentrátu po odpaření ve stabilní a využitelné formě. Po okyselení se fugát zahustí na tři stupňové vakuové odparce. Díky nízkému tlaku vakua lze pro ohřev použít i lehkou páru nebo horkou vodu. Pokud je proces nastaven správně, je možné snížit objem fugátu o více jak 50 %. Spotřeba energie se pohybuje kolem $300\text{--}350 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$, proto není možné tuto metodu využít v případě nedostatku odpadního tepla z BPS. Hlavní výhodou je získání relativně čisté vody, která pokud splňuje legislativní podmínky, smí být vypuštěna do povrchových vod. A druhým produktem je koncentrovaný fugát, který lze dále upravovat, sušit, část recyklovat zpět do anaerobní fermentace nebo používat jako hnojivo na zemědělskou půdu, zde se ale musí dávkovat granulovaný vápenec pro stabilizaci pH (Al Seadi et al. 2013; Drosg et al. 2015; Javor et al. 2023).

3.11.4 Ostatní konvenční úpravy fugátu

Známé jsou fyzikálně-chemické metody vedoucí k získání amonného dusíku, popřípadě k současnému získávání amonného dusíku a fosforu – například **srážení struvitu, iontová výměna** v iontoměničích či **sorpce na biochar či jiné materiály** (Drosg et al. 2015; Monfet et al. 2018, Münch et Barr, 2001; Song et al., 2011; Guštin et Marinšek-Logar, 2011)

Všechny uvedené postupy jsou ale více či méně selektivní, tedy umožňují využít pouze vybrané živiny a jejich efektivita je navíc zpravidla omezená. Fugát, který je zbaven základních živin, se ve většině případů stává těžko využitelným a v podstatě odpadním materiálem. Nezbyvá pak často jiné řešení, než ho přímo v areálu bioplynové stanice nebo v objektu dostupné čistírny odpadních vod zpracovávat jako odpadní vodu. Čištění takové odpadní vody je přitom velice problematické, neboť obsahuje velké množství špatně sedimentujících nerozpuštěných látek. Extrémně vysoké bývají hodnoty chemické spotřeby kyslíku (CHSK) při poměrně nízké hodnotě biochemické spotřeby kyslíku (BSK). To je způsobeno tím, že velká část organických látek obsažených ve fugátu je inertní vůči

biologickému rozkladu. Poměrně vysoký může být i zbytkový obsah sloučenin dusíku a fosforu. Za těchto podmínek zůstává velká část cenných látek obsažených původně v surovém fugátu nevyužita (Švehla et al. 2021).

3.12 Racionální přístupy k úpravě fugátu

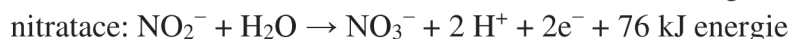
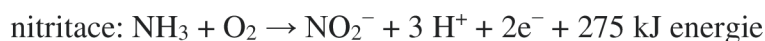
V současné době se fugát produkovaný na bioplynových stanicích obvykle poměrně dlouhodobě skladuje v lagunách umístěných v areálu a následně se aplikuje do půdy, kde slouží jako zdroj živin pro rostliny ve vegetačním období. Fugát však obsahuje velké množství balastní vody. Legislativa zároveň omezuje množství dusíku, které lze aplikovat do půdy ve státech EU (Evropská komise, 1991). Tato skutečnost snižuje možnost využití fugátu přímo. Ekonomické přínosy surového fugátu proto mohou být sníženy o náklady na dopravu z bioplynové stanice na pole. Současný přístup k nakládání s fugátem zároveň způsobuje intenzivní emise amoniaku během skladování a aplikace. Tyto ztráty dusíku mohou být významné nejen z hlediska ochrany životního prostředí, ale také kvůli poklesu množství živin dodávaných rostlinám. Z výše uvedených důvodů je v některých případech nutné upravit fugát s cílem získat živiny v koncentrované formě, přispět k ochraně životního prostředí nebo minimalizovat ztráty dusíku (Švehla et al. 2017)

Racionální úpravy fugátu vedou hlavně ke stabilizaci těkavého amoniakálního dusíku ve směsi tak, aby byl co nejlépe využitelný pro rostliny, a přitom jednoduchý na aplikaci, v ideálních případech je pak možné takto upravený fugát skladovat v otevřených nádržích bez rizika znehodnocení. Takto představené úpravy vedou k nižší spotřebě energie a produkci vysoce hodnotného produktu. Alternativním postupem pro předúpravu fugátu před jeho tepelným zahuštěním je převedení amoniakálního dusíku na oxidované formy (NO_3^- , popřípadě NO_2^-) s využitím činnosti nitrifikačních organismů (Švehla et al., 2017; Švehla et al., 2021; Švehla et al. 2022).

3.12.1 Biologická nitrifikace fugátu

Proces biologické nitrifikace následovaný denitrifikací je nejpoužívanější metodou k odstraňování dusíku z odpadních vod. Je možné jej aplikovat i na čištění tekutých hnojiv či fermentačního zbytku. Jedná se o aerobní proces, kde dochází k přeměně amoniakálního dusíku na dusičnanový dusík (N-NO_3^-). Tato forma je stabilnější v půdě a je vysoce významným zdrojem dusíku pro rostliny. Během procesu denitrifikace dochází k přeměně chemicky vázaného dusíku na plyn N_2 . Jsou však snahy o maximální recyklaci a opětovné využití živin z fugátu, proto je nutné udržet aerobní prostředí, aby denitrifikace, pro kterou jsou zapotřebí anoxické podmínky, neprobíhala. Nitrifikace je biochemický proces, během kterého dochází k oxidaci amoniakálního dusíku na NO_2^- , tato fáze se nazývá nitritace, takto vzniklé nitrity se následně oxidují v procesu nitratace na NO_3^- tedy na nitráty (Botheju et al. 2010; Švehla et al. 2017). Akceptorem elektronu v obou uvedených reakcích je molekulární kyslík (O_2) (Botheju et al. 2010).

Souhrnné rovnice nitrifikace jsou následující:



Nitrifikace je důležitým krokem koloběhu dusíku a jsou v něm zapojeny mnohé půdní bakterie (zejména beta a gama proteobakterie) a archea. Z proteobakterií jsou známy nitrifikační bakterie z rodů *Nitrosomonas* a *Nitrosococcus*, dále však evolučně jedinečná bakterie *Nitrospira* a *Nitrosocystis*. Při této enzymatické oxidaci se uvolňuje energie, kterou bakterie využívají. Tento proces vytváří vodíkové kationty, které okyselují substrát

(Purkhold et al. 2000; Treusch et al. 2005; Švehla et al. 2017). Tyto bakterie patří mezi aerobní autotrofní mikroorganismy (Botheju et al. 2010).

Denitrifikace je proces probíhající v tělech organismů, kde slouží jako zdroj energie. Dusitany a dusičnany se při ní stávají terminálními akceptory elektronů a dusík se tak redukuje na atomární formu (N_2). Denitrifikace jsou schopny bakterie zejména pseudomonády jako *Pseudomonas stutzeri*, *Pseudomonas aeruginosa*, ale i *Paracoccus denitrificans*, *Ralstonia eutropha*, *Rhodobacter sphaeroides*, dále pak mnohá halofilní a hypertermofilní archea a dokonce některé houby (Botheju et al. 2010; Zumft et al. 1997). Proto pokud pracujeme v čistě aerobním prostředí lze fázi denitrifikace eliminovat.

Ve fugátu je obsaženo velké množství amoniakálního dusíku, který je spojen s rozkladem dusíkatých organických látek během procesu anaerobní fermentace ve fermentoru BPS (Makádi et al. 2012; Al Seadi et al. 2013; Nkoa 2014). Poměr NH_3 a NH_4^+ je vysoce závislý na pH a teplotě. Neošetřený fermentační zbytek má hodnotu pH spíše slabě zásaditou okolo 7,5 – 8,5, při těchto hodnotách převládá forma NH_4^+ (Botheju et al. 2010). Je zde vysoké riziko emisí amoniaku během skladování fermentačního zbytku nebo po aplikaci na půdu (Botheju et al. 2010; Švehla et al. 2017). Díky produkci H^+ iontů, které zároveň okyselují substrát, se snižuje pH, a tím roste obsah NH_4^+ a klesá obsah amoniaku NH_3 , který je více těkavý, a navíc i toxický pro mikroorganismy podílející se na procesu nitrifikace. Proces nitrifikace tak napomáhá k omezení emisí NH_3 během skladování a během aplikace fugátu (Botheju et al. 2010).

Cílem procesu je tedy převést většinu amoniakálního dusíku na dusík dusičnanový díky optimálně nastaveným podmínkám, kterými jsou:

Teplota má podstatný vliv, jelikož nitrifikační bakterie jsou velmi citlivé na změnu teplot. Ideální teplotou pro nitrifikaci je rozmezí **28–32 °C**. Při nižších teplotách nitrifikace probíhá velmi pomalu (Švehla et al. 2010). Takovýto teplot je možné zajistit v izolovaném bioreaktoru s vyhříváními stěnami, podobně jako je tomu u anaerobního fermentoru, vyhřívání lze provádět pomocí odpadního tepla z kogenerační jednotky. V praxi si lze představit, že je použita voda, která ohřívá anaerobní reaktor, poté co předá své teplo je použita k ohřevu bioreaktoru nitrifikace, takto je možné optimalizovat množství technologické vody, zkrátit délku potrubí, redukovat počet výměníků a snížit servisní náklady. Pro tento proces je však potřeba dalšího výzkumu.

Kyslík je vysoce důležitý, protože v nitrifikaci je akceptorem elektronu, a proto je důležité zajistit optimální koncentraci kyslíku v bioreaktoru. V otázce ideální koncentrace kyslíku není mezi mnohými autory shoda, zřejmě proto, že zde vycházíme ze zkušeností z biologického čištění odpadních vod a fugát je specifickým substrátem. Avšak lze konstatovat, že by koncentrace kyslíku neměla klesnout pod 1 mg/l, při nižších koncentracích dochází k masivní akumulaci dusitanů. Za ideální můžeme považovat hodnoty kolem 3 mg/l (Gerardi 2002; Švehla et al. 2010; Švehla et al. 2017). Zde je nutné dostatečně dimenzovat vzduchotechniku, včetně záloh. Výhodou je, že tato technologie je velmi známá z čištění odpadních vod a také, že aeraci zároveň fugát v bioreaktoru efektivně mícháme.

Anorganický dusík se ve fugátu nachází hlavně v amonné formě. Extrémně vysoká koncentrace amoniakálního dusíku ve fugátu a případně volná kyselina dusitá, resp. $N-NO_2^-$ inhibuje nitrifikaci (Anthonisen et al. 1976), a tím významně komplikuje start tradiční nitrifikace s dusičnany jako dominantním finálním produktem v prostředí fugátu. Volná kyselina dusitá se zdá být zvláště silným inhibitorem aktivity nitritačních bakterií, kde i 0,011 mg.l⁻¹ HNO_2 odpovídající 0,037 mg.l⁻¹ amoniakálnímu dusíku může inhibovat anabolické procesy nitritačních bakterií. Na druhou stranu i disociovaný NO_2^- byl prezentován jako inhibitor nitritačních bakterií vyvolávající 50% inhibici při koncentraci 198 mg/l NO_2^- (Budaj et al., 1999). Kvůli riziku inhibice nastává nutnost naředit fugát vstupující do nitrifikačního reaktoru na úroveň 800 mg.l⁻¹. Navíc byla těmito autory

pozorována akumulace dusitanů i přes výše uvedené ředění. Avšak výzkumná skupina vedená Ing. Pavlem Švehlou Ph.D. byla schopná nitrifikovat roztoky i s koncentrací amoniakálního dusíku až **3000 mg.l⁻¹**. Botheju a kol. (2010) však dosáhli masivní produkce dusičnanů bez výrazné akumulace dusitanů při nitrifikaci fugátu uvádí i Švehla (2017).

Hodnota pH je velmi důležitá protože, pokud klesne pod pH 6 může se celý proces nitrifikace zastavit. Zároveň se však uvádí, že při této hodnotě pH by ve směsi nebyl žádný oxidovatelný amonný dusík, proto jí biologickými procesy nedosáhneme. V praxi bychom se měli snažit držet hodnotu pH na neutrální úrovni kolem **6,8 – 7,3** (Purkhold et al. 2000; Treusch et al. 2005).

Doba zdržení reakční směsi v bioreaktoru se podle různých autorů řádově liší, vždy totiž záleží, jaké má zpracováváný fugát parametry před nitrifikací, pokud budeme uvažovat výše zmíněné podmínky za ideální v kontinuálním reaktoru dosáhneme doby zdržení kolem **15–21 dní** (Botheju et al. 2010; Švehla et al. 2010; Švehla et al. 2017).

Velmi zajímavým a perspektivním parametrem po procesu nitrifikace bylo snížení obsahu aktivních forem rizikových prvků, napomáhá tomu vyšší obsah síry, která se v kombinaci s nízkým pH oxiduje na sírany. Následnou reakcí, například s olovem a chromem, vznikají nerozpustné formy síranu olovnatého (PbSO₄) a síranu chromitého (Cr₂(SO₄)₃). Přítomnost těchto těžkých komplexů zvyšuje hmotnost a upravuje strukturu kalu, čímž jsou podpořeny jeho sedimentační vlastnosti. Zvýšená sedimentace usnadňuje unášení koloidních částic s rizikovými prvky a jejich odstranění například flotací. Nitrifikace tak přispívá ke zvyšování kvality fermentačního zbytku (Botheju et al. 2010).

Tato technologie je velmi perspektivní alternativou ke konvenčním způsobům zpracování fugátu hlavně kvůli zachování a lepší biologické dostupnosti živin, levnému a efektivnímu zpracování, snížení ztrát dusíku při tepelném zahušťování a skladování, případně i převedení rizikových prvků na nerozpustné sírany. Zároveň otevírá možnosti využití fugátu ke komerčnímu prodeji jako stabilního hnojiva, což může významně zlepšit ekonomickou bilanci BPS, které nemohou aplikovat fugát zpět na zemědělskou půdu, ale musí jej přenechávat jinému agropodniku. Nevýhodou je poměrně dlouhá doba zdržení, kdy je nutné konstruovat velké bioreaktory v závislosti na velikosti BPS. Dále je zde možnost denitrifikace nitrátového dusíku na N₂O a N₂ denitrifikačními bakteriemi v případě delšího skladování. Ekonomická bilance bude silně záviset na místních podmínkách, cenách dusíkatých hnojiv a případných emisních limitech pro amoniak vypouštěný do ovzduší, jejichž zavedení se intenzivně diskutuje (Botheju et al. 2010, Švehla et al. 2010; Švehla et al. 2017; Švehla et al. 2022).

3.13 Využití fermentačního zbytku v praxi

Legislativně (vyhláška č. 474/2000 Sb.) je fermentační zbytek definován takto: fermentační zbytek je typové organické hnojivo (typ 18.1.e), které je vyrobené výhradně ze statkových hnojiv a objemných krmiv anaerobní fermentací. Netyповé fermentační zbytky jsou ty, při jejichž výrobě byly použity jiné vstupní suroviny, zejména bioodpady (Tlustoš et al. 2014).

Stejně jako v případě jiných hnojiv je ve zranitelných oblastech nutné respektovat legislativní omezení. Dle vyhlášky Ministerstva zemědělství č. 235/2016 Sb. nelze fermentačním zbytkem hnojit dle klimatického regionu, sklonitosti a pěstované plodiny v rozmezí od 5. 11. do 28. 2., a dále je tímto předpisem omezováno jeho použití na orné půdě v období po sklizni hlavní plodiny a na trvalých travních porostech se zamokřenými a mělkými půdami nebo půdami s nevyvinutým půdním profilem (Jančíková et. al 2020).

Povinnost výrobců registrovat nebo ohlašovat fermentační zbytek řeší zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech s navazující vyhláškou č.474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva.

Před aplikací fermentačního zbytku na pozemek mohou nastat čtyři situace popsané v tabulce, určující nakládání s fermentačním zbytkem z pohledu legislativy, a to podle toho, zda se jedná o tzv. typový či netypový fermentační zbytek a zda je uváděn do oběhu (prodej či převod mezi dvěma subjekty) či je aplikován na vlastní pozemky (Jančíková et al. 2020).

Tabulka 1: Varianty uvádění fermentačního zbytku do oběhu

Výstup z bioplynové stanice	Fermentační zbytek určený na vlastní pozemky	Fermentační zbytek určený k prodeji jinému subjektu
Typový fermentační zbytek	Není nutné ohlášení ani registrace	Ohlášení
Netypový fermentační zbytek s vedlejšími živočišnými produkty	Registrace	Registrace
Netypový fermentační zbytek bez vedlejších živočišných produktů	Není nutná registrace	Registrace

K registraci je nutné předložit vyplněnou žádost, návrh příbalového letáku, vzorek pro analýzu, případně rozbor vzorku z akreditované laboratoře, který není starší než 6 měsíců, platný provozní řád zařízení z příslušného krajského úřadu, a v případě použití vedlejších živočišných produktů je nutné schválení příslušnou pobočkou Krajské veterinární správy. V případě použití aerobně stabilizovaných kalů z ČOV je potřeba doložit mikrobiologický rozbor ne starší než 6 měsíců, toto se týká hlavně průmyslových BPS.

Ohlášení fermentačního zbytku je možné pouze za podmínky, že lze druh fermentačního zbytku zařadit ve smyslu vyhlášky č. 474/2000 Sb., jako tzv. typové hnojivo. Vyhláška definuje tři základní typy fermentačního zbytku a to digestát = fermentační zbytek, separát a fugát. Posuzovanými parametry jsou hodnota sušiny, obsah celkového dusíku ve vzorku a vstupní suroviny (výhradně krmiva a statková hnojiva). K ohlášení hnojiva je nutné předložit vyplněnou žádost a návrh příbalového letáku. Vzorek či rozbor hnojiva není u režimu ohlášení vyžadován. Ohlášení hnojiv je pro žadatele bezplatné. Jakostní parametry a množství rizikových prvků ve fermentačním zbytku jsou ověřovány následně v rámci úředních kontrol odborného dozoru ÚKZÚZ (Jančíková et al. 2020).

V roce 2023 bylo v ČR provozováno více než 480 zemědělských BPS a produkce fermentačního zbytku v nich byla stanovena na více než 8,5 milionů tun výpočet dle Kusá et al. 2019; statistika dle CzBA 2024.

V zemědělské praxi je fermentační zbytek aplikován v různých obdobích roku.

- První polovina dubna – aplikace na pozemky určené pro výsev kukuřice.
- Konec května až červen – přihnojení mezi řádky porostu (u kukuřice kolem fáze 6. listu).
- Konec července a srpen – aplikace na sklizené pozemky po obilninách (na slámu) před podmínkou či orbou, před výsevem řepky nebo meziplodiny.
- Říjen (až polovina listopadu) - aplikace na pozemky po sklizni kukuřice apod.
- Nejvyšší dávky hnojení jsou aplikovány před výsevem jařin a po podzimní sklizni – tyto termíny využívají všechny sledované zemědělské podniky (Kusá et al. 2019).

Pro určování potřeby množství fermentačního zbytku se potom vychází z potřeby živin porostu pro předpokládaný výnos a kvalitu produkce dále z množství přístupných živin v půdě a stanovištních podmínek, a to zejména vlivu klimatu, půdního druhu a typu. Důležitá

je půdní reakce (pH), poměr důležitých kationtů hlavně vápníku, hořčíku a draslíku a množství půdní organické hmoty (humusu) a v neposlední řadě z pěstitelských podmínek ovlivňujících přístupnost živin například: předplodina, zpracování půdy, závlahy (Jeřábková 2019).

3.13.1 Vliv fermentačního zbytku na půdní organickou hmotu

Při aplikaci se dostává do půdy přibližně 3–6 % organických látek v případě fugátu a až 19 % v případě separátu. Obsah organických látek koresponduje s obsahem sušiny. Toto množství je srovnatelné s obsahem organických látek v kejdě a hnoji. Ve fermentačním zbytku jsou však tyto látky více stabilizované a mineralizované. Těkavé mastné kyseliny, hemicelulóza a celulóza jsou z více než 50 % rozloženy během anaerobní fermentace, zatímco lignin není rozložen vůbec.

Mnohé studie přesto neshledávají výrazné nebo dokonce žádné rozdíly mezi aplikací fermentačního zbytku z kejdy a samotnou kejdou, co se týče obsahu organického uhlíku, ale i celkového dusíku. Zdá se tedy, že úbytek uhlíku, ke kterému dochází během anaerobní fermentace, je kompenzován nižší intenzitou degradací uhlíku v půdě po aplikaci fermentačního zbytku ve srovnání s kejdou. Vliv fermentačního zbytku na půdní organickou hmotu je tak z dlouhodobého hlediska pravděpodobně zanedbatelný. Některé studie dokonce neshledávají rozdíl v dynamice půdní organické hmoty po aplikaci fermentačního zbytku na půdu, ani co se týče vlivu složení vstupního substrátu, když akumulace organického uhlíku v půdě po aplikaci fermentačního zbytku ze senáže, byla stejná jako po aplikaci fermentačního zbytku ze siláže.

Akumulace uhlíku v půdě může být významně ovlivněna změnami v osevních postupech a výměrách plodin, tj. pěstováním nových energetických plodin, změněnými termíny sklizně a využitím meziplodin a posklizňových zbytků jako vstupních surovin do fermentoru (Jeřábková 2019).

Používání fermentačního zbytku ke hnojení znamená pro zemědělce finanční úsporu z hlediska náhrady minerálních hnojiv, a to zejména dusíku. Obsah snadno rozložitelného uhlíku je sice redukován, ale fermentační zbytek obsahuje žádoucí prekursorů huminových látek. Aplikace fermentačního zbytku má výrazně pozitivní vliv na úrodnost půdy a je jedním z důvodů, proč budování BPS posiluje udržitelnost zemědělství a venkova (Marada et al. 2008)

3.13.2 Změny fyzikálních vlastností půdy po aplikaci fermentačního zbytku.

Přesto, že většina studií prezentuje velmi pozitivní výsledky při aplikaci fermentačních zbytků na zemědělskou půdu a to hlavně: obohacení o důležité živiny především dusíkem, fosforem a draslíkem, pozitivní vliv na půdní život a zvyšování obsahu organických látek do půdního profilu. Existují i studie, které tato tvrzení vyvrací a staví fermentační zbytek na úroveň minerálních, resp. mineralizovaných hnojiv, které půdu nijak neobohatí o organické látky. Pro definici racionalizace výstavby a provozu BPS, je nutné prezentovat i tento názor:

Podle zákona je fermentační zbytek definován jako typové organické hnojivo. Není to ale úplná pravda. V procesu anaerobní fermentace se odbourávají labilní organické látky z 50 i více %, čímž rovněž klesá sušina, která se zpravidla pohybuje mezi 2 a 8 %.

O zušlechtnění organického materiálu anaerobní fermentací nelze hovořit. Spíše fugát lze pokládat za hnojivo nežli separát. Bereme-li je jako hnojivo v obecném pojetí, nelze snad protestovat, protože kromě mírně vyššího obsahu minerálních, rostlinám přístupných živin (převážně dusíku) mají vyšší iontovýměnnou kapacitu a vyšší pufrací kapacitu než materiál před anaerobní fermentací, tento přírůstek je však prakticky málo významný.

Nelze srovnávat fugát či fermentační zbytek s kejdou skotu pouze podle obsahu dusíku. Kejda skotu má sice pouze 0,4 % dusíku v kapalném stavu, pro fermentační zbytek vyhláška č. 474/2000 Sb. vyžaduje minimálně 0,6 % dusíku, ale to je dusík celkový. Na rozdíl od fermentačního zbytku, který má dusík hlavně amoniakální, má kejda 50–60 % tohoto dusíku v organické formě, tedy rostlinám přístupné, ostatní je sice minerální, ale na rozdíl od fermentačního zbytku snadno hydrolyzovatelný dusík, který brzy přechází na dusík minerální (Kolář et al. 2010).

Autoři, kteří se zabývali fermentačním zbytkem jako hnojivem, zdůraznili, že aby mohla probíhat mineralizace a humifikace, je nutné podpořit rozvoj mikroorganismů snadno rozložitelnou organickou hmotou. Proto je nutné k fermentačnímu zbytku dodávat organickou hmotu, jako je kompost nebo sláma pro nastartování mikrobiální aktivity (Badalíková et al. 2018).

Další otázkou jsou změny fyzikálních vlastností půdy, které mohou nastat až po delší době. Uvádí se např., že může docházet k nežádoucí peptizaci půdních koloidů apod. (Badalíková et al. 2018).

Ve výzkumu trvácím 2014–2016 bylo zjištěno, že aplikace fermentačního zbytku na půdu mění její vlastnosti. Porovnány byly tři pozemky, kdy první byl referenční bez jakéhokoliv hnojení, druhý hnojen jednou dávkou fermentačního zbytku z vlastní zemědělské BPS 20 t na jaře a třetí tím samým fermentačním zbytkem dvěma dávkami po 20 t. K modelaci extrémnějších podmínek, byl volen následující osevní postup: rok 2014 kukuřice na siláž, 2015 pšenice ozimá, 2016 pšenice ozimá, a to s důrazem na odstranění veškeré nadzemní vyprodukované organické hmoty. Sledovanými parametry byly: objemová hmotnost redukována, stálost půdních agregátů a struktura půdních agregátů (Badalíková et al. 2018).

Výsledky ukazují, že dvojnásobná aplikace fermentačního zbytku má vliv na zvýšení objemové hmotnosti redukovévané. Tomu odpovídají i výsledky penetrometrického odporu půdy. Čím větší dávka fermentačního zbytku, tím docházelo k vyššímu utužení půdy. S penetrometrickým odporem půdy a objemovou hmotností redukovévanou souvisí struktura půdy, která je v přímé korelaci s těmito vlastnostmi půdy. Čím více se zvýšila objemová hmotnost redukovévaná a penetrometrický odpor půdy, tím více docházelo ke zhoršování půdní struktury. Půdní struktura se vyvíjela postupně k lepšímu u varianty bez aplikace fermentačního zbytku. Trend zhoršování půdní struktury se během let zvyšoval u variant s fermentačním zbytkem.

Další výsledky ukazují vývoj vodostálosti půdních agregátů při aplikaci fermentačního zbytku. Vodostálost půdních agregátů odpovídala trendu půdní struktury a penetrometrickému měření. Zatímco v roce 2014 byla vodostálost půdních agregátů vyrovnaná, v roce 2016 již byly zjištěny výrazné rozdíly mezi variantou kontrolní a variantou 2× hnojenou fermentačním zbytkem. Vlhkost půdy byla ovlivněna nejen variantami, ale i klimatickými podmínkami v daném roce. Pro stanovení půdní vláhly v hmotnostních % byly odebrány sypané vzorky půdy pro doplnění vztahu k utužení půdy. Pouze v roce 2016 byla půdní vlhkost vyšší u variant s fermentačním zbytkem, pravděpodobně díky vyšší schopnosti zadržení vody aplikovaného separátu při vyšší srážkové činnosti v tomto období. V ostatních letech tomu bylo naopak (Badalíková et al. 2018).

Fermentační zbytek není hnojivo organické, protože proces anaerobní fermentace zanechal v surovině jen stabilní organické látky. Znakem organického hnojiva je schopnost rychlé mineralizace, aby hnojivo mohlo poskytnout energii půdním mikroorganismům. Je to jen slabé hnojivo minerální, protože obsahuje jen málo minerálních živin (dusík a draslík) a to v přebytku vody. Praxe je mystifikována údaji o obsahu dusíku v sušině a považuje tento údaj za obsah v reálném fermentačním zbytku. V separátu je organický dusík, rostlinám nepřístupný. Jestliže se separát v půdě hydrolyzuje

velmi pomalu, může i tento dusík mineralizovat jen pomalu a v zimě se zpravidla vyplaví. Ve fugátu je sice dusík minerální a rostlinám přístupný. V sušině fugátu ho může být až 10 %. Ale obsah sušiny fugátu je jen 1–3 %, tj. obsah dusíku v kapalném fugátu je jen 0,15 – 0,30 % (Kolář et al. 2010).

Z výše uvedených studií je patrné, že hnojení pouze fermentačním zbytkem nepřispívá ke zlepšení půdních vlastností, proto by mělo být hnojeno také chlévským hnojem, kejdou, kompostem a dalšími hnojivy s obsahem organické hmoty. Také je možné ponechat větší množství posklizňových zbytků k obohacení půdy o organické látky.

Při zvýšení cen dusíku hnojiv v letech 2007–2008 o 100–125 % a současné průměrné ceně 1 kg N = 40 Kč je hodnota 1 l fugátu jen 0,06 Kč. Abychom pohnoujili půdu dávkou 200 kg N.ha⁻¹, museli bychom na 1 ha aplikovat 100 m³ fugátu, tj. při cisterně obsahu 10 m³ bychom jeli na 1 ha 10×. To při cenách paliv bylo velmi neekonomické, nehledě na uhlíkovou stopu, z tohoto důvodu je nutné fugát koncentrovat a zpracovávat (Kolář et al. 2010).
Poznámka autora práce: v roce 2024 je cena za 1 kg dusíku kolem 70 Kč, hodnota 1 l fugátu tak vychází na 0,11 Kč.

3.14 Výstavba a provozování bioplynových stanic

Dle výše popsaných skutečností můžeme celkem jasně definovat, jaké postupy vedou k racionalizaci výstavby a provozu BPS a zároveň případy, kdy výstavba BPS není tak výhodná, a to jak z hlediska účinnosti, ekologie nebo očekávané ekonomické návratnosti. BPS jsou rozděleny dle platné legislativy, avšak tato problematika je mnohem složitější. Dle informací CZ Biom nejsou přesně definovatelné rozdíly mezi jednotlivými typy BPS, jednoduše proto, že nyní BPS zpracovává takový substrát, který je pro ni v dané lokalitě dostupný nebo finančně výhodný. Setkáváme se tedy s průmyslovými BPS, které při nedostatku hlavního zdroje substrátu, stabilizaci anaerobní fermentace nebo z technologických důvodů zpracovávají například kukuřičnou siláž, která je typická pro zemědělské BPS. Nebo také komunální BPS, která vznikla z bývalých zemědělských BPS, a tak zpracovávají jak energetické plodiny, tak bioodpady. Další skupinou jsou BPS zařazené v areálech ČOV zpracovávající čistírenský kal bioodpady a proces stabilizují senáží z údržby zeleně. Ani v zákoně není jasně definováno, co může a nemůže daný typ BPS přijímat, jsou však nastaveny legislativní podmínky pro příjem daného substrátu, např.: hygienizace apod. (Nařízení Rady EU č. 1774/2002 ES) Důležité tedy je, který substrát tvoří majoritní většinu v průběhu roku (Interní informace CzBA, MŽP ČR, částka 2/2014).

3.14.1 Průmyslové BPS

Průmyslové BPS často zpracovávají rizikové vstupy, jako jsou kaly z ČOV, krev z jatek, výpalky z výroby lihu apod. Proto jsou nepostradatelnou součástí velkých ČOV a výrobních s velkou produkcí odpadní biomasy. U jejich provozu je kladen důraz hlavně na hygienizaci zpracovávaného substrátu a stabilitu fermentačního zbytku. Produkovaný bioplyn je nejčastěji spalován a využit pro pokrytí vnitřních potřeb elektrické energie a tepla s možností občasných přetoků do distribuční sítě. Čistírenské BPS také zpracují většinu odpadního tepla (Molek 2015; Bačík 2008).

Produkovaný fermentační zbytek často musí být upravován nebo skládkován, pro svůj obsah rizikových prvků, zde se uplatní technologie separace a úprav fermentačního zbytku za současného zachování ekonomické udržitelnosti. Za předpokladu, že substrát neobsahuje rizikové prvky, je fermentační zbytek nejčastěji dle legislativních norem registrován a prodáván jako hnojivo agropodniku, který jej aplikuje na půdu (vyhláška č. 474/2000 Sb). Ve většině případů průmyslové BPS nedisponují ornou půdou, na které by bylo možné

fermentační zbytek využít. Výstavba takovýchto průmyslových BPS je definována potřebou zpracovat příslušný substrát. Není ekologicky ani ekonomicky efektivní stavět BPS ve větší vzdálenosti od zdroje substrátu. Negativa přepravy materiálu na BPS by převýšila pozitivní dopady provozu BPS. Proto tyto BPS často bývají i součástí areálu daných producentů zpracovávaného substrátu např. ČOV. Protože však tyto BPS často bývají blízko městských aglomerací, nabízí se tu možnost svozu biomasy z blízkého okolí anebo doplnění substrátu o gastroodpad. Tím můžeme racionalizovat provoz BPS, vylepšit kvalitativní vlastnosti vstupního substrátu a jeho množství, a tím zvýšit produkci bioplynu. Tento způsob zpracování substrátu je spíše typický pro komunální BPS. Dále je třeba se zaměřit na technologii těchto BPS, ta by měla být co nejučelnější. Separční technologii je třeba volit tak, abychom případné produkty mohli efektivně využít. Případně můžeme separovat většinu rizikových prvků po vysrážení (Bačík 2008; Nařízení Rady EU č. 1774/2002 ES; vyhláška č. 474/2000 Sb.; Vítěz et al., 2013; Věstník MŽP ČR, částka 2/2014). Přímou se tu nabízí využití stabilizace dusíku ve fugátu metodou biologické nitrifikace pro snížení aktivních forem rizikových prvků, odpaření a zmenšení objemu fugátu a jeho následná aplikace na zemědělskou půdu (Švehla et al. 2021). Investice do modernizace průmyslových BPS jsou často nižší než u ostatních druhů BPS a to proto, že hlavním účelem je stabilizace vstupních produktů nikoliv maximalizace produkce bioplynu, proto je v praxi technologie často zastaralá a plně nevyužívá potenciál BPS (Bačík 2008; Vítěz et al., 2013)

3.14.2 Komunální BPS

Komunální BPS zpracovávají hlavně biologicky rozložitelný komunální odpad (BRKO), biologicky rozložitelný odpad z kuchyní a stravoven a jedlé tuky a oleje, což je velmi heterogenní substrát, využívání takového zdroje musí být podřízeno umístění a konstrukce BPS (Věstník MŽP ČR, částka 2/2014). BPS využívající BRKO mají téměř neomezený zdroj substrátu, protože dle výpočtů Dvořáček et al. (2009) podle dat POH (plánu odpadového hospodářství ČR) tvoří bioodpady až 41 % komunálního odpadu, který je aktuálně skládkován. Toto by byl zřejmě největší přínos komunálních BPS, a to energetické využití odpadu a v některých případech jeho přepracování na hnojivo. Obecně se dá říci, že komunální BPS mají velké množství zdrojů biomasy ve vegetačním období a málo mimo něj, protože se však skladování této biomasy jeví jako neefektivní, často bývá komunální BPS úzce spojena s kompostárnou, ta zpracuje přebytečnou biomasu, jedná se hlavně o odpad z údržby zeleně. Zde je nutné investovat do separace nežádoucích příměsí, které mohou být součástí substrátu, a to hlavně plasty, kovy, kusy dřeva a kořenů a další nerozložitelný materiál. Pokud BPS využívá odpad z jídelen a živočišné produkty, je nutné substrát hygienizovat, a to zahřevem na 70 °C alespoň na 60 min (Vyhláška č. 341/2008 Sb.). Vzniklý bioplyn je nejčastěji spálen kogenerační jednotkou a využit ke kombinované výrobě energie a tepla. Velkou výhodou je umístění komunálních BPS v rámci průmyslových zón a okrajů městských aglomerací, kdy tyto BPS mohou využít své polohy a zásobovat teplem technologie okolních provozů, zde se dá opravdu efektivně využít velká část energie produkované BPS v místě jejího vzniku. Výjimku mohou tvořit města, kde je vyšší poptávka po zemním plynu bez zájmu o dodávky tepla. Zde se vyplatí spíše vtlačet upgradovaný biometan do veřejné distribuční sítě zemního plynu anebo dokonce do lokální distribuční sítě, která napájí centrální nebo i lokální plynové kotelny (Dvořáček et al. 2009).

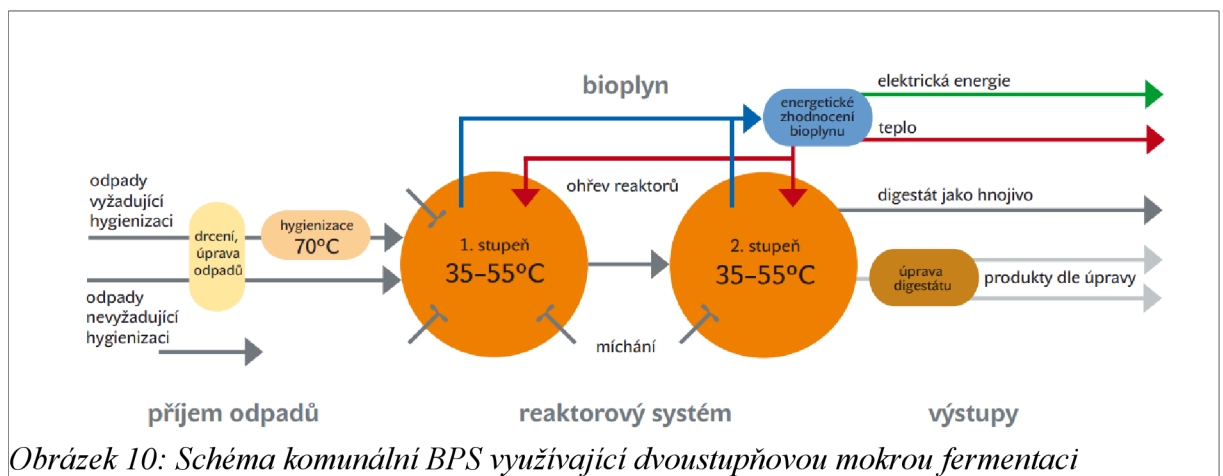
Fermentační zbytek se prakticky dělí na dvě skupiny podobně jako u průmyslových BPS, a to na využitelný v zemědělství, a naopak určený ke skládkování. Pokud substrát tvoří hlavně jakostně nevyhovující a prošlé potraviny nevhodné pro lidskou spotřebu, které jsou drceny spolu s obalovým materiálem (často plastovým) a fermentovány, není možné fermentační zbytek využít bez úprav pro aplikaci na půdu, často proto následuje separace

pevného separátu, který je zpravidla uložen jako odpad, kapalný fugát neobsahuje-li mikroplasty a další rizikové prvky je možné dále zpracovat a využít jako hnojivo. Za předpokladu, že substrát obsahuje pouze biomasu, je fermentační zbytek nejčastěji dle legislativních norem registrován a prodáván jako hnojivo. Ve většině případů komunální BPS nedisponují ornou půdou, na které by bylo možné fermentační zbytek využít (Marada et al. 2008)

Racionální výstavba těchto stanic má být vázána na dostupnost substrátu a zároveň poptávku po tepelné energii v její blízkosti. Opět platí, že delší dojezdové vzdálenosti pro dopravu materiálu snižují ekonomickou návratnost a zvyšují ekologickou zátěž (Dvořáček et al. 2009). Proto například rozhodnutí hl. města Prahy realizovat komunální BPS v Chrástu u Poříčan je příkladem iracionality. Místo BPS je 40 km vzdáleno od centra Prahy, proto převoz materiálu na tuto BPS je zatížen výraznou uhlíkovou stopou, a to i za předpokladu, že část flotily nákladních automobilů bude poháněna bioCNG (interní informace Farmtec). Racionalizace výstavby a určení vhodné lokality může narazit na odpor obyvatel, kteří BPS nechtějí v blízkosti svého domu, protože se obávají zápachu a zvýšené dopravy způsobené svozem materiálu na BPS a odvozem fermentačního zbytku. Proto je nutné volit technologie, které zápach eliminují a efektivně zpracovávají fermentační zbytek, to spolu s náročnější úpravou substrátu a složitějším povolovacím procesem prodražuje investici na výstavbu komunální BPS na téměř dvojnásobek oproti zemědělským BPS (Dvořáček et al. 2009).

Naproti tomu racionalizace provozu spočívá hlavně v maximalizaci příjmu BRKO a dalších odpadů, protože poté má BPS výnos jak z prodeje produktů fermentace, tak z poplatků za příjem substrátu, proto má tento typ BPS nejrychlejší návratnost investice v horizontu 7-10 let od uvedení do provozu. Navíc se tím sníží objem skládkovaného materiálu a BPS tak pomáhá recyklaci organických látek v životním prostředí. Z odpadu vyrábí hnojivo polních plodin, které se poté mohou stát opět potravinou (Dvořáček et al. 2009, Vítěz et al. 2013).

Investice do provozu a modernizace komunálních BPS jsou nejvyšší ze všech typů BPS. Investice také často definují legislativní požadavky na dodržování hygienických norem. Dá se předpokládat, že se tyto normy budou nadále zpřísnovat. A proto jednou z hlavních příčin bránící výstavbě těchto BPS je složitý povolovací proces. Také je nutné zmínit vysokou energetickou náročnost tohoto typu BPS, často se setkáváme s termofilní fermentací při teplotách až 55 °C, velkou spotřebu energie má i technologie, hlavně pak hygienizace, drcení a separace substrátu, proto komunální BPS mají spotřebu až 30 % z vyrobené energie (Bačík 2008, Dvořáček et al. 2009)



3.14.3 Zemědělské BPS

V tomto sektoru se odehrála doslova revoluce motivovaná nařízeními Evropské unie. První směrnici Evropského parlamentu o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie byly představeny zájmy EU o snižování spotřeby fosilních paliv. Cílem je zvýšit využívání energie z obnovitelných zdrojů v zájmu boje proti změně klimatu, ochrany životního prostředí a snížení energetické závislosti EU a přispět k vedoucímu postavení EU v oblasti technologií a průmyslu a k vytváření pracovních míst a růstu, a to i ve venkovských a odlehklých oblastech (Směrnice 2001/77/ES). Na těchto základech byla nastavena štedrá investiční (na výstavbu) a provozní (pevná výkupní cena elektrické energie dodané do sítě) podpora obnovitelných zdrojů, zemědělských BPS nevyjímaje (Zákon č. 180/2005 Sb.). Do roku 2013 se setkáváme s nejmasivnější výstavbou zemědělských BPS, protože díky dotačním programům se návratnost investice takto postavených BPS pohybuje kolem šesti let. BPS však často nejsou ani součástí zemědělských družstev, pouze nakupují cíleně pěstovanou biomasu od zemědělských producentů do anaerobní fermentace a prodávají energii a fermentační zbytek. Na fermentační zbytek je pohlíženo spíše jako na odpad a vznikající tepelnou energii využívají pouze pro vlastní spotřebu což, je hlavně ohřev fermentorů. Tyto BPS mají efektivitu využívání energie pouze kolem 45 %. V současné době jednotky těchto BPS dokonce ukončují činnost nebo jsou přeprodávány jiným majitelům, a to hlavně kvůli vysoké ceně substrátu, resp. kukuřičné siláže. V kapitole 3.4 je prezentovaná výtěžnost z 1 t kukuřičné siláže (nejčastější substrát těchto BPS) 190-200 m³ bioplynu, za předpokladu, že je bioplyn z 50 % metan se jedná o 100 m³ metanu. Metan má výhřevnost 9,965 kWh.m⁻³, tedy z 1 t kukuřičné siláže se uvolní energie 996,5 kWh, účinnost konverze elektrické energie kogenerační jednotky je 40 %, jedná se tedy o 398,6 kWh elektrické energie z tuny siláže. Průměrný instalovaný výkon takto stavěných zemědělských BPS se blížil 1 MW to znamená, že BPS musí vyrobit 1 MW za 1 hodinu, produkce 1000 kWh odpovídá spotřebě 2,5 t kukuřičné siláže za hodinu. Při provozu 8300 h (předpokládaná roční doba provozu dle zákona o POZE) za rok se dostáváme na celkovou spotřebu 20 750 t siláže za rok. Při průměrném výnosu kukuřičné biomasy 34 t.ha⁻¹ (data průměrované dle statistik roku 2020 z www.agromanual.cz) zjišťujeme, že takováto zemědělská BPS potřebuje téměř 610 ha zemědělské půdy. Dle statistik CzBA až 90 % BPS uvedených do provozu do roku 2018 zpracovávalo cíleně pěstovanou biomasu z více jak 80 % (Směrnice 2001/77/ES; interní informace společností CzBA; Farmtec a agriKomp; Zákon č.180/2005 Sb.).

Tento trend byl následně regulován směrnicí Evropského parlamentu obnovitelné energii tzv. RED (Renewable Energy Directive), která omezuje použití cíleně pěstované biomasy pro nově postavené BPS na maximálně 80 % a zároveň definuje další možné substráty BPS. Používání zemědělského materiálu, jako je hnůj, kejda a další odpadní látky živočišného nebo organického původu k výrobě bioplynu, může vést k výraznému snížení emisí skleníkových plynů, a má proto značné výhody z hlediska životního prostředí, pokud jde o výrobu tepla a energie a o použití těchto látek jako biopaliv. Zařízení na výrobu bioplynu mohou vzhledem ke své decentralizované povaze a regionálnímu financování rozhodujícím způsobem přispět k udržitelnému rozvoji venkovských oblastí a mohou pro zemědělce představovat nové zdroje příjmu. Na základě této teze je zachována investiční a provozní dotace pro zařízení uvedená do provozu do 1.1.2016. (Směrnice 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009; Zákon č.180/2005 Sb.).

Implementací RED II do české legislativy (Zákon č.180/2005 Sb.) byly dány podmínky dalších dotací: zemědělská bioplynová stanice měla nárok na podporu, pokud byla alespoň polovina suroviny z cíleně pěstované biomasy, jako je obilí, kukuřice nebo řepka. Druhá polovina mohla pocházet z odpadních surovin, jako je znehodnocené zrno potravinářských obilovin, zbytková biomasa ze zemědělství nebo úpravy ovoce a zeleniny,

posečená tráva, výpalky z lihovaru, exkrementy hospodářských zvířat, nepoužité oleje olejnatých rostlin a podobně. Nemohly být použity bioodpady, které vyžadují hygienizaci, jako jsou prošlé potraviny, zbytky jídel nebo odpady z potravinářského průmyslu. Právě tyto odpady mohly zpracovávat odpadové (komunální) bioplynové stanice, ale dostaly za ně nižší finanční podporu, což vedlo k paradoxní situaci, kdy byly více podporovány stanice, pro jejichž palivo byla potřeba cíleně pěstovat a sklízet biomasu, které zabíraly cennou zemědělskou půdu, nemluvě o palivu, které bylo na jejich vypěstování spotřebováno. Přitom pro většinu bioplynových stanic existuje dostupné palivo, které se nemusí pěstovat. V tomto směru nastává odklon od cíleně pěstované biomasy (oenergetice.cz, Směrnice 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009; Zákon č.180/2005 Sb.). Všechny nově uvedené BPS do provozu musí splňovat udržitelnost vstupní biomasy, což prakticky znamená postupné ukončení podpory BPS zpracovávající cíleně pěstovanou biomasu. Směrnice tak způsobila hlavní útlum ve výstavbě nových zemědělských BPS, které bez garance pevné výkupní ceny ztrácejí rentabilitu. Na národních úrovních se počítá s tvorbou dlouhodobých strategií implementace biometanu do energetických systémů. Tyto systémy mají podpořit rozvoj venkovských oblastí a cirkulárních ekonomik. Pro nové zdroje je nevyhnutelné zakrytí koncového skladu fermentačního zbytku, jinak nebudou splněny podmínky RED II (Směrnice 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018). Tato implementace umožňuje přijímat zemědělským BPS biologicky rozložitelný odpad nebo čistírenské kaly bez snížení dotací na výrobu energie, ale musí se k tomu přizpůsobit technologicky zejména příjem substrátu, a to zavedením hygienizační linky, příjmové nádrže na substrát, aby se eliminoval vznik nežádoucího zápachu apod. Není ale nutné budovat nové kapacity komunálních BPS, ale je možné využít již existujících kapacit těch zemědělských. Technologická úprava umožňující příjem biologicky rozložitelných odpadů pak představuje zlomek investičních nákladů, které by bylo nutné vynaložit na výstavbu nových kapacit odpadových bioplynových stanic (Směrnice 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018; interní informace společnosti Farmtec).

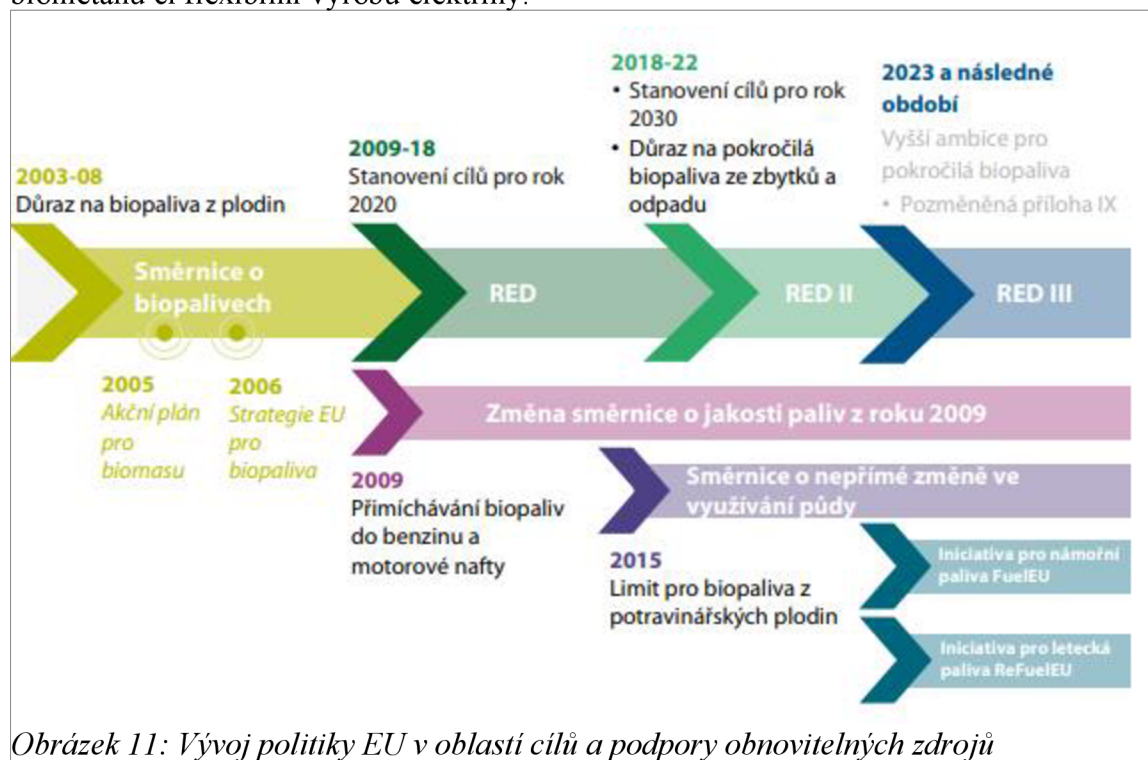
Vyhláška 68/2022 určuje BPS, kterým končí primární doba udržitelnosti 20 let (jedná se o BPS postavené do konce roku 2003), ustanovuje nutné investice do modernizace výrobního zařízení ke zvýšení energetické účinnosti, aby tyto BPS mohly nadále pobírat podporu při výkupu elektrické energie. Jedná se hlavně o: výměny nebo generální opravy spalovacího motoru, výměny nebo generální opravy generátoru, výměny nebo generální opravy plynojemu, výměny nebo generální opravy fermentoru a skladovací jímky, výměny nebo generální opravy regulačních zařízení a výměny nebo instalace nového automatizovaného systému řízení.

Spolu s ambicióznějšími cíli EU přichází směrnice RED III, která v oblasti obnovitelných zdrojů nastavuje tyto cíle: cíl klimatické neutrality v Unii do roku 2050 a přechodný cíl snížit do roku 2030 emise skleníkových plynů alespoň o 55 % ve srovnání s úrovněmi roku 1990, cíl Unie dosáhnout do roku 2030 podílu energie z obnovitelných zdrojů na hrubé konečné spotřebě energie Unie ve výši minimálně 32 %, cíl Unie zvýšit podíl obnovitelných zdrojů do roku 2030 o 40 % oproti roku 2020 a cíl učinit Unii nezávislou na ruských fosilních palivech s dostatečným předstihem před rokem 2030. Tyto cíle jsou přibližně 2x přísnější a ambicióznější, než jaké byly představeny směrnicí RED I v roce 2009 (Směrnice 2023/2413 ze dne 18. října 2023). Velká část změn v oblasti obnovitelných zdrojů energie ještě nebyla implementována do české legislativy, proto některé prezentované informace v RED III nejsou zatím právně závazné a na jejich provedení není stále politická shoda. Zároveň se EU zavazuje podpořit dosažení cíle týkajícího se roční výroby udržitelného biometanu ve výši 35 miliard m³ do roku 2030. Dalším závazkem je až 5,5 % podílu biometanu a pokročilých biopaliv do roku 2030 (to jsou biopaliva, která se vyrábí z různých druhů nepotravinářské biomasy a v současné době nepokryjí ani 0,1 % tohoto podílu), což prakticky znamená odklon od výroby elektrické energie kogenerací a přeorientování se na

výrobu biometanu a zároveň také kompletní přesun k udržitelným surovinám pro anaerobní fermentaci, kdy by cíleně pěstovaná biomasa neměla přesahovat 30 % suroviny. Až v RED III se začíná řešit energetická efektivnost BPS, nově postavené BPS musí dosáhnout efektivnosti minimálně 80 %. Tohoto cíle je možné dosáhnout dvěma způsoby, a to buď výrobou biometanu, kde můžeme hovořit o účinnosti zařízení přes 90 % (koncové spalovací zařízení biometanu není zohledněno) nebo efektivním využitím tepla z kogenerační jednotky na vytápění objektů mimo areál BPS anebo k technologickému sušení (Směrnice 2023/2413 ze dne 18. října 2023). Již nyní je možná podpora na tzv. Užitečné teplo (Užitečným teplem se rozumí teplo vyrobené v procesu kombinované výroby tepla a elektřiny k uspokojování ekonomicky odůvodněné poptávky po vytápění a chlazení. „Užitečným teplem“ není teplo spotřebované ve vlastním procesu výroby energetického zdroje ani teplo používané pro následnou výrobu elektřiny), která má motivovat BPS více tento zdroj využívat, aby v budoucnu mohla být splněna podmínka energetické efektivnosti (Zákon č.180/2005 Sb.). Strategie společnosti Farmtec, která se snaží o implementaci sušáren do areálů BPS. Zajímavých výsledků se dosahuje při sušení konstrukčního a palivového dřeva, zemědělských plodin a krmiv. Hygienizace vstupního substrátu a tepelné zahušťování fugátu je také považována za Užitečné teplo. Bohužel, z důvodů nejasnosti financování, úsporných opatření a zřejmě vysoké ceny energie v minulých letech je pro rok 2024 podpora na Užitečné teplo 0 Kč.

Dle oficiálních stránek evropské unie Evropský parlament nyní pracuje na RED IV.

Prvotní koncepce zemědělských BPS jak byla nastavena dotační politikou EU znamenala výstavbu osamocených BPS mimo osídlení a zdroje udržitelného substrátu pro anaerobní fermentaci se zaměřením na stabilní produkci elektřiny. Současná a budoucí koncepce definuje BPS jako součást většího celku (podniku, města, průmyslové oblasti) s předem definovaným výkonem dle dostupnosti udržitelného substrátu, pro produkci hlavně biometanu či flexibilní výrobu elektřiny.

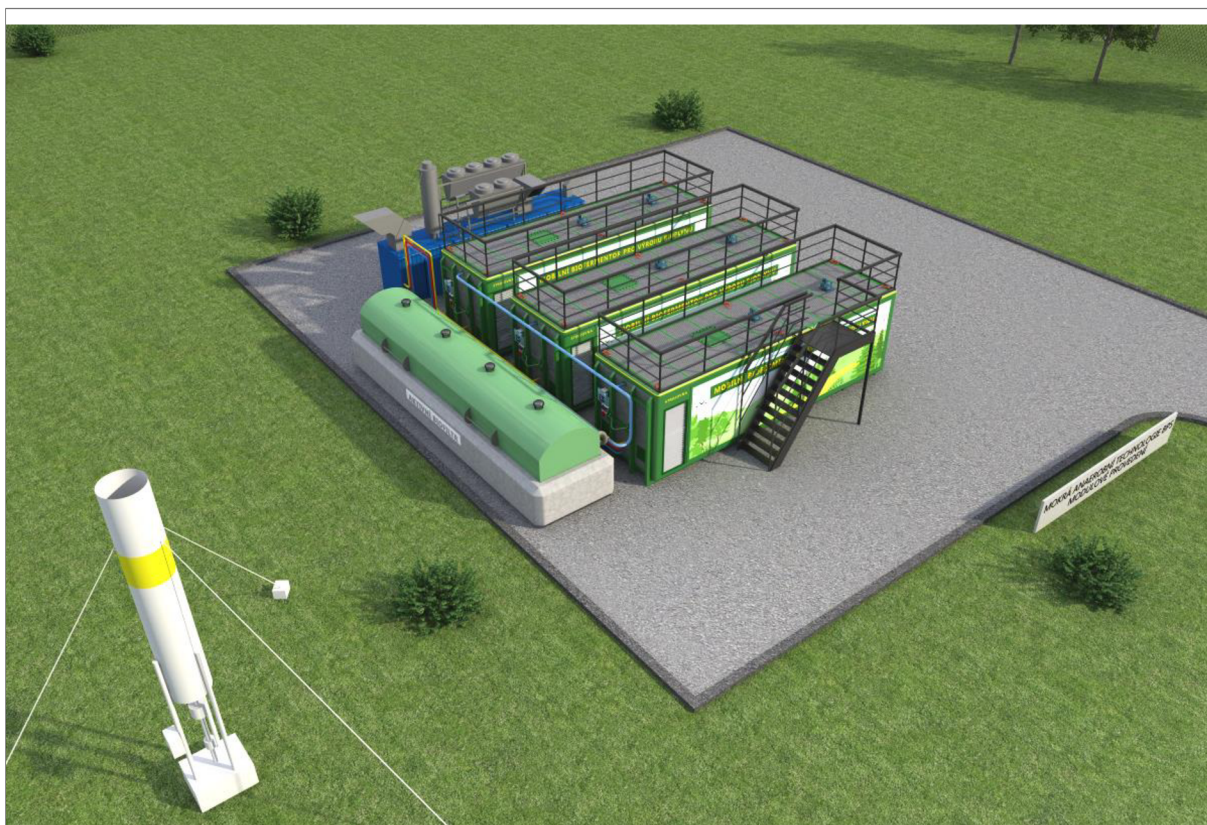


Obrázek 11: Vývoj politiky EU v oblasti cílů a podpory obnovitelných zdrojů

3.14.4 Modulární BPS

Alternativou k velkým BPS o instalovaném výkonu několik stovek kilowatt až jednotek megawatt s vysokou spotřebou substrátu jsou malé modulární (modulové) bioplynové stanice (MOBPS) o výkonu od 10 kW až do 260 kW. Jedná se tedy o BPS se spotřebou od 0,5 t do 16 t biomasy za den. MOBPS jsou vhodné pro agropodniky se zaměřením na živočišnou výrobu, zejména pak chov skotu, prasat v automatizovaných ustájených chovech. Automatická hrabla několikrát denně přesouvají exkrementy hospodářských zvířat do jednoduchého příjmové nádrže s drtičem a čerpadlem, které zásobuje anaerobní fermentor s plynojemem. Fermentační zbytek je jímán v plynotěsném koncovém skladu odkud je následně využit jako hnojivo. Bioplyn je chlazen zemní smyčkou a spalován v kogenerační jednotce, většina energie je využita v rámci agropodniku pro vlastní technologickou spotřebu a teplo pro vytápění stájí a přilehlých budov. Téměř 80 % produkované energie je tak využito v rámci agropodniku, který díky provozu MOBPS získá energetickou soběstačnost v průběhu celého roku. Již na začátku se nastaví výkon MOBPS dle průměrné denní produkce substrátu. Velkou výhodou je odstranění zápachu ze substrátu a emisí metanu do ovzduší. Takto navrhuje své MOBPS společnost agriKomp v Evropě, kde jich je aktuálně v provozu více jak 200. Zde se jedná o nejrationálnější využití anaerobní fermentace v zemědělství, kdy se velikost MOBPS volí dle objemu dostupného substrátu. Systém lze provozovat v režimu 100% zpracování zvířecích exkrementů. Nevýhodou je malý přebytek energie dodávaný do sítě, proto takovéto MOBPS nebudou významným prvkem decentralizované energetické soustavy (agriKomp – produkční katalog modulárních BPS).

Další možností využití MOBPS přináší firma Bert CEE s.r.o., která se po zkušenostech se zemědělskými MOBPS začíná zaměřovat na komunální MOBPS. Díky technologii fermentoru bez míchadel a minimalizaci čerpání substrátu je možné stavět MOBPS od instalovaného výkonu 10 kW, což odpovídá zhruba spotřebě 0,5 t substrátu za den. Prostorová náročnost je pak do 250 m² plochy. Cílovou skupinou jsou tak obce se zavedeným sběrem BRKO s obecní ČOV a zdroji gastroodpadu. Zisk projektu MOBPS je generován procesem zpracovávání odpadů, které jsou za jiných okolností nákladovou položkou. Cílem instalace modulové bioplynové stanice je využití pouze lokálního odpadu, tedy odpadají dodatečné náklady na pěstování a dopravu substrátu. Je dimenzována pro maximální využití elektrické a tepelné energie, především pro vlastní spotřebu. Důležitá je i rychlost těchto MOBPS. Již po 25 dnech má subjekt k dispozici fermentační zbytek, který je nejčastěji separován šnekovým separátorem na separát, který je převeden do kompostárny v areálu MOBPS. Fugát se recykluje do procesu anaerobní fermentace nebo je prodáván jako hnojivo agropodnikům. Celý proces MOBPS je plně automatický a vyžaduje obsluhu několik desítek minut denně. Zatímco náklady na velké BPS se pohybují nad 100 milionů korun, MOBPS lze realizovat dle velikosti za jednotky milionů korun. Nejsilnějším argumentem rozvoje modulových BPS je jednoduchý povolovací proces, není potřeba stavební povolení, posuzování vlivů na životní prostředí tzv. EIA. Celé zařízení je navíc možné přepravit na jiné místo v případě změny místních podmínek sběru odpadu. Pro obce je tu navíc možnost dotačních programů na zvýšení energetické efektivity a rozvoje venkova, které tak zajistí rychlou návratnost investice (Bert CEE s.r.o. – obchodní prezentace).



Obrázek 12: Provedení mokré anaerobní fermentace v modulové BPS

3.15 Model racionálního přístupu k výstavbě a provozu bioplynové stanic

Na základě definice legislativních podmínek, hlavně směrnice Evropské unie RED II, navazující RED III, zákona č. 180/2005 Sb., zákona č. 165/2012 Sb. a osobních konzultací se zástupci firem Farmtec a agriKomp a Českého sdružení pro biomasu, z. s. (CZ Biom) uvažujeme o modelu ekonomicky a ekologicky racionální BPS s efektivním využíváním produktů nejen v roce 2024, ale i perspektivou provozu do dalších let.

Tato BPS musí splňovat následující kritéria:

Umístění BPS je dle zástupce společnosti agriKomp nutné zvolit tak, aby byla součástí většího celku, nejlépe v blízkosti obce, průmyslové zóny nebo zemědělského podniku. Lokace v rámci obce nebo průmyslové zóny umožní využít elektrickou energii a teplo v blízkém okolí ideálně bez transformace elektrické energie. To umožní BPS dosáhnout vysoké účinnosti využití energie přes 80 %. Nutné je vybudovat BPS tak, aby zde nevznikal nepříjemný zápach, jedná se hlavně o zakrytou příjmovou nádrž a krytý koncový sklad fermentačního zbytku. Je také nutné efektivně odhlučnit veškerou technologii, zvláště kogenerační jednotku, která je zdrojem vysokofrekvenčního hluku (Marada et al. 2008). BPS musí být umístěna u dostatečně dimenzované dopravní infrastruktury. Při předpokladu vysokého výkonu BPS a spotřeby substrátu až 20 000 t za rok by se mohlo jednat o příjezd více jak 3 000 nákladních automobilů, toto číslo lze radikálně snížit umístěním BPS přímo ke zdroji zpracovávaného materiálu, vhodnou polohou tak lze optimalizovat využívání přírodních zdrojů i snížit zatížení životního prostředí nadměrnou dopravou.

Substrát musí být získáván z odpadních produktů živočišné a rostlinné výroby, biologicky rozložitelného odpadu, čistírenských kalů a gastroodpadu. Vhodné je také vytvářet travní senáž z údržby městské zeleně nebo trvalých travních porostů, která funguje jako zásobní substrát a efektivní náhrada za kukuřičnou siláž (Směrnice 2023/2413 EU). Velkou výzvou pro tuto BPS bude dávkování takto heterogenního odpadu, kdy je nutné

minimalizovat výkyvy v podmínkách procesu anaerobní fermentace a produkci bioplynu kvůli rozdílnému složení substrátu. Proto je nutné již při výstavbě počítat s dostupnými zdroji substrátu a nastavit jejich optimální poměr tak, aby se v průběhu roku co nejméně měnil. Tím se zajistí stabilní produkce bioplynu. Racionalizace skladby substrátu je také velmi důležitá z hlediska legislativy, protože je zpracována do interní dokumentace provozu BPS a schválena příslušným Krajským úřadem, při radikální změně substrátové skladby se musí požádat o opětovné schválení příslušným orgánem (informace CZ BIOM). BPS by měla zpracovávat minimum cíleně pěstované biomasy, protože v budoucnu s příchodem směrnice RED IV by mohl nastat úplný zákaz využití tohoto substrátu pro anaerobní fermentaci. Zpracováním bioodpadů zároveň snižuje využívání přírodních zdrojů, vylepší ekonomickou bilanci BPS a sníží objem cíleně pěstovaných plodin.

V roce 2024 v interních dokumentech za spolupráce sdružení CZ Biom a společnosti Farmtec vznikla definice aktuálně udržitelného substrátu pro výrobu elektřiny v zemědělských BPS:

- kukuřičná siláž 31 %
- travní senáž 13 %
- siláž z celých drcených obilnin a luskovin (GPS) 4 %
- cukrovarnické řízky 2 %
- výkaly hospodářských zvířat celkem 46 %
- ostatní (bioodpady, rostlinné odpady, brambory) 5 %

Získání a doprava substrátu je pro BPS největším finančním nákladem, a proto výběrem levného a dostupného substrátu lze nejlépe vylepšit ekonomickou bilanci zařízení.

Anaerobní fermentace se předpokládá kontinuální, mokrá mezofilní s průměrnou teplotou do 40 °C, je tak zajištěn bezproblémový automatický a energeticky úsporný chod. Navíc oproti jiným způsobům anaerobní fermentace je zajištěna stabilní produkce bioplynu, a tím i vyšší účinnost a kratší doba zdržení substrátu. Tím se maximalizuje energetické využití vstupního substrátu, takto se shodují na efektivním průběhu fermentace společnosti agriKomp a Farmtec.

Fermentor by podle zástupců společnosti Farmtec měl být válcového tvaru typu kruh v kruhu, kdy tato konstrukce má několik konstrukčních výhod, jedná se především: úsporu prostoru snížení investičních nákladů, snížení spotřeby tepla menší teplosměnnou plochou s okolím, jednoduché přemístění substrátu přepadem bez míchadel, efektivní zdržení substrátu. Konstrukce kruh v kruhu je dle Farmtecu méně investičně náročnější než konstrukce dle agriKomp, který vsází na oddělené fermentory, agriKomp zase argumentuje efektivnějším řízením anaerobní fermentace, bližší informace jsou však předmětem obchodního tajemství, takže technologie nelze porovnat. Dle společnosti Farmtec je nedílnou součástí fermentoru i plynojem, který bude fungovat jako sklad bioplynu a případně kompenzovat výkyvy v produkci bioplynu.

Technologie BPS musí splňovat mnoho náročných často protichůdných požadavků, důraz je kladen zejména na vysokou účinnost celého systému a jednoduchou obsluhu. Kogenerační jednotka musí dosahovat účinnosti výroby elektrické energie minimálně 40 %, optimálně pak 45 %, tím lze ušetřit na nákladných modernizacích. Účinnost výroby tepla by měla být přes 45 % a distribuci tepla je nutné provádět maximálně efektivně. BPS používá pro vyhřívání fermentorů a hygienizaci okolo 30 % vyrobeného tepla, toto množství lze snížit izolací fermentorů v případě nepříznivých klimatických podmínek i částečně zapustit fermentory do země. Zbylých 70 % vzniklého tepla je nutné komerčně využít, zejména je nutné BPS propojit s ostatními službami v areálu BPS, které využijí užitečné teplo, jedná se o již zmíněné sušení konstrukčních materiálů, sklizených zemědělských plodin a krmiv nebo se může jednat o tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu, a tím jeho zhodnocení jako hnojiva (Švehla et al. 2021). Případné nadbytečné teplo využít mimo areál BPS pro vytápění komerčních a obytných budov nebo jako technologické teplo. Technická vlastní spotřeba

elektrické energie nesmí přesáhnout 10 % výroby, to lze docílit pouze tak, že je v technologii zařazeno minimum čerpadel a přesun substrátu mezi fermentory a do uskladňovací nádrže probíhá přepadem. Fermentory jsou vybaveny efektivními míchadly s předpokládaným provozem max. 8 h za den. Největší díl TVS tvoří hygienizační jednotka substrátu a macerátory, zde se jedná o drtiče upravující velikost vstupujícího materiálu, aby se zamezilo ucpávání potrubí fermentovaným materiálem. Dostatečně optimalizovaná technologie sníží dle informací společnosti agriKomp TVS na 6 % výroby elektrické energie. Zařízení i přes svoji komplexnost musí být jednoduše opravitelné a ovladatelné, automatizací fermentačního procesu je nutné minimalizovat personální náklady. V případě zaměření BPS na produkci biometanu stoupá TVS, to je dáno energetickou náročností procesu zušlechtnění bioplynu membránovou separací. Na druhou stranu takto navržená BPS vyrábí elektřinu a teplo z kogenerace pouze pro TVS. To spolu s vysokou účinností membránového procesu až 99,5 % může znamenat energetickou účinnost přes 90 %.

Plynojem bude dle zástupců společnosti Farmtec hrát velmi důležitou roli v budoucím uplatnění BPS jako flexibilního zdroje a pokrývání špiček výroby elektrické energie, proto se na tuto strategii zaměřuje v obchodních nabídkách a prezentacích. Dle interních dokumentů společnosti Farmtec se bude jednat o navýšení plynových kapacit formou zakrytí fermentorů, ale i zakrytí koncových skladů, čímž se nejen vytvoří skladovací kapacita, zároveň se sníží emise metanu a zápachu do ovzduší. Počítá se také s externími plynojemy v areálu BPS, které mohou navýšit skladovací kapacitu až o 8000 m³. Plynojem by se dal vhodně přirovnat k baterii, v době přebytků elektrické energie v síti pracuje kogenerační jednotka s nižším výkonem nebo pracuje kogenerace o nižším nominálním výkonu, nespálený bioplyn se hromadí v plynojemech. V době zvýšené poptávky po elektrické energii se plynojemy vyprazdňují a BPS produkuje maximum instalovaného výkonu. Další technologickou výhodou je vyšší efektivita odsíření bioplynu. Na stavbu plynojemu lze navíc čerpat dotace až 40 % investičních nákladů (interní dokumenty Farmtec).

Fermentační zbytek. Velmi významným faktorem racionalizace provozu je nakládání s fermentačním zbytkem. Technologii je nutné volit opět podle možnosti využití fermentačního zbytku. Pokud je možné jej aplikovat na zemědělskou půdu, je potřeba optimalizovat náklady na dopravu fermentačního zbytku. Protože se jedná o obrovské množství materiálu v tisících tun za rok může doprava fermentačního zbytku podstatně snížit jeho hodnotu. Proto je nutné fermentační zbytek separovat, separát je vhodné kompostovat, kdy po smíchání s další rozložitelnou biomasou vznikne ideální kompost, tím se může využít i biomasa, která by nebyla vhodná jako substrát pro BPS např. dřevní štěpka. Vzniklý kompost může být využit k výrobě zahradnických substrátů nebo jej lze registrovat a prodávat jinému subjektu. Fugát je nutné zkoncentrovat, díky odpadnímu teplu se nejvýhodnější jeví odpaření části fugátu a zkoncentrování živin. Příkladem racionalizace může být stabilizace fugátu metodou biologické nitrifikace a následné odpaření části vody pro zmenšení objemu a zkoncentrování živin (Švehla et al. 2021). Takto koncentrovaný a upravený fugát by bylo možné registrovat jako hnojivo. To dále balit a prodávat pro neprofesionální použití konečnému spotřebiteli nebo čerpat do 1000 l IBC (Intermediate Bulk Container) kontejnerů a prodávat velkoobchodně k dalšímu zpracování. Spolu s prodejem substrátu si tak může BPS vytvořit vlastní portfolio hnojiv a substrátů pro koncového spotřebitele a výrazně tak vylepšit ekonomickou bilanci provozu BPS a zároveň snížit svou závislost na zemědělském sektoru v oblasti uplatnění fermentačního zbytku, zde je však ještě nutná důkladná analýza trhu a ekonomická bilance se může lišit dle polohy a zaměření zařízení. Pro BPS, které jsou součástí agropodniku s portfoliem rostlinné výroby je hlavní využití zkoncentrovaného fugátu přímá aplikace na půdu dle pravidel uvedených v kapitole 3.13.

Bioplyn lze využít dvěma hlavními způsoby:

- Výroba biometanu
- Kombinovaná výroba energie a tepla

Obecně můžeme definovat, za jakých podmínek se více vyplatí daná technologie.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla je vhodnější u BPS, které mají možnost využití tzv. Užitečného tepla, nebo provozují energeticky náročnou zemědělskou výrobu např. chov mléčného skotu. Limitujícím faktorem je také možnost připojení k distribuční soustavě zemního plynu. BPS by však měla být více flexibilní a provozovat více kogenerací o menším výkonu (jako je tomu u řešení společnosti agriKomp), než jednu jednotku o maximálním instalovaném výkonu. Toto „kaskádování“ výroby doplněné plynovými kapacitami umožní v budoucnu BPS velmi pružně reagovat na potřebu elektrické energie v síti.

Výroba biometanu je vhodná především pokud není možné efektivně využít odpadní teplo, bude nutná výrazná investice do generální opravy kogenerační jednotky, je možné snadné připojení k distribuční soustavě zemního plynu. Je nutné upozornit, že existují i jiné možnosti energetické soběstačnosti než pouze BPS. Fotovoltaické panely je možné instalovat na střechy budov agropodniku a tím doplnit výrobu obnovitelné energie o další zdroj. To umožní většinu produkce bioplynu směřovat k výrobě biometanu. Takto komplexně navrhují společnosti Farmtec a agriKomp své projekty, kdy pečlivě vyhodnocují místní podmínky a v případě, že je vhodnější vyrábět biometan, ale agropodnik má zájem především o obnovitelný zdroj elektrické energie nabízí spíše fotovoltaické panely.

Konečné využití bioplynu je tedy nutné koncipovat dle konkrétních podmínek na BPS, ale již nyní dodavatelské společnosti evidují velký zájem o membránové systémy na výrobu biometanu, a to hlavně z důvodu nastavení pevných výkupních cen ze strany Energetického regulačního úřadu na biometan, ale také roste zájem firem o přímý nákup biometanu z důvodů optimalizace nákladů na emisní povolenky.

Koncový sklad fermentačního zbytku bude muset být krytý, aby se zamezilo únikům metanu a amoniaku do ovzduší. Tento požadavek vychází ze směrnic Evropské unie a v současné době se jedná zřejmě o nejčastější investici na stávajících BPS. Zakrytím koncového skladu se navíc vytváří i další plynové kapacity, které přispějí k flexibilitě BPS. U nových výstaveb BPS by koncový sklad mohl být částečně nahrazen bioreaktorem na biologickou nitrifikaci fugátu a jeho následné tepelné zahuštění, tím by se využilo velké množství tepla a velikost koncového skladu by se zmenšila až o 60 % (Švehla et al. 2021).



Obrázek 13: Kompletní vysokoúčinná kogenerační jednotka Jenbacher, které v česku ve svých realizacích používá společnost Farmtec

4 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit literární rešerši na téma „Racionální přístupy k výstavbě a provozu bioplynových stanic“. V návaznosti na současný turbulentní vývoj v energetickém sektoru zejména v oblasti energetické bezpečnosti a na ekologické cíle Evropské unie, skýtají obnovitelné zdroje veliký potenciál a téma rozvoje využití bioplynu jako jedné z forem obnovitelných zdrojů je velmi aktuálním tématem. Práce nejprve představuje bioplynovou stanici a představuje její současnou úlohu ve výrobě elektrické energie a biometanu. Aby bylo možné racionalizovat provoz bioplynových stanic, jsou nejprve popsány produkty vzniklé anaerobní fermentací. Jsou definovány úpravy fermentačního zbytku, zejména separace na kapalnou a pevnou složku a jejich následné využití, důraz je kladen na představení tepelného zahuštění biologicky nitrifikovaného fugátu.

Nitrifikovaný a zahuštěný fugát je možné aplikovat přímo na půdu jako hnojivo. Z hlediska zachování živin se jeví jako vhodnější volba než fugát bez nitrifikace. Dusičnanový dusík je také velmi dobře přijímán rostlinami a také se minimalizují ztráty dusíku při skladování a aplikaci fugátu. Biologická nitrifikace otevírá možnosti k využití tepla produkovaného v bioplynové stanici a také vede k úspoře financí při výstavbě konečného skladu fermentačního zbytku.

V další kapitole jsou dle legislativních požadavků představeny jednotlivé typy bioplynových stanic, jejich hlavní procesní problematika, typický zpracováváný substrát a možnosti využití bioplynu a fermentačního zbytku. Představení klade důraz hlavně na efektivní využívání přírodních zdrojů a energetickou účinnost jednotlivých typů zařízení. Malé modulární stanice o nízkém instalovaném výkonu zpracovávající hlavně lokální zdroje biomasy s výrazně nižší investiční náročností výstavby jsou definovány jako příklady racionalizace výstavby bioplynových stanic.

Poté je definován model racionální bioplynové stanice tak, aby splňoval pravidla udržitelnosti, stability a ekonomické návratnosti spolu s přísnými legislativními požadavky.

Díky informacím získaných na základě rozhovorů s představiteli firem, které podnikají v oblasti výstavby a vývoje bioplynových stanic práce definuje nejslabší článek výroby bioplynu a tím je dostupnost udržitelného substrátu. Bioplynová stanice bez cenově dostupného substrátu nebude moci vyrábět energii. Dostatek vhodného udržitelného substrátu může poskytnout bioodpad, který je vhodnou alternativou k cíleně pěstované biomase.

Provozování více kogeneračních jednotek o různém instalovaném výkonu spolu plynovými kapacitami umožní bioplynovým stanicím velmi pružně reagovat na potřebu elektrické energie v síti.

Koncepce výroby energie z obnovitelných zdrojů nastavená Evropskou unií počítá s nárůstem produkce obnovitelné energie z anaerobní fermentace biomasy. Tohoto nárůstu lze dosáhnout modernizacemi a investicemi do stávajících bioplynových stanic, ale také racionální výstavbou nových zařízení situovaných přímo u zdroje vhodného substrátu.

5 Literatura

- AgriKomp – Produkční katalog modulárních BPS ANLAGEN 2023. Dostupné z: https://agrikomp.com/wp-content/uploads/Anlagen_AK_DE.pdf#page=2
- AgriKomp – 2024. interní informace od zaměstnanců společnosti na základě osobního rozhovoru. Informace z webové stránky. 2024. Dostupné z: <https://www.agrikomp.com/cs/>
- Al Seadi, T., Drosch, B., Fuchs, W., Rutz, D., Janssen, R., 2013. Biogas digestate quality and utilization, in: Wellinger, A., Murphy, J., Baxter, D. (Eds.), *The Biogas Handbook – Science, Production and Applications*. Woodhead Publishing, Cambridge pp. 267–301.
- Al Seadi T, Lukehurst C. 2012. Quality management of digestate from biogas plants used as fertiliser. *IEA Bioenergy*, 2012, 37:40.
- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B. S., Srinath, E. G. 1976. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *Journal Water Pollution Control Federation*. s. 835 - 852.
- Badalíková, B., Novotná, J. Změny fyzikálních vlastností půdy po aplikaci digestátu 2018. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/zmeny-fyzikalnich-vlastnosti-pudy-po-aplikaci-digestatu>.
- Bačík, O. 2008. Bioplynové stanice: technologie celonárodního významu. *Biom.cz*. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynovye-stanicetechnologie-celonarodniho-vyznamu>
- BASF spol. s r. o. 2024. Informace o produktu z webové stránky, Dostupné z: <https://www.agro.basf.cz/cs/Pripravky/Overview/stabiliz%C3%A1tor-dus%C3%ADku/Vizura.html>
- Bolzonella, D., Fatone, F., Gottardo, M., Frison, N., 2018. Nutrients recovery from anaerobic digestate of agro-waste: Techno-economic assessment of full scale applications. *J. Environ. Manage.* 111-119.
- Botheju, D., Svalheim, O., Bakke, R. 2010. Digestate nitrification for nutrient recovery. *The Open Waste Management Journal*. s. 1 - 12.
- Budaj J., Drtil M., Hutnan M., Derco J., 1999. Substrate and product inhibition of nitrification. *Chemical papers – Slovak Academy of sciences*. s. 379-383
- Calábková, Katrin & Malíková, Petra & Heviánková, Silvie & Červenková, Michaela. (2018). Recycling of Phosphorus and Ammonia Nitrogen from Digestate. *GeoScience Engineering*. s. 36-39.
- Costamagna P, Giordano A, Lazzarini Y, Delucchi M, Busca G. Process of ammonia removal from anaerobic digestion and associated ammonium sulphate production: Pilot plant demonstration. *J Environ Manage.* 2020 Apr 1;259:109841. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109841. Epub 2020 Jan 18. PMID: 32072955. s. 3-6

- Chiumenti, A., Da Borso, F., Chiumenti, R., Teri, F., Segantin, P. 2013. Treatment of digestate from a co-digestion biogas plant by means of vacuum evaporation: Tests for process optimization and environmental sustainability. *Waste Management*. s. 1339 - 1344.
- CZ Biom, 2015. Využití odpadního tepla z výroby bioplynu. *Biom.cz*. Dostupné z <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadniho-tepla-z-vyroby-bioplynu>. ISSN: 1801-2655.
- Česká bioplynová asociace – 2024. Ing. Jan Matějka. Informace na základě e-mailové korespondence. Informace z webové stránky. 2024. Dostupné z: <https://www.czba.cz/>
- České sdružení pro biomasu – CZ Biom 2024. Adam Moravec. Informace o technologiích BPS na základě e-mailové korespondence. Informace z webové stránky. 2024. Dostupné z: <https://www.czbiom.cz/>
- Dubský, M., Kaplan, L. 2012. Substráty a zeminy s komposty a separovaným digestátem. *Zahradnicví*. s. 62-65. ISSN: 1213-7596.
- Drosg, B., Fuchs, W., Al Seadi, T., Madsen, M., Linke, B. 2015. Nutrient Recovery by Biogas Digestate Processing. Dublin: IEA Bioenergy. s. 5-30. ISBN 978-1-910154-16-8
- Dvořáček, T., Habart, J., Rosenberk, T., Tluka, P. 2009. Výstavba komunálních bioplynových stanic s využitím BRKO. *Biom.cz*. s. 7-33. Dostupné z: <https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/bioplynky.pdf>
- Energetické služby Veolia Energie ČR, a.s. 2024. Informace z webové stránky. Dostupné z: <https://www.veolia.cz/cs/co-delame/mesta-obce/biometan>
- Evropská komise 1991. Council Directive of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources (91/676/EEC). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj>
- Evropský parlament a Rada. 2019. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/1009 ze dne 5. června 2019, kterým se stanoví pravidla pro dodávání hnojivých výrobků EU na trh a kterým se mění nařízení (ES) č. 1069/2009 a (ES) č. 1107/2009 a zrušuje nařízení (ES) č. 2003/2003. Dostupné na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX:32019R1009>.
- Farmtec a.s. – 2024. Gabriela Smetanová – ředitelka OZE, interní informace společnosti na základě osobního rozhovoru. Informace z webové stránky. 2024. Dostupné z: <https://www.farmtec.cz/uvod.html>
- Fuchs, W., Drosg, B. 2011. Assessment of the state of the art of technologies for the treatment of effluents from anaerobic digesters. In: Proceedings of the International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste and Energy Crops, Vienna. Austria. s. 4-8
- Gerardi, M. H. 2002. Wastewater Microbiology: Nitrification and Denitrification in the Activated Sludge Process. New York: John Wiley and Sons Limited. p. 193. ISBN: 0471065080.

- Guštin, S., Marinšek-Logar, R., 2011. Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent. *Process Saf. Environ. Prot.* s. 61-66.
- Howgrave-Graham A.R., Wallis F.M., Steyn P.L. 1991. A bacterial population analysis of granular sludge from an anaerobic digester treating a maize-processing waste. *Bioresource Technology*, s. 149–156
- Jančíková S., Komprsová I., 2020. Důvěřujeme a prověřujeme. Jak na využití digestátu dohlíží stát? *Biom.cz*. 2020-09-01. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/duverujeme-a-proverujeme.jak-na-vyuziti-digestatu-dohlizi-stat>. ISSN: 1801-2655.
- Javor T., Dostál J., Lošák T., 2023. Možnosti zvýšení účinnosti digestátu ve výživě a hnojení rostlin. *Argomanuál* 18.11.2023. Dostupné z: <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/moznosti-zvyseni-ucinnosti-digestatu-ve-vyzive-a-hnojeni-rostlin>
- Jeřábková J., Duffková R., 2019. Využití digestátu jako hnojiva, *Biom.cz*. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-hnojiva> časopis *Biom* 1/2019
- Kathijotes N, Petrova V, Zlatareva E, Kolchakov V, Marinova S, Ivanov P. 2015. Impacts of biogas digestate on crop production and the environment: A bulgarian case study. *American Journal of Environmental Sciences*, s. 81–89
- Kára, J., Pastorek, Z., Příbyl, E., 2007 *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. Praha: VÚZT. 120 s. ISBN 978-80-86884-28-8. s. 1-98
- Kolář L., Vaněk V., Kužel S., 2010. Využití odpadů z bioplynových stanic. *Biom.cz*. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadu-z-bioplynovych-stanic>
- Koszel M, Lorencowicz E. 2015. Agricultural Use of Biogas Digestate as a Replacement Fertilizers. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, s. 119-124.
- Lukehurst CT, Frost P, Al Seadi T. 2010. Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. *IEA bioenergy*, s. 1-36
- Mackie R.I., Bryant M.P. 1981. Metabolic activity of fatty acid-oxidizing bacteria and the contribution of acetate, propionate, butyrate and CO₂ to methaneogenesis in cattle waste at 40° and 60 °C. *Applied and Environmental Microbiology*, s. 1363–1373
- Makádi M, Tomócsik A, Orosz V. 2012. Digestate: A New Nutrient Source – Review. *InTechOpen, Croatia*, s. 295-310
- Marada, P., Večeřová, V., Kamarád, L., Dundálková, P., Mareček, J., 2008. Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Institut celoživotního vzdělávání ve spolupráci s Ústavem zemědělské, potravinářské a environmentální techniky, s. 2-14
- Matějka J., Záveský M., 2014, Biologicky rozložitelné odpady – mapa podmínek pro výrobu bioplynu, *Odborný měsíčník o odpadech a druhotných surovinách Odpadové fórum*, 2014 (5), ISSN 1212-7779, s. 11-12

- Metodický pokyn Ministerstva životního prostředí – sekce ochrany klimatu a ovzduší a sekce technické ochrany ŽP, K podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu, Věstník MŽP ČR, částka 2/2014.
- Ministerstvo zemědělství České republiky. 2013. Vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů. Sbírka zákonů České republiky, 2013, částka 149. Česká republika. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/pravni-predpisy-mze/tematicky-prehled/Legislativa-MZe_uplna-zneni_vyhlaska-2013-377.html
- Ministerstvo zemědělství České republiky. Vyhláška č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv
- Nařízení Evropského parlamentu a Rady č. 1774/2002 ES, o veterinárních a hygienických pravidlech pro vedlejší výrobky živočišného původu, které nejsou určeny k lidské spotřebě.
- Nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu ve znění pozdějších předpisů.
- Monfet, E, Aubry, G., Ramirez, A. A., 2018. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. *Biofuels*, s. 247-262.
- Molek, T. 2015. Bioplyn a bioplynové stanice v ČR. *oEnergetice.cz* Dostupné z: <https://oenergetice.cz/slug/bioplyn-a-bioplynovye-stance-v-cr>
- Möller K, Müller T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, s. 242-257.
- Münch, E.V., Barr, K., 2001. Controlled struvite crystallisation for removing phosphorus from anaerobic digester sidestreams. *Water Res*, s. 151- 159.
- Nkoa R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, s. 473-492
- Nakládání s digestátem, možnost využití jako kvalitní hnojivo. *Biom.cz*. 2014. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/nakladani-s-digestatem-moznost-vyuziti-jako-kvalitni-hnojivo>
- Nařízení vlády č. 262/2012 Sb. o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu
- Nařízení vlády č. 235/2016 Sb. kterým se mění nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programu, ve znění pozdějších předpisů
- OM Solutions s.r.o. 2024. Bioplyn a bioplynové stanice v ČR. *oEnergetice.cz* - denní zpravodajství z energetiky. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/slug/bioplyn-a-bioplynovye-stance-v-cr>
- Pastorek, Z. 2007. Vliv změn v legislativě ČR na energetické využívání biomasy, in *Zemědělská technika a biomasa*, VÚZT Praha, s. 5-12
- Pastorek Z., Kára J., Jevič P. 2004. *Biomasa obnovitelný zdroj energie*. FCC PUBLIC, ISBN: 80-86534-06-5, s.12-96

- Perazzolo, F., Mattachini, G., Riva, E., Provolo, G., 2017. Nutrient losses during winter and summer storage of separated and unseparated digested cattle slurry. *J. Environ. Qual.*, s. 879–888
- Purkhold, U., Pommerening-Roser, A., Juretschko, S., Schmid, M.C., Koops, H.-P., and Wagner, M. (2000) Phylogeny of all recognized species of ammonia oxidizers based on comparative 16S rRNA and amoA sequence analysis: implications for molecular diversity surveys. *Appl Environ Microbiol*
- Rada Evropské unie. 2024. Where does the EU's gas come from? Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/eu-gas-supply/>
- Sahm, H., 1981. Biologie der Methan-Bildung. *Chemie Ingenieur Technik* p. 854-863.
- Sam-Soon P.L., Loewenthal R.E., Dold P.L., Marais G.R. 1987. Hypothesis for pelletisation in the upflow anaerobic sludge bed reactor. *Water SA*, s. 69–80.
- Schulz, H., Krieg A., Mitterleitner H., Eder B. 2004. Bioplyn v praxi: teorie – projektování – stavba zařízení – příklady. Ostrava: HEL, ISBN 80-86167-21-6, 167 s.
- SEVEn Středisko pro efektivní využívání energie, kolektiv autorů neuveden. 2013. Energetická efektivnost bioplynových stanic. Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR prostřednictvím programu EFEKT 2011, CZBA, Dostupné z: <https://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>, s. 2-15
- Smart solution Varnsdorf : nadějný projekt komunitní energetiky na malém městě. Dostupné z: <https://obec2030.cz/novinky/smart-solution-varnsdorf/>
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2001/77/ES ze dne 27. září 2001 o podpoře elektřiny vyrobené z obnovitelných zdrojů energie na vnitřním trhu s elektřinou
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2009/28/ES ze dne 23. dubna 2009 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů a o změně a následném zrušení směrnic 2001/77/ES a 2003/30/ES
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 ze dne 11. prosince 2018 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů
- Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2023/2413 ze dne 18. října 2023, kterou se mění směrnice (EU) 2018/2001, nařízení (EU) 2018/1999 a směrnice 98/70/ES, pokud jde o podporu energie z obnovitelných zdrojů, a zrušuje směrnice Rady (EU) 2015/652
- Song, Y.-H., Qiu, G.-L., Yuan, P., Cui, X.-Y., Peng, J.-F., Zeng, P., Duan, L., Xiang, L.-C., Qian, F., 2011. Nutrients removal and recovery from anaerobically digested swine wastewater by struvite crystallization without chemical additions. *J. Hazard. Mater.*, s. 140-149
- Studeník, J. a Svitavský, M. 2014. Energie větru, vody, biomasy. Code Creator s.r.o., ISBN 978-80-88058-08-3.

- Švehla, P., Jeniček, P., Habart, J., Hanč, A., Černý, J. 2007. Využití akumulace dusitanů při biologickém čištění odpadních vod. *Chemické Listy*. 101 (10). s. 776 - 781. ISSN: 0009-2770.
- Švehla, P., Jeniček, P., Habart, J., Hanč, A., Balík, J. 2010. Testování vlivu vybraných faktorů na průběh nitrifikace kalové vody. *Chemické listy*. 104 (5). s. 343 - 348. ISSN: 0009-2770.
- Švehla, P., Pacek, L., Radechovská, H., Radechovský, J. 2016a. Sekundární vliv limitace kyslíku na zastoupení produktů nitrifikace při čištění odpadních vod. *Chemické listy*. 110 (2). s. 144 - 148. ISSN: 0009-2770.
- Švehla, P., Radechovská, H., Michal, P., Pacek, L., Tlustoš, P. 2016b. Řízení procesu nitrifikace kapalné frakce fermentačního zbytku s ohledem na další postup zpracování tohoto materiálu. Bratislava: Kaly a odpady 2016 17.3.2016. s. 95 - 102. ISBN: 978-80-970896-9-6.
- Švehla, P., Radechovská, H., Pacek, L., Michal, P., Hanč, A., Tlustoš, P. (2017). Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Management*. 64. 96-106.
- Švehla, P., Vargas, C.M.L., Michal, P., Tlustoš, P., 2020b. Thermal thickening of nitrified liquid phase of digestate for production of concentrated complex fertiliser and high-quality technological water. *J Environ Manage*. 276, 111250.
- Švehla, P., Tepelné zahušťování nitrifikovaného fugátu: technologie řešící problémy se skladováním a transportem fermentačního zbytku: certifikovaná metodika. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2021. ISBN 978-80-213-3155-6, s. 1-33
- Tlustoš P, Kaplan L, Dubský M, Bazalová M, Száková J. 2014. Stanovení fyzikálních a chemických vlastností pevných a kapalných složek digestátu bioplynových stanic, 1st. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Tomášek, K., 2007. Bioplynové stanice zvýší podíl čisté energie. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/bps-zvysi-podil-ciste-energie>. *CZ Biom*. ISSN 1801-2655.
- Treusch, A.H., Leininger, S., Kletzin, A., Schuster, S.C., Klenk, H.P., and Schleper, C. (2005) Novel genes for nitrite reductase and Amo-related proteins indicate a role of uncultivated mesophilic crenarchaeota in nitrogen cycling. *Environ Microbiol* 7: 1985–1995
- Villaverde, S., Fdz-Polanco, F., Garcia, P. A. 2000. Nitrifying biofilm acclimation to free ammonia in submerged biofilters. Start-up influence. *Water Research*, s. 602-610
- Vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva.
- Vyhláška č. 341/2008 Sb. o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady a o změně vyhlášky č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, (vyhláška o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady)

- Vyhláška č. 68/2022 Sb. Vyhláška o modernizaci podporované výroby elektřiny a postupech při úpravách zařízení výroby elektřiny
- Vítěz, T., Geršl, M., Mareček, J., Kudělka, J., Krčálová, E. 2013. Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastnosti půd. Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Wilken D., Rauh S., Fruhner-Weiß R., Strippel F., Bontempo G., Kramer A., 2018. Digestate as Fertilizer. Fachverband Biogas e.V. Germany. ISSN 2626-3475, s. 6-60
- Xu, J., Vujic, T., Deshusses, M. A. 2014. Nitrification of anaerobic digester effluent for nitrogen management at swine farms. Chemosphere. 117. s. 708 - 714.
- Zákon č. 156/1998 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, rostlinných biostimulantech a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech)
- Zákon č. 180/2005 Sb. ze dne 31. března 2005 O podpoře výroby elektřiny z obnovitelných zdrojů energie a o změně některých zákonů.
- Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů.
- Zákon č. 382/2021 Sb. Zákon, kterým se mění zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů.
- Zumft, W. G. 1997. Cell biology and molecular basis of denitrification. Microbiology and Molecular Biology Reviews: MMBR. 1997-12, roč. 61, čís. 4, s. 533–616. ISSN 1092-2172. DOI 10.1128/membr.61.4.533-616.1997