

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Racionální přístupy k nakládání s vedlejšími produkty
vznikajícími při provozu bioplynových stanic**

Bakalářská práce

Daridová Petra

Kvalita produkce

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

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

V Praze dne 27. 04. 2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Švehlovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, velmi vstřícný přístup a za čas strávený kontrolou několika zaslaných verzí. Zároveň chci poděkovat všem přátelům, kteří mi byli při psaní práce velkou oporou.

Vypracování předkládané práce bylo součástí aktivit spojených s řešením projektu podporovaného MZe ČR v rámci NAZV, registrační číslo projektu QK1710176. Pracoviště KAVR ČZU děkuje poskytovateli dotace za finanční podporu výzkumu.

Racionální přístupy k nakládání s vedlejšími produkty vznikajícími při provozu bioplynových stanic

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá problematikou zpracování a využití fermentačního zbytku, který je hlavním vedlejším produktem vznikajícím při provozu bioplynové stanice. Na začátku práce jsou popsány vlastnosti fermentačního zbytku a jeho vznik při anaerobní fermentaci. Fermentační zbytek se v některých objektech bioplynových stanic separuje na kapalnou a pevnou frakci. Práce popisuje různé metody separace pomocí několika typů odstředivek i separátorů a demonstruje rozdílné úpravy pevné a kapalné frakce. Zatímco pevná frakce se nejčastěji zpracovává kompostováním či sušením a nejčastěji se pak využívá ke hnojení zemědělské půdy nebo pro výrobu pevného paliva, frakce kapalná se může chemicky a biologicky upravovat a následně využít pro aplikaci jako hnojivo, jako užitkovou vodu pro zavlažování nebo jako živný roztok. V případě využití fermentačního zbytku, resp. jeho pevné a kapalné frakce, za účelem hnojení, existuje řada limitů a omezení, na které je v této práci kladen důraz. Práce se zabývá i problematikou ztráty dusíku a je zde zmíněno několik způsobů úpravy fermentačního zbytku, aby se zamezilo ztrátám dusíku během skladování fermentačního zbytku a jeho frakcí. Je zde určitý potenciál na zlepšení s nakládáním s pevnou frakcí, vzhledem k obsahu živin by se frakce mohla využívat i jako startovací půda pro rostliny. V oblasti zpracování a využití by mohly bioplynové stanice upravovat a skladovat fermentační zbytek v areálu a poskytovat ho zákazníkům na objednávku. Aplikace diskutovaného materiálu na zemědělskou půdu může vést ke zlepšení kvality produkce v rostlinné výrobě.

Klíčová slova: anaerobní fermentace, fermentační zbytek, digestát, fugát, alternativní hnojivo

Rational approaches to the management of by-products arising from the operations of biogas station.

Abstract

The bachelor's thesis deals with the issue of processing and utilization of fermentation residue, which is the main by-product arising during the operation of a biogas plant. At the beginning of the work, the properties of the fermentation residue and its formation during anaerobic fermentation are described. The fermentation residue is separated into a liquid and a solid fraction in some biogas plants. The work describes various methods of separation using several types of centrifuges and separators and demonstrates different treatments of solid and liquid fraction. While the solid fraction is most often processed by composting or drying and then often used to fertilize agricultural land or to produce solid fuel, the liquid fraction can be chemically and biologically treated and then used as a fertilizer, utility water for irrigation or as a nutrient solution. In the case of using the fermentation residue, resp. its solid and liquid fractions, for the purpose of fertilization, there are a number of limits and limitations that are described in this work. The work also deals with the issue of nitrogen loss. There are several ways to modify the fermentation residue to prevent nitrogen losses during storage of the fermentation residue and its fractions. There is potential for improvement in the management of the solid fraction. Due to its nutrient content, the fraction could also be used as a starting soil for plants. In the area of processing and utilization, biogas plants could process and store the fermentation residue in the area and provide it to customers on request. The application of the discussed material to agricultural

Keywords: anaerobic fermentation, fermentation residue, digestate, fugate, alternative fertilizer

Obsah

1 Úvod	8
2 Cíl práce	9
3 Vznik fermentačního zbytku a jeho složení.....	10
3.1 Anaerobní fermentace	10
3.2 Vstupní suroviny anaerobní fermentace	10
3.3 Charakteristika fermentačního zbytku	11
4 Úprava fermentačního zbytku	14
4.1 Souhrn technologií pro separaci fermentačního zbytku na jednotlivé frakce	15
4.2 Dekantační odstředivka.....	15
4.3 Šnekový separátor	16
4.4 Pásové lisy	17
4.5 Diskontinuální odstředivka.....	18
4.6 Odstranění přebytečných pevných látek z kapalné frakce	18
4.6.1 Srážení/flokulace	19
4.6.2 Flotace	19
4.6.3 Síta a filtry.....	20
5 Zpracování pevné frakce.....	21
5.1 Kompostování.....	21
5.2 Sušení	23
5.3 Thermochemické zpracování	24
6 Zpracování kapalné frakce	25
6.1 Chemická úprava.....	26
6.1.1 Nakládání s dusíkem obsaženým v kapalné frakci fermentačního zbytku	26
6.1.2 Iontová výměna.....	28
6.2 Nitrifikace	28
6.3 Odpařování.....	30
6.3.1 Vakuové odpařování.....	30
6.4 Membránová filtrace.....	32
7 Využití fermentačního zbytku	32
7.1 Hnojivo	33
7.1.1 Hnojení plodin fermentačním zbytkem	35
7.1.2 Hnojení pšenice seté	35
7.1.3 Hnojení kukuřice.....	37

7.1.4	Hnojení cukrové řepy	38
7.1.5	Aplikace	39
7.1.6	Skladování	40
7.1.7	Rizika spojená s hnojením fermentačním zbytkem a jeho složkami.....	41
7.2	Využití pevné frakce separovaného fermentačního zbytku.....	43
7.2.1	Hnojení pevnou frakcí	43
7.2.2	Pevné palivo	44
7.3	Využití separované kapalné frakce	45
7.3.1	Hnojení kapalnou frakcí	45
7.3.2	Opětovné využití kapalné frakce	45
7.3.3	Řasy	46
8	Závěr	49
9	Literatura	50

1 Úvod

S ohledem na nutnost snižování emisí skleníkových plynů a potřeby rozšiřování zemědělské činnosti dochází v posledních letech k rozvoji vzniku bioplynových stanic, kde se vyrábí bioplyn a vzniká sekundární produkt, jež se nazývá fermentační zbytek. Společně s ostatními obnovitelnými zdroji energie (kupříkladu větrné a sluneční elektrárny) mají bioplynové stanice v energetice nezanedbatelné postavení. V dnešní době se klade důraz na ekologii, a proto je nutné využívat dostupné obnovitelné zdroje energie. Bioplynové stanice se dělí podle druhu zpracovaných materiálů. Prvními jsou stanice zemědělské, jež zpracovávají pouze statková hnojiva (například hnůj, kejda a další) a vhodné rostlinné materiály (siláže, senáže, sláma a další). Druhými jsou bioplynové stanice ostatní, které mohou využívat i nezemědělské materiály jako jsou kupříkladu kaly z čistíren odpadních vod (ČOV) (Straka et al. 2009, Seadi et al. 2013, Dregs et al. 2015).

Jelikož je velké množství materiálů organické povahy a jejich využitelnost je malá, jsou často zpracovávány v bioplynových stanicích pomocí anaerobního rozkladu a výroby energie. Zemědělské podniky si pomocí výroby bioplynu mohou vylepšit svou ekonomickou situaci a fermentační zbytek využít pro hnojení, jehož pozitivní účinky jsou potvrzeny výzkumy (Wang et al. 2020, Dregs et al. 2015).

Bakalářská práce vznikla za účelem vytvoření souhrnu, jak lze s fermentačním zbytkem racionálně nakládat včetně jeho zpracování, úpravy a využití. Problematikou fermentačního zbytku se zabývají studie posledních několik let, protože jeho množství se zvyšuje a vyskytují se problémy s jeho racionálním nakládáním včetně skladování. Obsahuje mnoho cenných látek a jeho složení je zkoumáno za účelem různorodého využití, které je v práci popsáno.

2 Cíl práce

Hlavním cílem práce bylo vytvořit literární rešerši na téma Racionální přístupy k nakládání s vedlejšími produkty vznikajícími při provozu bioplynových stanic. Prezentovány byly různé metody a postupy zpracování vedlejších produktů provozu zemědělských bioplynových stanic. Důraz byl přitom kladen zejména na racionalizaci využití živin obsažených v těchto materiálech, přičemž byla pozornost soustředěna hlavně na zlepšení kvality produkce v rostlinné výrobě s využitím upravených vedlejších produktů provozu bioplynových stanic.

3 Vznik fermentačního zbytku a jeho složení

3.1 Anaerobní fermentace

V bioplynových stanicích probíhá složitý biologický rozklad organických látek pomocí mikroorganismů za vzniku bioplynu a fermentačního zbytku. Bioplyn se skládá ze směsi plynů a obsahuje dvě plynné majoritní složky, konkrétně metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2). Biologický proces rozkladu se nazývá anaerobní fermentace, resp. metanová fermentace, a je ovlivněn řadou procesních a materiálových parametrů, jako jsou například složení zpracovávaného materiálu, teplota prostředí, hodnota pH a další (Straka 2003, Kára et al. 2007).

První fáze anaerobního rozkladu organické hmoty začíná často v přítomnosti kyslíku a není uskutečňován vlastními methanogeny, což jsou organismy, jež jsou schopny produkovat metan. Dochází k hydrolytickému rozkladu makromolekulárních látek jako jsou polysacharidy, lipidy a proteiny. Tento rozklad probíhá jak za přítomnosti, tak i nepřítomnosti vzduchu, protože hydrolytické mikroorganismy ještě nevyžadují striktně bezkyslíkaté prostředí, ale dostatečný obsah vlhkosti (Straka 2003, Kára et al. 2007).

V další fázi dochází při acidogenezi k rozkladu jednoduchých cukrů a nižších alifatických kyselin a alkoholů. Pomocí fakultativně anaerobních mikroorganismů jsou zpracovány na organické kyseliny s kratším řetězcem, alkoholy a plyny s vysokým zastoupením oxidu uhličitého a vodíku. Fakultativně anaerobní mikroorganismy představují hydrolytické a acidogenní mikroorganismy, které vytvářejí plně anaerobní podmínky pro rovnovážný rozvoj symbiotických methanogenů a tvorbu metanu. Acidogeny produkují kyselinu octovou a směs vodíku a oxidu uhličitého, což jsou substráty pro výrobu metanu, jež probíhá pomocí tzv. acetotrofních methanogenů. Nárůst hodnoty pH je charakteristickým rysem probíhající methanogeneze. Přítomnost vodíku v bioplynu svědčí o narušení rovnováhy mezi acidogenními a methanogenními procesy. Mezi příčiny narušení rovnováhy patří kupříkladu přetížení reaktoru, pokles hodnoty pH či nevhodná skladba substrátu (Straka 2003, Kára et al. 2007).

3.2 Vstupní suroviny anaerobní fermentace

Kvalita vstupních surovin má velký vliv na kvalitu fermentačního zbytku. Vhodný substrát má nízký obsah anorganického podílu (popelovin) a organický materiál s vysokým

podílem biologicky rozložitelných látek. Nejlépe vyhovující obsah sušiny pro zpracování pevných odpadů je 22–25 %, v případě tekutých odpadů je obsah sušiny 8–14 %. Anaerobní fermentaci lze provádět i při 50% obsahu sušiny, z hlediska meze čerpatelnosti kapalného odpadu se uvádí výše zmíněná horní kapacita sušiny (Kára et al. 2007, Drogs et al. 2015).

Významný faktor, který ovlivňuje metanogenní fermentaci je hodnota pH materiálu. Optimální hodnota pH vstupního materiálu se pohybuje okolo 7–7,8. Vhodnost vstupních materiálů se hodnotí poměrem uhlíkatých a dusíkatých látek (Kára et al. 2007, Drogs et al. 2015). Mezi nejčastější vstupní suroviny se používají živočišné produkty (exkrementy zvířat), rostlinná biomasa (siláže, senáže), odpady ze zpracovatelského a potravinářského průmyslu (jatka, mlékárny atd.) a další (Michal 2005).

3.3 Charakteristika fermentačního zbytku

Fermentační zbytek je jeden ze dvou hlavních výstupů anaerobní fermentace při rozkladu materiálu organické povahy. Často ho označujeme jako digestát (Seadi et al. 2013). Složení fermentačního zbytku a jeho fyzikálně-chemické vlastnosti jsou závislé na provozních parametrech procesu anaerobní fermentace a na složení a povaze substrátu. Fermentační zbytek je tekutý, ale může být i pevný. Obsahuje velké množství rostlinných makroživin jako jsou dusík (N), fosfor (P), draslík (K) a síra (S), organickou hmotu a různé mikroživiny. Používá se k přímému hnojení plodin bez nutnosti dalších úprav. V porovnání s hnojivem na bázi exkrementů hospodářských zvířat má fermentační zbytek nižší celkový obsah organického uhlíku a pevných látek, nižší poměr uhlíku k dusíku a nižší viskozitu, naopak má vyšší hodnotu pH a vyšší obsah amoniakálního dusíku (N-amon) (Drogs et al. 2015).

Během anaerobní fermentace klesá obsah sušiny, oproti vstupnímu substrátu může fermentační zbytek obsahovat až o 50–80 % méně sušiny. Její obsah je závislý na obsahu snadno biologicky rozložitelné organické hmoty a na počátečním obsahu pevných látek v substrátu. Dřevnaté materiály obsahují vysoké množství ligninu (rostlinný polymer), díky němuž mají velmi nízkou biologickou rozložitelnost oproti substrátu, jenž obsahuje dobře biologicky rozložitelné sacharidy, alkoholy či tuky. Fermentační zbytek může být tvořen ze 70 % spalitelnými organickými látkami. Jako takový má potenciál zlepšit strukturu půdy díky vstupu těchto látek do půdy, především lignocelulózy, což je organické vlákno přispívající spolu s organickými látkami k vytváření humusu (Drogs et al. 2015).

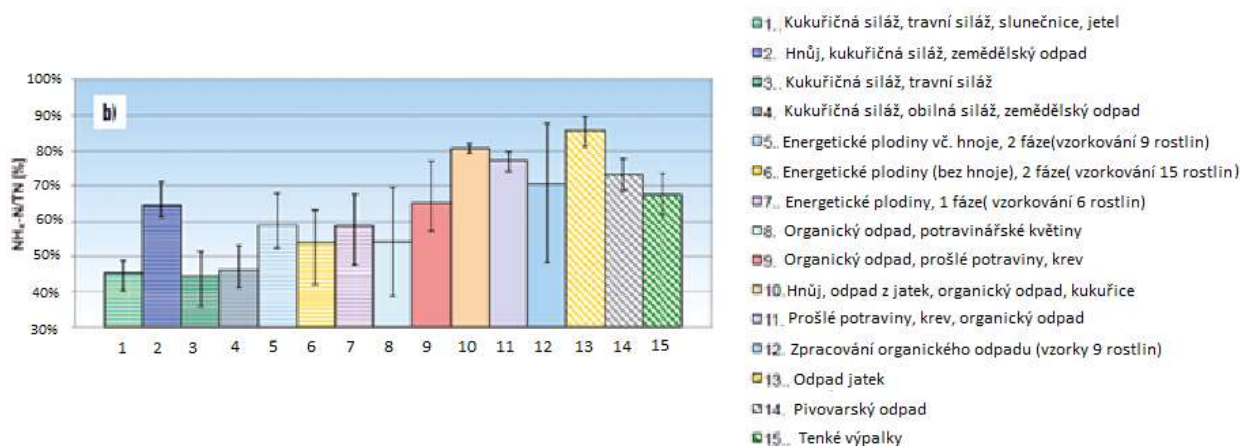
Hodnota pH se pohybuje v rozmezí od 7,5 do 8,0 a je ovlivňována biochemickým procesem anaerobní fermentace a vlastnostmi substrátu. Hodnota pH se zvyšuje následkem reakcí, mezi něž patří například odstranění oxidu uhličitého v důsledku přeměny uhličitánů ($\text{CO}_3^{2-} + 2 \text{H}_3\text{O}^+ \rightarrow \text{CO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O}$) a tvorba uhličitanu amonného. Hodnotu pH zvyšuje také spotřeba nižších mastných kyselin. Důsledkem srážení uhličitánů, jako je kalcit (CaCO_3) a fosforečnanů železa, je snižování hodnoty pH. Indikace degradace nižších mastných kyselin je zvýšené pH, což snižuje emise zápachu, ale zvyšuje stupeň těkavosti amoniaku. (Drogs et al. 2015).

Organické sloučeniny dusíku degradují procesem anaerobní fermentace a uvolňuje se amoniakální dusík (N-amon, dusík vyskytující se ve formě NH_4^+ a NH_3), který má výhodu pro pěstování rostlin okamžitou dostupností. Obsah N-amon ve fermentačním zbytku přímo souvisí s celkovým obsahem dusíku v substrátu. V porovnání má hnůj z exkrementů prasat větší obsah celkového dusíku než hnůj z exkrementů skotu.

Na obrázku č. 1 jsou uvedeny rozdíly v koncentraci dusíku obsaženého ve fermentačním zbytku z organického odpadu (kupř. zbytky potravin), energetických plodin a průmyslových vedlejších produktů (např. odpad z jatek). V případě energetických plodin jsou koncentrace dusíku dost podobné, ale při zpracování organických odpadů jsou větší rozdíly v koncentracích dusíku (Drogs et al. 2015). Obsah fosfátu neovlivňuje proces anaerobní fermentace, ale pouze substrát. Při společném zpracování substrátu s vysokým (prasečí hnůj) a nízkým obsahem fosfátů bude jejich obsah nižší (Drogs et al. 2015).

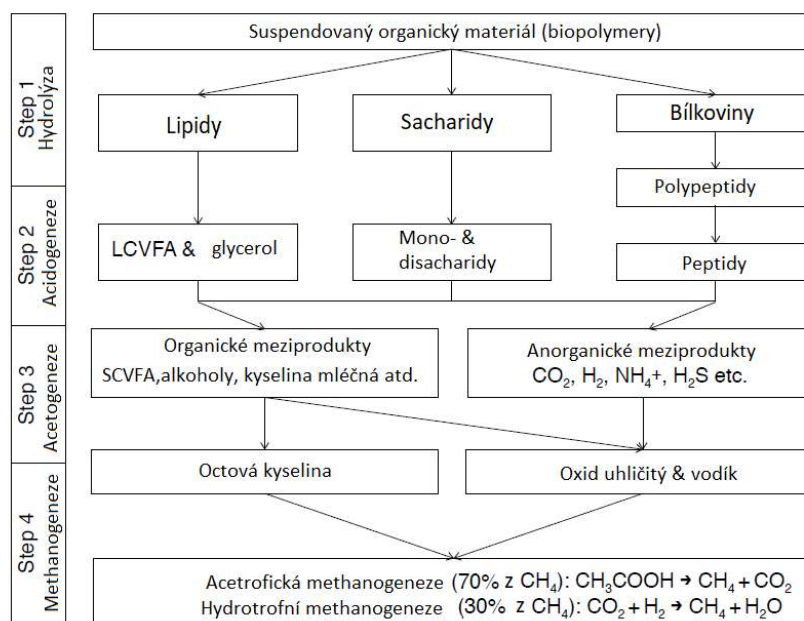
Fermentační zbytek může obsahovat nečistoty i problematické vlastnosti (kyselost, elektrická vodivost, teplota) chemické (u těžkých kovů) nebo biologické (patogeny) povahy. Během procesu anaerobní fermentace mohou být biologické kontaminanty (třeba patogeny) degradovány, což závisí na teplotě a době zdržení zpracovávaného materiálu. Při teplotě 52 °C po minimálně 10 hodin zdržení zpracovávaného materiálu dojde ke srovnatelnému odstranění patogenních organismů jako při 70 °C po dobu jedné hodiny – v obou případech se odstraní většina problematických patogenů. Obsah kontaminantů není ovlivněn procesem anaerobní fermentace, ovšem přítomnost nečistot a kontaminantů je riziková pro životní prostředí a má negativní dopad na využití fermentačního zbytku jako hnojiva, jeho kvalitu a vhodnost. Těmto problémům se může předejít výběrem nekontaminovaných substrátů (Drogs et al. 2015).

Obsah pachových látek je výrazně snižován procesem anaerobní fermentace až o 80 % ze surovinových substrátů. Těmito látkami jsou například nižší mastné kyseliny, fenoly a jejich deriváty. Jedná se jak o snížení intenzity a přetrvávání pachů, tak o změnu složení pachů, jež je pozitivní. Snížení obsahu pachových látek způsobuje, že fermentační zbytek nemá nepříjemný zápach kalu, ale je cítit například amoniakem. V případě dlouhodobějšího skladování nedochází ke zvyšování produkce zápachu a do 12 hodin po aplikaci fermentačního zbytku zápach téměř zmizí (Seadi et al. 2013).



Obrázek č. 1: Koncentrace dusíku (Drogs et al. 2015)

Fermentační zbytek vystupuje z reaktoru anaerobní fermentace jako sekundární produkt a představuje zpracovaný substrát obsahující poměrně velké množství vody. Nejčastěji je tekutý, ale může mít i pevnou hmotu, pokud vystupuje v suchém stavu. Substrát, který vkládáme do procesu anaerobní fermentace, může být směsí několika složek. Uvnitř anaerobního reaktoru je substrát zadržován po dobu několika týdnů, kdy je postupně biochemickým procesem za nepřítomnosti kyslíku rozkládán řadou mikroorganismů (anaerobní podmínky). Jak již bylo zmíněno výše, na obrázku č. 2 je vidět propojení čtyř hlavních kroků: hydrolýzy, během níž se rozkládá organická hmota, acidogeneze, jež tvoří organické kyseliny, acetogeneze tvořící hlavní meziprodukt acetátu, a nakonec methanogeneze, která vytváří methan z acetátu nebo oxidu uhličitého a vodíku (Drogs et al. 2015).



Obrázek č.2: Rozklad organické hmoty (Drogs et al. 2015)

Fermentační zbytek vystupující z anaerobní fermentace obsahuje 0,4–0,7 % dusíku, 0,15–0,25 % oxidu fosforečného (P_2O_5), 0,3–0,5 % oxidu draselného (K_2O) ve vlhké hmotě a 6–9 % obsahu sušiny (ÚKZÚS 2016).

V případě využití fermentačního zbytku za účelem hnojení se řídíme zákonem č. 61/2017 Sb., o hnojivech. Pokud je dále zpracováván jako organické hnojivo a aplikuje se na půdu, postupuje se podle platných předpisů, jež uspořádají problematiku zemědělství. Skladování a použití hnojiv specifikuje vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv (Škorvan et al. 2012).

Dle vyhlášky č. 237/2017 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva je fermentační zbytek takzvané organické hnojivo typové (konkrétně typ 18.1 e), musí tudíž splňovat limitní hodnoty rizikových látek. Pokud fermentační zbytek neaplikujeme na zemědělskou půdu za účelem hnojení, hovoříme o odpadu, případně o rekultivačním fermentačním zbytku, který se používá mimo zemědělkou a lesní půdu a jako takový zahazuje nežádoucí antropogenní zásahy krajiny. Postupujeme tedy podle zákona č. 541/2020 Sb., o odpadech a jeho prováděcích předpisů (Škorvan et al. 2012).

4 Úprava fermentačního zbytku

Fermentační zbytek lze použít bez dalšího zpracování, má však velký objem a nízký obsah sušiny, proto zemědělcům způsobuje značné náklady na skladování, přepravu,

manipulaci a aplikaci. Obsahuje také velké množství snadno dostupného dusíku pro rostliny, jehož aplikace je omezená z důvodu nebezpečí eutrofizace vod (Seadi et al. 2013).

Nejčastější formou zpracování fermentačního zbytku je jeho separace na kapalnou a pevnou frakci. Kapalná frakce se označuje jako fugát a pevná frakce jako separát (Seadi et al. 2013). Pevná frakce obsahuje do 20–30 % sušiny. Pokud se fugát využívá jako hnojivo, dochází k pomalému uvolňování dusíku, dále se může zpracovávat pro výrobu kompostů, sušených výrobků, substrátů, alternativních paliv či steliva (ÚKZÚS 2016).

Obsah sušiny kapalné frakce je do 3 %. Pokud se separát využívá jako hnojivo, dusík se uvolňuje rychle. Separát se někdy vrací zpět do technologie bioplynové stanice (ÚKZÚS 2016). Při hnojení kapalnou frakcí se nedoporučuje přímá aplikace na mladé rostliny, protože vede k jejich poškození, a aplikuje se až v pozdějším období růstu (Roy et al. 2016).

4.1 Souhrn technologií pro separaci fermentačního zbytku na jednotlivé frakce

Prvním krokem při zpracování fermentačního zbytku je oddělení pevné fáze od kapalné. Pro zlepšení separace se mohou využívat srážedla (Seadi et al. 2013). Nejdříve je potřeba provést separaci pevné látky, kapaliny. Tím se rozumí rozdělení kapalného fermentačního zbytku na pevnou složku s vysokou sušinou a kapalnou frakci s nízkou sušinou. Při oddělení pevné a kapalné frakce se separuje i většina fosforu v pevné frakci a dusíku v kapalné frakci. Frakci, která je bohatá na fosfor, lze sušit, kompostovat a používat na zlepšení půdy, pro průmyslové účely nebo spalovat pro energetické využití. Například v Irsku je fosfor omezující živinou pro eutrofizaci, pro ně je separace výhodná, protože mohou aplikovat pouze pevnou frakci s vysokým obsahem fosforu (Seadi et al. 2013).

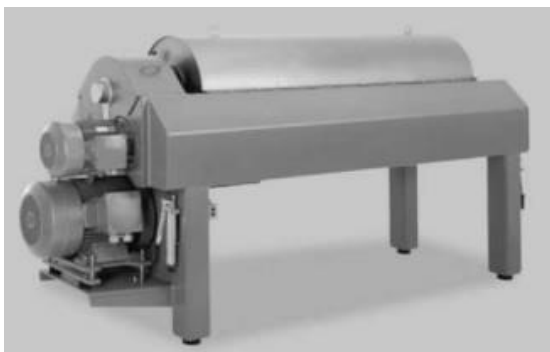
Existuje celá řada technologií k separaci pevné (kapalné) frakce, které budou v následující kapitole představeny. Jedná se mimo jiné o dekantální odstředivku, šnekový separátor, pásové lisy a další (Seadi et al. 2013).

4.2 Dekantální odstředivka

Při zpracování fermentačního zbytku se často používají dekantální odstředivky (viz obrázek č. 3), jež se využívají k oddělení malých částic a koloidů od kapalné frakce fermentačního zbytku a k oddělení většiny fosforu obsaženého v pevné frakci. Centrálním

vstupem se fermentační zbytek přivádí přímo do středu odstředivky, kde jsou odstředivou silou odděleny pevné částice. Separační výkon je závislý na tvaru a velikosti částic, rozdílech v hustotě mezi částicemi a tekutinou a také na viskozitě tekutiny. Na stěnách válce se hromadí separované částice, které jsou transportovány a dále stlačovány šroubem. Pevná frakce opouští dekantační odstředivku na konečném výstupu (pravá strana na obrázku č. 3). Ve srovnání s jinými technologiemi má separace poměrně vysokou spotřebu energie (3–5 kWh/m³) (Drogs et al. 2015).

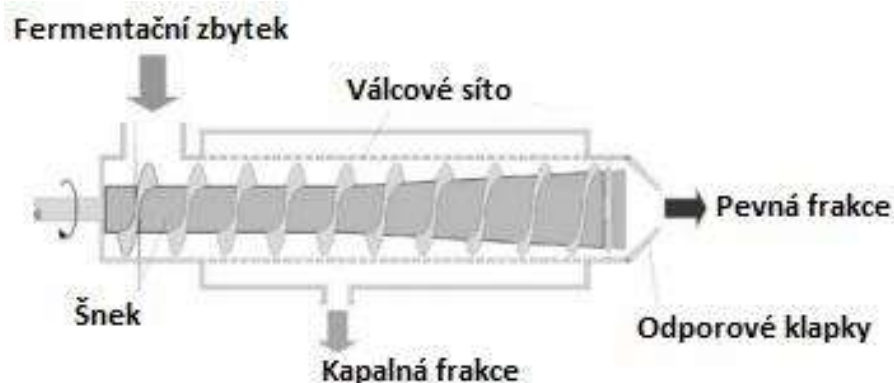
Danetv (2010) provedli testy dekantačních odstředivek s pěti variantami jednotlivých množství fermentačního zbytku, kdy se každá varianta opakovala 4krát. Všechny šarže měly změněný objem/hmotnost vstupního fermentačního zbytku, byla změřená také hmotnost kapalně a pevně výstupní frakce. Koncentrace pevných látek a živin byla stanovena analýzou jak vstupního toku, tak i kapalného a pevného výstupního toku a zpracovalo se 283 m³ fermentačního zbytku (Drogs et al. 2015).



Obrázek č. 3: Dekantační odstředivka (Seadi et al. 2013)

4.3 Šnekový separátor

Šnekový separátor lze nalézt spíše ve středních a větších bioplynových stanicích. Jako takový je významný při zpracování energetických plodin, které mají vysoký obsah vlákniny, existuje zde tedy úzce spojený obsah sušiny s množstvím pevné frakce. Účinnost této separace ovlivňuje obsah vlákniny a výše zmíněná sušina (Seadi et al. 2013). Síta oddělují částice, které jsou větší než 1 mm. Šnek přitlačuje vlákna proti válcovému sítu (viz obrázek č. 4) a kapalná frakce fermentačního zbytku opouští separátor sítím Drogs et al. (2015). Tento separátor má nižší investiční náklady a menší spotřebu energie v porovnání s dekantační odstředivkou (Seadi et al. 2013).

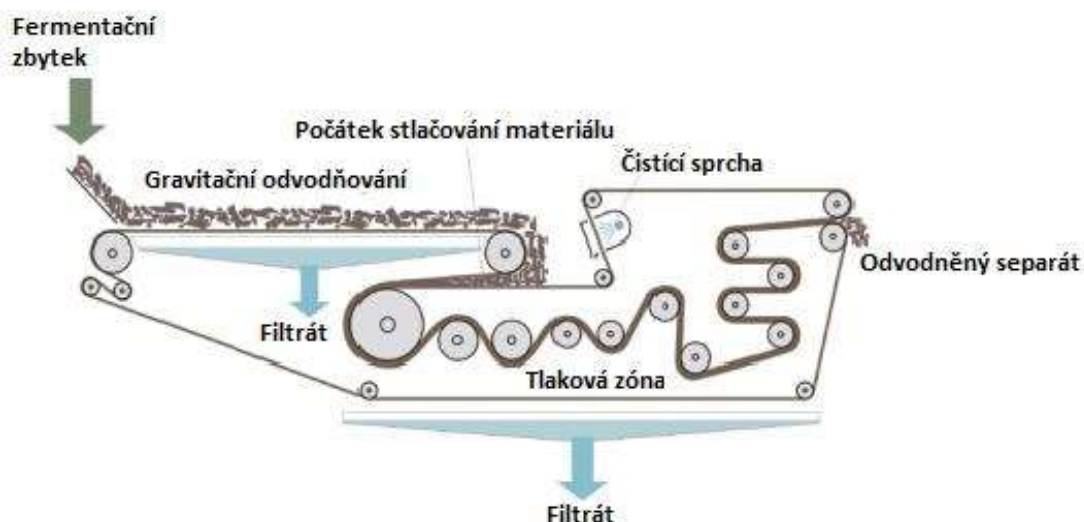


Obrázek č.4: Šnekový separátor (Seadi et al. 2013)

4.4 Pásové lisy

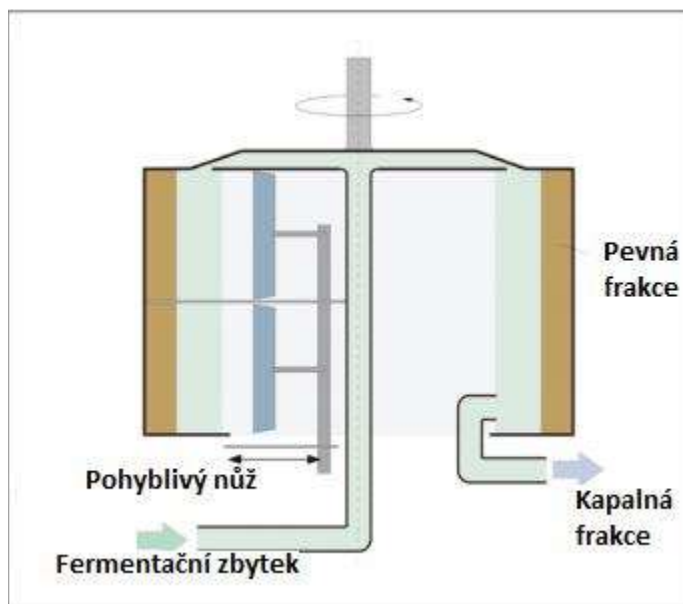
Pásové lisy jsou dvojího typu, vakuové pásové lisy a pásové filtrační lisy. Značně se od sebe odlišují. U vakuového pásového lisu se fermentační zbytek sune po filtračním páse, na jehož spodní straně je vakuum a pomocí něhož se voda vtahuje přes filtrační koláč. Pro zvýšení účinnosti separace přes pásové lisy se musí přidat srážecí a flokulační činidla, účinnost také ovlivňuje velikost ok filtru. Při porovnání se šnekovým separátorem mají pásové lisy vyšší separační účinnost a spotřebují méně energie oproti dekantační odstředivce. Mezi nevýhody se řadí použití relativně velkého množství flokulačních nebo srážecích činidel (Drogs et al. 2015).

V případě pásových filtračních lisů (viz obrázek č. 5) se při separaci fermentačního zbytku využívá nejdříve gravitace a následně je fermentační zbytek stlačen mezi dva filtrační pásy. Při odvodňování stlačenými pásy se využívá různé mechanické síly a po odvodnění se odstraňuje mechanickým zařízením (Drogs et al. 2015).



4.5 Diskontinuální odstředivka

Tento typ odstředivky využívá cyklů (dávek), jež vždy odstředí určité množství neustále přidávaného fermentačního zbytku. Odstředěná kapalná fáze odstředivku opouští a zůstává pevná frakce, která se odstraňuje na konci každého cyklu (viz obrázek č. 6), načež se spustí nový cyklus. V porovnání s dekantací odstředivkou má ta diskontinuální vyšší spotřebu energie, ale účinnosti jsou srovnatelné, nicméně je možné dosáhnout vyšší koncentrace pevných látek v pevné frakci. Diskontinuální odstředivka může být plně automatizovaná, avšak v praxi je velice málo využívaná (Drogs et al. 2015).



Obrázek č. 6: Diskontinuální odstředivka (Drogs et al. 2015)

4.6 Odstranění přebytečných pevných látek z kapalně frakce

Pro odstranění zbývajících pevných látek kapalně frakce se využívají následné procesy. V případě dalšího zpracování kapalně frakce kupříkladu membránovým procesem je to nezbytné. Využití srážení/flokulace, flotace nebo použití sít a filtrů patří mezi přídatné separační technologie, jejich využití závisí na celkové koncepci zpracování fermentačního zbytku (Drogs et al. 2015).

4.6.1 Srážení/flokulace

Pro zvýšení účinnosti separace pevných částic se často přidávají srážecí činidla a flokulanty. Po separaci pevných látek a kapalin lze následně zvážit samotný krok srážení/sedimentace (Drogs et al. 2015). Malé suspendované částice ve fermentačním zbytku zůstávají v kapalně frakci, protože jsou obvykle záporně nabitě. Polaritu využívají flokulanty a srážecí činidla, dochází k agregaci kolem částic pozitivně nabitými ionty a ke tvorbě větších částic (koagulaci), zvětšené částice lze pak snadněji oddělit. Přidáním organických polymerů se zlepší flokulační vlastnosti. Často používaná srážecí činidla jsou například síran hlinitý ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), síran železitý $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, chlorid železitý (FeCl_3) či vápno. Dávkování lze provádět před separací pevné látky – kapaliny v míchacích nádržích nebo se vstřikují přímo do přenosových potrubí (Drogs et al. 2015).

Zatím nejsou dostupná data spojená s potenciální toxicitou a účinkem některých polymerů při použití na zemědělskou půdu, ale byla upřesněna rychlost biologického rozkladu povolených polymerů, degradují se z 20 % do dvou let (Drogs et al. 2015).

4.6.2 Flotace

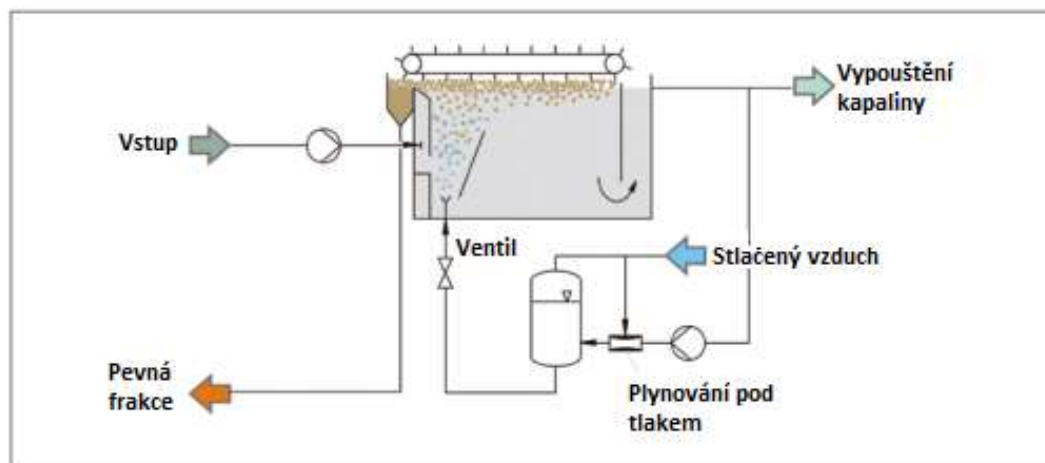
Princip flotace spočívá v tom, že se zvedací síla suspendovaných částic zvyšuje k nim připojených malých plynových bublin. V důsledku toho jsou zvednuty na povrch, kde vytvářejí plovoucí vrstvu, již lze poté sklízet. Při zpracování fermentačního zbytku se flotace používá málokdy kvůli dodatečným nákladům (Drogs et al. 2015). Princip procesu flotace spočívá v zavedení jemných vzduchových bublin do kapalně fáze – bubliny přilnou k jednotlivým částicím, čímž vytváří aglomeráty bublina-částice, které mají nižší hustotu než kapalina (Drogs et al. 2015).

Nanobubliny přítomné ve fermentačním zbytku mohou být hlavním zdrojem vztlakové síly (Wang et al. 2020). Během flotace se připojují malé plynové bubliny k vztlakové síle suspendovaných částic, jež se tím zvyšuje. Na povrchu vytvářejí plovoucí vrstvu, která je stírána. V porovnání se sedimentačním zařízením flotační zabere o 30–50 % méně prostoru, protože sedimentační síla je výrazně menší než síla vztlaková.

Používá se flotace dekompresí nebo vháněním plynu (Drogs et al. 2015). Při procesu dekompresní flotace se vstřikuje tlaková voda nasycená vzduchem do flotační komory a k tvorbě mikrobublinek dochází náhlým snížením tlaku (Drogs et al. 2015). V případě vhánění

plynu pod tlakem (viz obrázek č. 7) se vytvářejí malé vzduchové bublinky pomocí vstřikování vzduchu speciálními tryskami (Drogs et al. 2015).

K dosažení požadované účinnosti flotačních procesů je nutné přidat flotační činidlo (Drogs et al. 2015), které upravuje povrchové napětí mezi povrchy a ovlivňuje smáčivost flotovaných materiálů. Dělí se na pět kategorií: sběrače, pěniče, modifikátory, aktivátory a depresory (Basařová et al. 2005).



Obrázek č. 7: Proces flotace (Drogs et al. 2015)

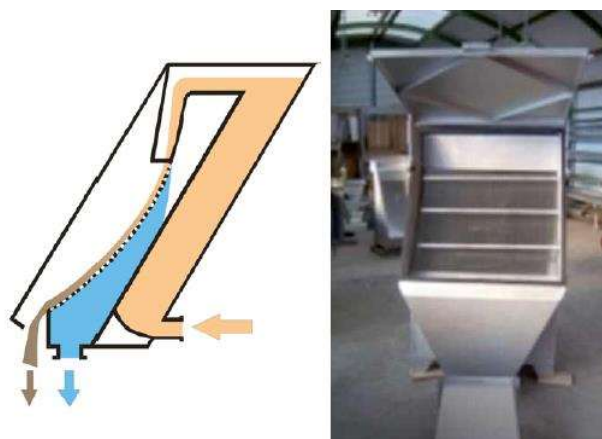
4.6.3 Síta a filtry

Fermentační zbytek se běžně zpracovává pomocí vibračního síta (obrázek č. 8) a vibračního zakřiveného síta (obrázek č. 9). Na síto se nanese kapalná frakce fermentačního zbytku, všechen pevný materiál zůstane na povrchu síta a kapalná frakce protéká přes síto (Drogs et al. 2015). Účinnost dělení ovlivňuje rozdělování částic na povrchu síta (Zhao et al. 2020). Pomocí vibrací se zabraňuje rychlému ucpání sít a urychluje se celý proces, protože veškerý pevný materiál zůstává na sítu a kapalná frakce se aplikuje na síto.

Pro vibrační síta se nejčastěji používají oka o velikosti 150–250 μm a pro zakřivená síta 100–300 μm . Pokud jsou oka příliš malá, rychle se ucpou. Mohou se zde využít také bezpečnostní filtry pro zadržení větších částic. Filtry se využijí při zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku kupříkladu před membránovým systémem (Drogs et al. 2015). Optimalizaci výkonu vibrujícího síta studovali Chen et al. (2020), kteří pro optimalizaci prosévání navrhli hybridní algoritmus.



Obrázek č. 8: Vibrační síto (Drogs et al. 2015)



Obrázek č. 9: Vibrační zakřivené síto (Drogs et al. 2015)

5 Zpracování pevné frakce

„Pevná frakce, vznikající při separaci pevná látka-kapalina, vykazuje koncentrace TS (Total Solids, celkový obsah sušiny) v rozmezí 20–30 %.“ (Drogs et al. 2015). Pevnou frakci lze využít různými způsoby. Podle Drosg et al. (2015) se snadno skladuje a lze jí využít přímo jako biohnojivo nebo prostředek pro zlepšení vlastností půdy. Mikrobiální aktivita může vykazovat tvorbu emisí zápachu, protože zahrnuje biologicky aktivní materiál. S pevnou frakcí se může nakládat různými způsoby: buď je použita přímo jako zdroj živin pro rostliny, nebo je dále zpracovávána například kompostováním nebo sušením (Seadi et al. 2013).

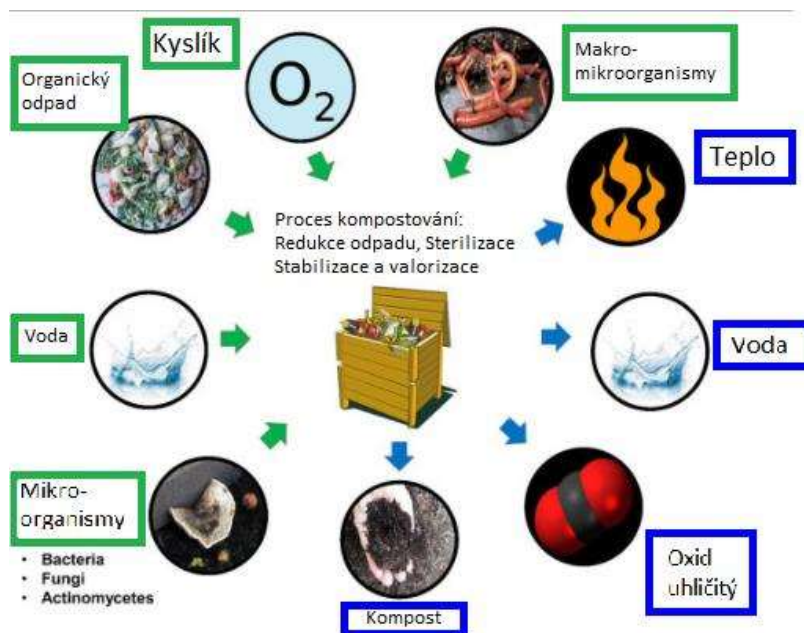
5.1 Kompostování

Kompostování probíhá aerobním rozkladem pomocí mikroorganismů a jejich aktivity. Výsledný produkt se nazývá kompost. Vznikají také další látky, mezi něž patří voda a oxid

uhličitý, může se také uvolňovat teplo, jak je ukázáno na obrázku č. 10 (Chia et al. 2020). Kompost je organická hmota s obsahem huminových látek, jež pomalu uvolňuje živiny, proto je ideálním biohnojivem (Drogs et al. 2015). Pevná frakce fermentačního zbytku zpracovaná kompostováním obsahuje uhlík ve formě huminových sloučenin, kde dominují huminové kyseliny, a proto významně obohacuje půdu o zvlhčenou organickou hmotu (Slepetiene et al. 2019). Mezi výhody kompostování jakožto metody pro zpracování pevné frakce fermentačního zbytku patří snížení eroze, zvýšení organické půdní hmoty, zadržování vody a fyzická struktura půdy (Giuseppe et al. 2020).

Pevná frakce fermentačního zbytku má stále vysoký podíl vlhkosti, je nutné ji pro vznik kompostu obohatit objemnými materiály, třeba štěpkou, jež napomáhají prostupu vzduchu a udržení aerobních podmínek při kompostovacím procesu. Při dostatečném množství objemových materiálů lze pevnou frakci využít několika způsoby, například kompostovat v kompostovacím zařízení nebo pomocí žížal při vermikompostování. Při procesu kompostování pevné frakce se může metabolickou přeměnou způsobenou mikroorganismy ztrácet dusík, je zde ale vyšší koncentrace živin, protože dochází k rozkladu složitých organických sloučenin na jednodušší anorganické a tím přístupnější pro rostliny (Drogs et al. 2015).

Rehl & Müller (2011) prezentovali, že pevná frakce fermentačního zbytku se ukládá na hromady s obsahem sušiny cca 25 %, kde probíhá kompostování po dobu deseti týdnů. Kvůli provzdušňování se občas míchá, jinak probíhá v uzavřených řádcích. Kompost se navlhčuje drenážní vodou, jež se shromažďuje v drenážních systémech. Během procesu kompostování se ztrácí v průměru 50 % uhlíku a 80 % počátečního obsahu vody, výsledný kompost pak obsahuje 57 % sušiny. Komposty lze dále zpracovat a jejich lisováním vytvořit tzv. pelety, které usnadňují přepravu a skladování díky sníženému objemu. Jejich výhodou je i snížení tvorby prachu, delší skladnost a možnost přidat chemické přísady a tím zlepšit kvalitu pelet (Yi Chia et al. 2020).



Obrázek č.10: Proces kompostování (Chia et al. 2020)

5.2 Sušení

Sušením se zpracovává pevná frakce fermentačního zbytku, aby se usnadnilo skladování a následná přeprava (Pantelopoulos et al. 2016).

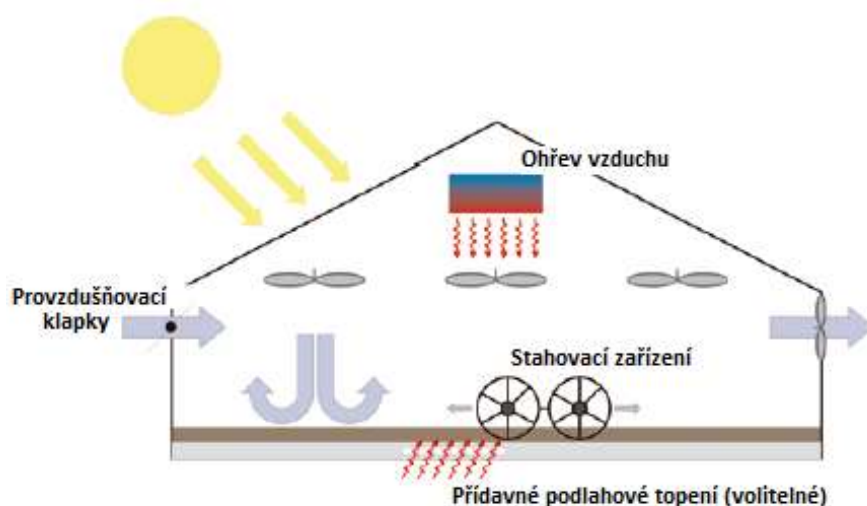
Tímto procesem se zvyšuje koncentrace živin a lze jej provádět přímo v bioplynové stanici. Pokud vyrábí energii, je možno využít její přebytečné teplo. Při procesu sušení neseptovaného fermentačního zbytku není možné jej vysušit úplně, pouze do 80–90 % obsahu sušiny, protože přebytečné teplo produkované v rámci provoz bioplynové stanice zpravidla k jeho účinnějšímu vysušení nestačí. Častěji se používá sušení separované pevné frakce pomocí různých typů sušáren (pásové či bubnové), jejichž alternací je solární sušicí program, který je vysvětlen na obrázku č. 11 (Drogs et al. 2015).

V případě pásové sušárny se míchá již vysušený materiál s neupraveným fermentačním zbytkem, aby byl obsah vody kolem 20 %. Tento proces nazýváme homogenizace: fermentační zbytek odchází ze sušárny s 85% průměrným obsahem sušiny, následně je uskladněn v meziskladu a může být dopraven do peletizačního zařízení. Před vytvořením pelet se přidává škrob a vápenná mouka, aby se dosáhlo optimální konzistence pelet, následně jsou baleny po 50 kg a lze je využít na hnojení v zemědělství, zahradnictví a krajinářství (Rehl & Müller 2011).

Při volbě bubnové sušárny je fermentační zbytek mechanicky předupraven, než se nanese jako tenký film na rotující buben. Produkt se na povrchu vysuší pomocí otáčení

a zahřívání vevnitř, toto teplo je dodávané spalováním zemního plynu v tepelné elektrárně. Po zaschnutí se zpracovává stejným způsobem jako vysušený materiál získaný z pásové sušárny (Rehl & Müller 2011). V solární sušárně je fermentační zbytek mechanického vysoušení ve skleníkovém systému, který je pokryt průhlednými polykarbonátovými deskami. Během sušení je fermentační zbytek provzdušňován ventilátory a míchán (Rehl & Müller 2011).

Pantelopoulos et al. (2016) sledovali, jak ovlivní okyselení ztráty dusíku po vysušení fermentačního zbytku. Zjistili, že pokud se fermentační zbytek okyselí na pH okolo 6,5–5,5 v rámci předúpravy k tepelnému sušení, sníží se ztráty dusíku. Sušený neokyselený pevný substrát dosahoval 95 % snížení obsahu N-amon, ale okyselená pevná frakce vykazovala postupné snižování ztráty N-amon a bylo zachováno významně více N-amon (72,8 % a 82,9 %). Kyselost neovlivnila rychlost sušení, ale zvýšila koncentraci živin, což je žádoucí (Pantelopoulos et al. 2016).



Obrázek č.11: Solární sušící program (Drogs et al. 2015)

5.3 Termochemické zpracování

Možnosti využití termochemického zpracování jsou omezeny, používají se ale dva procesy: hydrotermální karbonizace a pyrolýza. Hydrotermální karbonizace je termochemický proces, jenž se může použít pro přeměnu biomasy na materiál, který je bohatý na uhlík a má vysokou nutriční hodnotu se zlepšenými hnojivými vlastnostmi. Proces probíhá při 200 až 250 °C v podkritické vodě pod tlakem nasycení a jeho výsledkem je účinná hyrolýza a dehydratace biomasy s konečným produktem, jež nazýváme biouhel, resp. biochar. Pyrolýza je naopak

termický rozklad s produktem, který také nazýváme biouhel, a probíhá v rozmezí teplot 450 až 750 °C (Lee & Park 2020, Barampouti et al. 2020).

V případě spalování pomocí hydrotermální karbonizace pevné frakce fermentačního zbytku obsahuje vzniklý popel 20–25 % oxidu fosforečného, stopy dalších prvků (např. K, Si, Mg, Al) a některé těžké kovy (kupř. Cd, Zn, Cu). Uvádí se předpoklady na získání živin z popela, konkrétně u fosforu dosáhly 78% výtěžnosti (Barampouti et al. 2020). Při pyrolýze fermentačního zbytku z exkrementů hospodářských zvířat je prokázáno, že veškerý fosfor je zachycen v biouhlu. Při obnově živin vykazuje biouhel lepší vlastnosti ve srovnání s popelem ze spalování (Barampouti et al. 2020). Proces hydrotermální karbonizace podporuje imobilizaci a zadržení draslíku a dusíku nad 50 % v kapalně frakci. Biouhly mají schopnost pomalého uvolňování živin a imobilizaci oxidu uhličitého, proto může být jeho využití perspektivní možností (viz kapitola 7.2) (Barampouti et al. 2020).

Miliotti et al. (2020) použili ke zpracování fermentačního zbytku procesy hydrotermální karbonizace a pyrolýzy, z nichž získali pyrochar a hydrochar. Vlastnosti hydrocharu a pyrocharu splňují limitní hodnoty italské vyhlášky o hnojení. Hydrotermální karbonizace a pomalá pyrolýza představují možné cesty ke stabilizaci fermentačního zbytku. Výsledný produkt má vyšší hodnotu, je schopný dodat živiny zpět do půdy, snížit problémy spojené s eutrofizací a znečištěním životního prostředí, protože živiny zadrží v biouhlu před a po aplikaci na půdu.

6 Zpracování kapalně frakce

Kapalná frakce fermentačního zbytku je po separaci znečištěna množstvím pevných látek (Drogs et al. 2015). Je bohatá na živiny, konkrétně na hlavně dusík (N), fosfor (P) a draslík (K) (Wang et al. 2020), jejichž obsah je závislý na technologii separace a na složení substrátu (Drogs et al. 2015).

Kapalná frakce nesplňuje enviromentální standardy pro přímé vypouštění do recipientu. Částečně lze použít kapalnou frakci jako kapalinu pro ředění vstupujícího substrátu, který vstupuje do anaerobní fermentace za účelem dosažení jeho požadované sušiny. Použitelné množství je řízeno obsahem vody v substrátu a koncentračním účinku solí a N-amon, protože v anaerobním reaktoru by mohlo dojít k inhibici rozkladu organických látek v důsledku

toxického vlivu solí, resp. N-amon. Doporučuje se tedy opakovaně vracet část kapalné frakce, která se využívá jako procesní voda (Drogs et al. 2015).

V případě lokalizace kompostovacích zařízení v blízkosti bioplynových stanic lze kapalnou frakci využít k navlhčení kompostovacích hal. Za účelem snížení emisí amoniaku se doporučuje snížit koncentraci amoniaku před navlhčením (Drogs et al. 2015). Kapalnou frakci fermentačního zbytku lze upravit různými metodami, které jsou v této kapitole představeny (Drogs et al. 2015).

6.1 Chemická úprava

6.1.1 Nakládání s dusíkem obsaženým v kapalné frakci fermentačního zbytku

Zvýšený obsah N-amon v přírodních vodách je nežádoucí z důvodu jeho vysoké toxicity a dalších dopadů na životní prostředí. Dopady se myslí zhoršená kvalita vody (vyčerpáním kyslíku) a eutrofizace, čímž se ničí struktura ekosystému. Amoniak se odstraňuje pomocí procesů stripování plynem, strážení struvitu, iontovou výměnou a nitrifikací (Hu et al. 2020).

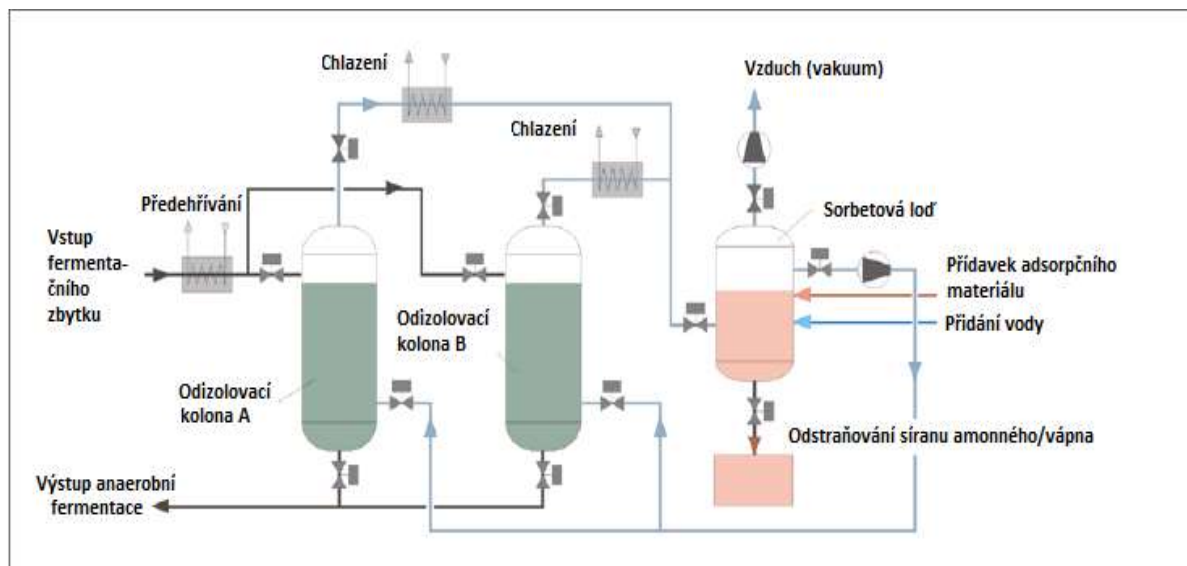
6.1.1.1 Stripování plynem

Při procesu stripování se odstraní těkavé látky z kapaliny prostupem plynu skrz kapalinu. V kapalné frakci je důležité odstranit nebo regenerovat dusík ve formě amoniaku. Při zvýšení teploty a hodnoty pH se může zvýšit těkavost amoniaku z vodného roztoku a přebytečné teplo lze využít pro zahřátí, po přidání alkálií (zvýšením hodnoty pH) se může zvýšit odplynění (odstranění CO_2) (Drogs et al. 2015).

Při stripování amoniaku se používají zejména procesy stripování vzduchem a pomocí vodních par. V prvním procesu (viz obrázek č. 12) vstupuje do stripovací kolony zahřátá kapalná frakce fermentačního zbytku, odstraněním oxidu uhličitého se sníží pufrační kapacita zpracovávaného materiálu a ve stripovací koloně se převede amoniak z kapalného fermentačního zbytku do proudu stripovacího plynu. Pro znovupoužití plynu ve stripovací koloně se musí vyčistit (Drogs et al. 2015).

Při použití stripování parou je zapotřebí vyšší teplota pro její výrobu. Při použití páry se může amoniak přímo kondenzovat s parou za vzniku amoniakové vody, která obsahuje 25-35 % amoniaku (Drogs et al. 2015).

Problém u stripování vznikne při ucpání kolony pevnými látkami, jež se předejde účinnou separací pevná látka – kapalina. Je důležité věnovat pozornost i čištění a údržbě kolony. Procesem stripování lze získat dusíkatý produkt pro hnojení, který vykazuje stabilní vlastnosti (Drogs et al. 2015).



Obrázek č. 12: Proces stripování (Drogs et al. 2015)

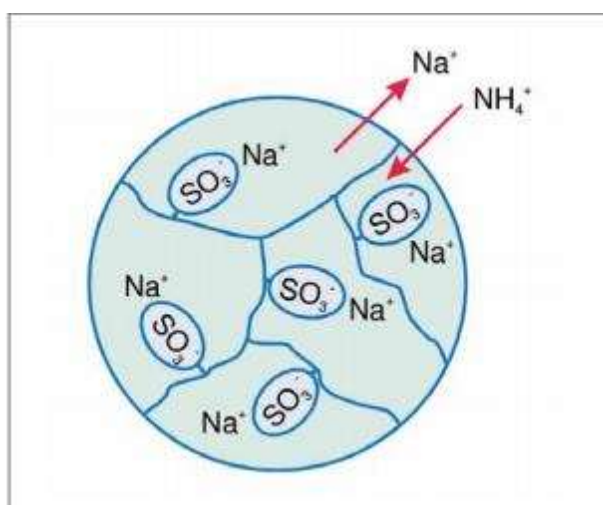
6.1.1.2 Srážení struvitu

Struvit je hexahydrát fosforečnanu amonno-hřečnatého ($\text{Mg}(\text{NH}_4)\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) bílé barvy a krystalické struktury, jenž se využívá jako pomalu se uvolňující hnojivo (Diwani et al. 2007). Během procesu zvaného MAP (srážení fosforečnanu amonného) dochází ke srážení struvitu, z jehož kapaliny se odstraní fosfát a N-amon. Přidáním přebytku hořčíku se dosáhne nejlepší regenerace živin, kdy je poměr látkové koncentrace živin zhruba 1,3:1:0,9 pro Mg:N:P. Ve fermentačním zbytku je amoniak téměř vždy v nadbytku, proto se přidává oxid hořečnatý a kyselina fosforečná, v závislosti na tom se zvyšuje pH na 8,5–9. Struvit vykazuje vynikající vlastnosti hnojiva díky obsahu dusíku, fosforu a hořčíku, které patří mezi cenné rostlinné živiny (Drogs et al. 2015).

Chemické látky se mohou přidávat dvěma způsoby: buď před separací sraženiny, nebo přímo do nádoby, kde dochází k usazování struvitových krystalů. Nevýhodou u tohoto typu srážení je vysoká spotřeba chemikálií, čímž se výrazně zvyšují provozní náklady. Chemikálie lze regenerovat, protože struvit při zahřátí nad 100 °C uvolňuje amoniak a vodu (Drogs et al. 2015).

6.1.2 Iontová výměna

Princip výměny iontů je naznačen na obrázku č. 13. Kvůli nabitým postranním řetězcům se pro iontovou výměnu jako materiál využívá hlavně pryskyřice. Koncentrace iontů v kapalině se sníží, protože nabité ionty (např. Na^+) navázané na pryskyřici postranními řetězci lze nahradit jinými ionty, jež jsou stejně nabité. V případě anaerobní fermentace může docházet k výměně s amonnými ionty (NH_4^+). Tyto pryskyřice obsahují veliké množství dutin. Z důvodu nahrazování iontů se pryskyřice musí zpětně regenerovat, kupříkladu pomocí roztoku chloridu sodného (NaCl) pro znovupoužití (Drogs et al. 2015). Pro využití iontové výměny musí být fermentační zbytek bez jakýchkoliv pevných částic (Drogs et al. 2015).



Obrázek č. 13: Iontová výměna (Drogs et al. 2015)

6.2 Nitrifikace

Kapalná frakce fermentačního zbytku obsahuje relativně velké množství celkového dusíku nejčastěji ve formě NH_3 a NH_4^+ . Kapalná frakce se ve většině případů skladuje v lagunách či v oblasti bioplynové stanice a slouží jako zdroj živin pro rostliny při aplikaci na půdu. Doba skladování je ovlivněna například velikostí a dostupností půdní výměry pro aplikaci. Fermentační zbytek má omezenou dobu aplikace na půdu v zimě, zejména z důvodu omezené možnosti dodávání dusíku do půdy (Svehla et al. 2019). Aplikace dusíku do půdy je řízena nitrátovou směrnicí vydanou Evropskou unií, jež chrání vody před znečištěním způsobeným dusičnany ze zemědělských zdrojů (Směrnice Rady 91/676/EHS).

Za účelem minimalizace ztrát dusíku při manipulaci s kapalnou frakcí fermentačního zbytku lze využít proces nitrifikace. Dusík se pomocí nitrifikace transformuje na oxidované

formy, a to konkrétně na N-NO_3^- a N-NO_2^- , který je stabilnější a nemělo by docházet k jeho ztrátám těkáním. Těkání amoniaku se dá zabránit snížením pH na hodnoty cca 5,5–7,0 někdy i nižší v důsledku procesu nitrifikace (Svehla et al. 2019).

Cílem Svehla et al. (2019) bylo porovnat ztráty dusíku při dlouhodobém skladování surové kapalné frakce fermentačního zbytku v nádržích, jež nebyly zakryté, a při skladování tohoto materiálu podrobeného nitrifikaci za srovnatelných podmínek. Ověřili, jak vliv teploty, tak i vliv mírného promíchání objemu akumulární nádrže na intenzitu ztráty dusíku, simulací nevětrných a větrných podmínek. Využili surový i nitrifikovaný kapalný fermentační zbytek ze zemědělské bioplynové stanice a provedli laboratorní testy simulující dlouhodobé skladování. Porovnali ztráty dusíku a jejich intenzitu zapříčiněnou těkáním amoniaku ze surové kapalné frakce.

Dominantní formou dusíku v kapalně frakci fermentačního zbytku podrobeného nitrifikaci byl N-NO_3^- s obsahem nejméně 99,2 %. Nitrifikovaná kapalně frakce obsahovala až 1000krát méně N-amon v porovnání se surovou kapalnou frakcí a tím zmenšili velké ztráty během skladování (Svehla et al. 2019).

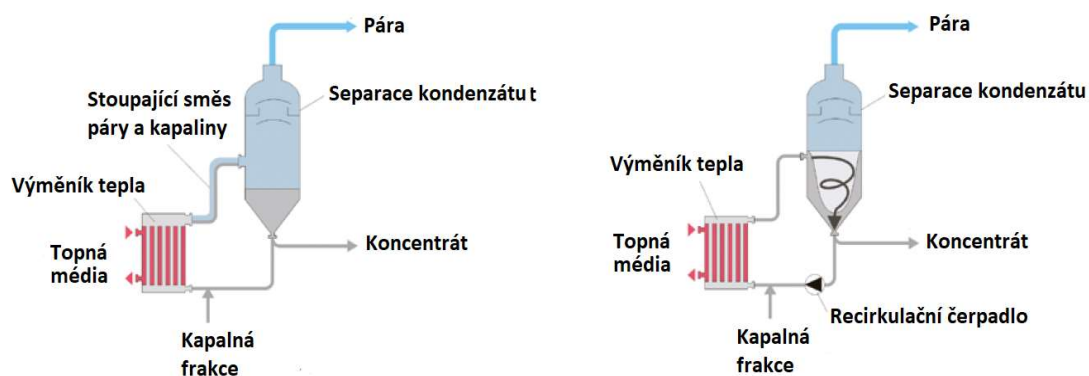
Svehla et al. (2017) se zabýval optimálními podmínkami nitrifikace kapalně frakce a diskutoval čištění bioplynu pomocí nitrifikované kapalně frakce jako zdroje akceptorů elektronů. Věnoval se hlavně kontrole účinnosti procesu nitrifikace, zastoupení finálního produktu a zrychlení náběhu procesu úpravy. Požadované snížení dusíku ve formě těkavých N-amon aspoň o 90 % s ohledem na minimalizaci ztrát dusíku. Během pokusů v reaktoru bylo ověřeno, že nitrifikaci lze provádět i za extrémních podmínek panujících ve fermentačním zbytku. Stanovil koncentrace důležitých živin (Ca, Mg, K) a některé rizikové prvky (např. Cd, Pb, Hg). Ve fermentačním zbytku ošetřeném procesem nitrifikace hrozí nebezpečí hromadění toxických dusitanů v důsledku kolísání pH. Pomocí regulace pH se obsah N-amon zmenšil až tisíckrát vůči obsahu v surové kapalně frakci.

Nitrifikovaná kapalně frakce se aplikují na půdu v období vegetace, protože během období bez vegetace vykazuje lepší výsledky surová kapalná frakce z důvodu vyšší mobility N-NO_3^- a pomalejšímu přenosu dusíku do přirozeného vodního zdroje. Proces nitrifikace může být použit i před tepelným zpracováním kapalně frakce jako předúprava pro minimalizaci ztrát transferu dusíku do destilátu při tepelném zahušťování (Svehla et al. 2017).

6.3 Odpařování

Odpařování je pro bioplynové stanice výhodné pouze v případě dostatečného množství přebytečného tepla produkovaného v rámci jejich provozu. Pokud by přebytečného tepla nebyl dostatek, muselo by být využito teplo z jiných zdrojů v okolí bioplynové stanice, což by ale významně zhoršilo ekonomickou bilanci bioplynové stanice. V Německu dostaly BS popud v podobě finančních prostředků na využití tepla, což vedlo k postavení několika odpařovacích zařízení (Drogs et al. 2015).

V praxi převládají odpařovače s nucenou cirkulací (viz obrázek č. 14 vlevo) nebo se využívají odpařovače s přirozenou recirkulací (viz obrázek č. 14 vpravo). Fermentační zbytek se zahřívá v tepelném výměníku na teplotu varu. Při nucené cirkulaci se k oběhu fermentačního zbytku využívá čerpadlo (Drogs et al. 2015).



Obrázek č. 14: Výparník s nucenou a přirozenou cirkulací (Drogs et al. 2015)

6.3.1 Vakuové odpařování

Vakuovým odpařováním se snižuje objem kapalného fermentačního zbytku díky varu při podtlaku, kdy je teplota nižší než při varu v atmosférických podmínkách (Vondra et al. 2018, Chiumenti et al. 2013). Tento způsob zpracování kapalné frakce s sebou nese značné výhody i nevýhody. Mezi výhody se řadí provozní spolehlivost a robustnost, naopak mezi nevýhody patří vysoká spotřeba energie, hlavně tepelné, která je v řádech stovek kWh na m³ kapalné frakce. V rámci anaerobní fermentace se získává značné množství tepla (obvykle ve formě horké vody), jež se může dále využít ve vakuové odpařovací technologii. Použije se jak odpadní teplo, tak i velký objem fermentačního zbytku (Vondra et al. 2018).

Při procesu vakuového odpařování se odpařuje voda a tím se zahušťuje ošetřený substrát. „Odpařená voda se poté kondenzuje ochlazením a shromažďuje se v nádrži na kondenzát“ (Chiumenti et al. 2013). Chiumenti et al. (2013) testoval jednostupňové a dvoustupňové systémy v pilotním měřítku a bez okyselení fermentačního zbytku. Stanovil chemicko-fyzikální vlastnosti jak vstupních, tak výstupních materiálů a hmotnostní bilanci a bilanci živin. Jednostupňový systém obsahuje odpařovací komoru o objemu 100 l, která je zahřívána pomocí výměníku tepla, jenž je připojen k systému tepelného čerpadla (Chiumenti et al. 2013).

Dvoustupňový systém obsahuje jednostupňový systém v první fázi a druhý stupeň zahrnuje odpařovací kolonu s kónickou základnou vybavenou škrabkou, která se stará o pohyb produktu. Využil nádrže z nerezové oceli a testoval tři různé způsoby zpracování. V první sérii testoval filtrovaný fermentační zbytek, který byl zahuštěn vakuově v jednostupňovém systému, ve druhé byl fermentační zbytek okyselen na pH 3,5 (H_2SO_4 35%) a použit jednostupňový systém, a třetí byla realizována za účelem snahy kompromisu mezi významnými ztrátami dusíku způsobenými stripováním amoniaku a velkou spotřebou kyseliny pomocí dvoustupňového systému provozovaného při hodnotě pH 5. Všechny série probíhaly do ukončení odpařování (Chiumenti et al. 2013).

Odpařování probíhalo při teplotě 35 °C, produktem jednostupňového systému byla hustá kapalina, přitom ve dvoustupňovém vznikl pevný koncentrát. V první sérii se odstranilo 78,1 % dusíku z fermentačního zbytku stripováním, přičemž tato část dusíku byla zpětně získána v kondenzátu, kdy koncentrovaná frakce obsahuje zbývajících 21,9 % dusíku. V druhé sérii (okyselení a jednostupňové) bylo v kapalně fázi zachyceno 99,2 % dusíku a ve třetí se dosáhlo kompromisu, protože koncentrát na konci obsahoval 97,5 % dusíku původně obsaženého ve fermentačním zbytku (Chiumenti et al. 2013).

Vondra et al. (2018) porovnal pomocí energetické a hmotnostní bilance více druhů výparníků a vyhodnotil, že vakuové odpařování může být řešením, jak nakládat se zvětšujícím se objemem fermentačního zbytku, a že je účinným způsobem zpracování.

6.4 Membránová filtrace

Membránová filtrace vzbudila v posledních letech pozornost, protože se pomocí ní mohou odstranit i částice a mikroorganismy (třeba prvoci či bakterie), které mohou být přítomny ve fermentačním zbytku, navíc regeneruje fermentační zbytek a koncentruje živiny v něm obsažené (Fernandes et al. 2020).

K oddělení částic od kapaliny se využívá filtr s velmi jemnými póry – lze použít v závislosti na velikosti částic mikro-, ultra-, nanofiltraci nebo reverzní osmózu. Membránová filtrace je založena na rozdílu tlaků mezi dvěma stranami membrány (filtru), přes níž je pomocí čerpadla proháněn fermentační zbytek. Během procesu membránové filtrace vznikají následující produkty: pevná frakce, ultrafiltrační retentát a koncentrát reverzní osmózy. Ultrafiltrační retentát se často recykluje do anaerobního reaktoru bioplynové stanice nebo za účelem snížení sušiny zpracovávaného substrátu. (Seadi et al. 2013).

Dle Fernandese et al. (2020) se zabýval membránovou filtrací k zhodnocení fermentačního zbytku, lze zředěním fermentačního zbytku dosáhnout vyšší rychlosti zachycování částic. V permeátu z nanofiltrace získal vyšší koncentrace uhlíku a dusíku oproti ultrafiltraci a mikrofiltraci.

Studie Zielińska & Galik (2017) se zabývala odstraněním organických sloučenin, barvy a zákalu a nerozpuštěných látek z kapalně frakce, za použití membránového systému, konkrétně mikrofiltrace, ultrafiltrace a jejich kombinací. Studie ukázala, že ke zmírnění znečištění membrány je nejúčinnější strategií použít nejdříve mikrofiltraci ke zmírnění znečištění a poté ultrafiltraci. Při kombinaci ultrafiltrace a mikrofiltrace dosáhli vyššího odstranění znečišťujících látek a ve dvoustupňovém systému dosáhli zvýšení průměrného toku filtrem asi o 80 % než v přímé ultrafiltraci.

7 Využití fermentačního zbytku

Fermentační zbytek má několik způsobů využití. Během anaerobní fermentace dojde ke změně organických sloučenin díky biochemickým změnám a zvyšuje se dostupnost živin pro plodiny. Rostoucí používání anorganických hnojiv je klíčové pro zvýšení zemědělské produkce ve světě. V procesu anaerobní fermentace je významné dosažení hodnotného sekundárního produktu (fermentačního zbytku). V případě využívání surovin ze zemědělsko-potravinářských

nebo jiných zdrojů je nutné dodat prohlášení o zajištění kvality, tj. prohlášení, která jsou v dané zemi požadovaná zákonem (Lukehurst et al. 2014).

7.1 Hnojivo

Fermentační zbytek vznikající při anaerobní fermentaci, je bohatý na živiny jako fosfor, draslík a dusík (Calábková et al. 2018). Fermentační zbytek je pro zemědělce atraktivní z ekonomického hlediska, protože si tím snižují náklady a závislost na průmyslových hnojivech (Giuseppe et al. 2020).

Dostupnost živin pro rostliny je ovlivněna skladbou materiálu vstupujícího do procesu anaerobní fermentace (Calábková et al. 2018). Aplikace fermentačního zbytku obecně zlepšuje odolnost vůči abiotickému stresu, zlepšuje úrodnost půdy, výnos rostlin a jejich kvalitu (Giuseppe et al. 2020). Fermentační zbytek je organické hnojivo, ale chemicky podobné minerálnímu. Obsah sušiny se pohybuje u zemědělských bioplynových stanic kolem 2–9 % (Calábková et al. 2018).

Je nutné hlídat obsah živin a těžkých kovů, jejich obsah je podle použitých surovin velice variabilní. Minerální dusík je pro plodiny k dispozici ihned po aplikaci. Hnojení fermentačním zbytkem povede ke zlepšení kvality produkce v rostlinné výrobě (Lukehurst et al. 2014).

Alburquerque et al. (2012) hnožil fermentačním zbytkem dvě zahradnické plodiny, meloun a květák, po dobu dvou vegetačních období a účinky porovnal s hnojivem minerálním a organickým (exkrementy hospodářských zvířat). Experiment prováděl ve Španělsku. Fermentační zbytek byl přidán ručně a okamžitě zapracován rotátorem do hloubky (30–40 cm), aby nedošlo k těkání amoniaku – po první aplikaci měla nejvyšší koncentraci celkového dusíku půda ošetřená fermentačním zbytkem a hnojem. Na konci experimentu mezi třemi druhy hnojiv nebyly nalezeny významné rozdíly v obsahu celkového dusíku.

Tržní výnos melounu při aplikaci minerálního hnojiva a fermentačního zbytku byl vyšší oproti statkovým hnojivům, v hmotnosti vyprodukované biomasy se téměř nelišily. U kvěťáku zjistili, že je velice citlivý na aplikaci dusíku a potřebuje dostatečný přísun během celého období. Aplikace fermentačního zbytku musí být i správně načasovaná s ohledem na požadavky rostlin a klimatické podmínky, v období dešťů se ztrácí vylouhováním (Alburquerque et al. 2012).

Markou et al. (2020) využili fermentační zbytek jako zdroj živin při pěstování sinice *Arthrospira platensis* (*Spirulina*) v umělé vytvořené mořské vodě s 2,5, 5, 10 nebo 15 % fermentačního zbytku v krmné dávce. Při vyšší dávce snižoval fermentační zbytek propustnost světla v růstovém médiu, ale řasy měly lepší fotosyntetické výkony.

Abelenda et al. (2020) se zabýval studií a vyhodnocením snížení dostupnosti a ztrát uhlíku a dalších živin použitím popela z biomasy s nízkým obsahem znečišťujících látek jako adsorbentu. Účelem bylo vytvořit směs s lepšími nutričními vlastnostmi pro růst plodin oproti fermentačnímu zbytku.

Lee et al. (2021) se zabýval nutriční hodnotou fermentačního zbytku a fermentačního zbytku doplněného o biouhel pro produkci switchgrass (*Panicum virgatum* L., tzv. jižanská tráva). Biouhel může zhodnotit fermentační zbytek a je výsledkem pyrolýzy biomasy. Jeho primární myšlenkou byla maximalizace ukládání uhlíku a zmírnění emise skleníkových plynů. Potvrdil, že fermentační zbytek nebo fermentační zbytek doplněný o biouhel mohou být potenciální náhradou chemického hnojiva. Také vyhodnotil, že ani jeden z těchto zbytků nepoškodil surovinu a oba měly pozitivní vliv na výtěžek biomasy. Při sklizni po 32 týdnech se významně zvýšila hmotnost rostlin díky zdrojům dusíku. Rostliny ošetřené fermentačním zbytkem doplněným biouhelem vykazovaly vyšší hmotnost oproti rostlinám ošetřeným pouze fermentačním zbytkem (Lee et al. 2021).

Garfí et al. (2011) prováděl výzkum v andských oblastech (město Cajamarca) s použitím fermentačního zbytku z morčecího hnoje z levných tubulárních reaktorů. V andských venkovských komunitách je ekonomika založena na soběstačnosti zemědělství, chybí tam pitná voda, kanalizace a elektřina. Jsou zaznamenávány nízké výnosy plodin kvůli erozi půdy, kyselostí spojenou s vysokou nadmořskou výškou. Ve výzkumu použil andské plodiny, brambory a píce. Výtěžek brambor se v případě hnojení fermentačním zbytkem zvýšil o 27,5 %, na píci aplikoval různé dávky fermentačního zbytku a při poloviční dávce se výtěžek píce zvýšil o 1,4 %. Při 100% a 150% dávce se zvýšil o 8,8 % ve srovnání s kontrolním vzorkem (Garfí et al. 2011).

Slepetiene et al. (2019) zkoumal neúrodnost v Litvě a potenciál využití pevné a kapalné frakce fermentačního zbytku jako biohnojiva pro úpravu půdy. V rámci jejich výzkumu vidí řešení problému erodovaných a neúrodných půd používaných v zemědělství v použití fermentačního zbytku s různým složením. Zdůraznil výhody pevné frakce, jež zlepšuje vlastnosti půdy a má pozitivní vliv na úrodnost, udržitelnost, kvalitu a trvanlivost půdy. Obsah

minerálního dusíku se prokazatelně pětinasobně zvýšil při hnojení pevným fermentačním zbytkem ($170 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) v půdní vrstvě 0–40 cm.

7.1.1 Hnojení plodin fermentačním zbytkem

Fermentační zbytek má obvykle vyšší koncentraci N-amon oproti exkrementům hospodářských zvířat. Dusík je pro rostliny velmi důležitý pro jejich růst, což způsobuje potenciál využít fermentační zbytek jako hnojivo ve výživě rostlin. Mimo dusíku obsahuje fermentační zbytek velké množství živin, mikroprvků a makroprvků, které jsou uvedené výše. Při studii Chanrigny et al. (2004) pěstování Bojínku lučního (*Phleum pratense* L.) hnojeného fermentačním zbytkem prokázali zvýšený výnos krmné sušiny oproti hnojení exkrementů hospodářských zvířat (Seadi et al. 2013).

Hnojení fermentačním zbytkem se řídí Směrnicí Rady 91/676/EHS, která je již zmíněná výše. Fermentační zbytek se řadí do dusíkatých hnojiv a může být zařazen do hnojiv s rychle uvolňujícím dusíkem, které mají poměr uhlíku k dusíku nižší než 10 a do hnojiv s pomalu uvolnitelným dusíkem, které mají poměr uhlíku k dusíku roven nebo je vyšší než 10. Zemědělský pozemek, na kterém se pěstuje jednoletá plodina nebo je připravený pro založení porostu jednoleté plodiny se nesmí hnojit fermentačním zbytkem s poměrem C:N větší než 10 v období od 1.6 do 31.7. Hnojit fermentačním zbytkem se nesmí na půdě přesycené vodou, pokryté vrstvou sněhu vyšší než 5 cm nebo půdě promrzlé do hloubky více než 8 cm, je zde nebezpečí eutrofizace vod (Směrnice Rady 91/676/EHS).

Před hnojením fermentačním zbytkem je vhodné stanovit aktuální obsah N-amon v půdě. Hnojení fermentačním zbytkem se využívá pro regenerační hnojení ozimých obilovin a olejnin, které povede ke zlepšení kvality produkce. Kukuřice na siláž nebo na zrno se hnojí před setím, zapravením do půdy, dále během vegetace pomocí hadicovitých aplikátorů při výšce porostu 30–70 cm. Dále se fermentačním zbytkem hnojí před setím cukrovky, při přípravě půdy a před sázením brambor (ÚKZÚS 2016).

7.1.2 Hnojení pšenice seté

Pšenice setá (*Triticum aestivum* L.) je nejrozšířenější obilovina na světě. Zrno pšenice obsahuje 10–16 % bílkovin a 64–70 % škrobu. Rozhodující vliv na kvalitu pšenice má obsah lepku (prolaminy a gluteliny). Jako taková se pěstuje téměř ve všech klimatických podmínkách

a potřebuje půdu s dobrou strukturou a porézní podloží pro hluboké kořeny (Roy et al. 2006, Fecenko & Ložek 2000).

U ozimé pšenice dochází k nedostatku dusíku v období tvorby zrna. Aplikace hnojiv na jaře je nezbytná, jelikož při produkci 6,7 tun zrna·ha⁻¹ spotřebuje plodina v průměru 200 kg N, 55 kg P₂O₅, 252 kg K₂O ·ha⁻¹. Aplikace živin by měla probíhat před setím na jaře nebo na podzim, pokud nehrozí vylouhování draslíku na písčitých půdách (Roy et al. 2006, Fecenko & Ložek 2000).

Dusík je významným prvkem v hnojení, protože jeho nedostatek způsobuje u pšenice omezení růstu a na starších listech způsobuje chlorotické žluté zbarvení a zakrslost rostlin. K nedostatku dusíku v pšenici může dojít v půdách kupříkladu důsledkem nízké nebo vysoké hodnoty pH a při vysokých srážkách z důvodu vyplavení. Dusík je důležitý pro zvyšování výnosu obilovin a obsahu bílkovin, kvalitu zrna a optimální tvorbu odnoží (Richter & Hlušek 1999, Fecenko & Ložek 2000).

Fosfor je důležitý pro lepší vývoj rostlin, zlepšení růstu kořenů v ranných vývojových stádiích, zlepšuje vnos a dochází k vyrovnanějšímu dozrávání obilovin. Příjem fosforu rostlinou je závislý na množství a formě přijatelného dusíku a brzdí jej obsah sloučenin dusku v dusičnanové formě. U jarních obilovin se nedostatek fosforu projevuje červenáním nebo fialováním na starších listech při chladnějším počasí. Dochází k poškození kořenů a odnoží (Roy et al. 2006, Fecenko & Ložek 2000).

Draslík má významný vliv na aktivitu enzymů a fotosyntézu, jelikož je důležitý pro vyšší výnos zrna a jeho kvalitu. Nedostatek draslíku v rostlině způsobuje omezenou tvorbu bílkovin, cukrů, škrobů a hromadění nízkomolekulárních látek (např. aminokyseliny). Nedostatek můžeme pozorovat na mladých listech: jsou namodrale zelené, starší listy vykazují chlorotické skvrny a okraje s následnou nekrózou (Richter & Hlušek 1999, Fecenko & Ložek 2000).

Pampillón-González et al. (2017) hnojl fermentačním zbytkem pšenici při pěstování ve skleníku a sledoval emise skleníkových plynů (oxid uhličitý, metan a oxid dusný). V případě emisí oxidu dusného se emise významně zvýšily – až 5krát – oproti hnojení močovinou a 63krát v porovnání s neobdělávanou a nehnojenou půdou. Ve studii bylo 17 % organického uhlíku ve fermentačním zbytku mineralizováno (přeměna z organické hmoty na anorganické látky), k hnojení využil fermentační zbytek s 98 % N-amon.

Sapp et al. (2015) ve studii sledoval růst pšenice jarní a změny obsahu dusíku a fosforu v půdě a zároveň porovnával účinky hnojení fermentačním zbytkem a anorganickým hnojivem

na půdní bakterie. I přes počáteční mírný nárůst zjistil během experimentu pokles rozmanitosti a bohatosti půdních bakterií.

Dragevic et al. (2018) hnožil obiloviny fermentačním zbytkem s vyšším obsahem kovů a konkrétně sledoval hliník s chromem. Při studii se zvýšilo uvolňování hliníku a chromu hnojené půdy, tyto výsledky jsou srovnatelné s hnojením exkrementů hospodářských zvířat. Mobilitu kovů v půdě ovlivnila řada faktorů, jako například rozpuštěný organický uhlík, typ půdy, nebo hodnota pH. Kovy mají nepříznivý vliv na životní prostředí. Hliník je pro rostliny toxický, hromadí se v kořenech a brzdí příjem jiných iontů, zvápněním půdy lze zamezit jeho toxickému působení (Richter & Hlušek 1999).

7.1.3 Hnojení kukuřice

Kukuřice setá (*Zea mays*) je jednoletá rostlina, jež dorůstá výšky 150–300 cm (Zimolka 2008). Její počáteční růst a vývin je velmi pomalý, nemá vysoké požadavky na vodu a je velmi odolná proti suchu. Na začátku růstu spotřebovává poměrně málo živin, při výšce 40–50 cm odebírá cca 35 kg N, 4 kg P a 40 kg K na hektar. V průběhu intenzivního růstu nadzemních částí rostlin (druhá polovina července až srpen) přijme kukuřice 70–75 % všech živin. Jedna tuna zrna kukuřice odebere z půdy zhruba 30 kg dusíku, 2,4 kg fosforu a 2,9 kg draslíku (Vaněk 2007, Fecenko & Ložek 2000).

Dusík je u kukuřice seté důležitý pro zelenější barvu porostu, vyšší výnos, lepší kvalitu zrna, lepší tvorbu palic a celkové produkce. Rostliny s nedostatkem dusíku vykazují vytáhlý růst. Barva listů je při nedostatku rovnoměrně bledě zelená a nejstarší listy (v nejnižší vrstvě) vykazují žluté zbarvení a následující nekrózu do špiček listů. (Vaněk 2007, Fecenko & Ložek 2000).

Dostatek fosforu je důležitý pro lepší vývin rostlin, dobrý vývoj rostlin v raných stádiích, vyrovnanější dozrávání s nižšími ztrátami během sklizně a zvyšování výnosu. Nedostatek fosforu se u mladých rostlin projevuje zakrnělým vzrůstem a tmavě zeleným zbarvením. V případě nedostatku fosforu ve fázi kvetení a tvoření palic má za následek nedostatečné ozrnění palic na koncích v důsledku snížené a krátké klíčivosti pylu (Vaněk 2007, Fecenko & Ložek 2000).

Dostatečný obsah draslíku je nutné dodržet před kvetením a v prvních růstových fázích. Jeho dostatek zapříčiňuje vyšší výnos, lepší růst kořenů a zdravě zelené olistění, naopak

nedostatek se projevuje na palicích rostliny – jsou zúžené a špičaté a nejsou kompletně osazeny zrny (Roy et al. 2006, Fecenko & Ložek 2000).

Barbosa et al. (2014) použil fermentační zbytek jako zdroj živin pro produkci kukuřice, na jehož výrobu byla použita kukuřičná siláž s exkrementy slepic. Aplikoval jej na sazenice ve skleníkových podmínkách a prokázal tak pozitivní účinek fermentačního zbytku na produkci kukuřice.

7.1.4 Hnojení cukrové řepy

Cukrová řepa (*Beta vulgaris* var. *altissima*) patří mezi nejvýznamnější okopaniny. Okopaniny vyžadují velké množství živin v půdě, protože v rámci vegetace vyprodukují velké množství biomasy. Odběr živin cukrovou řepou je závislý na několika faktorech, mezi které patří půdní a povětrnostní podmínky, pěstované odrůdy a dosažené produkce na jednotku plochy. V průměrných podmínkách na úrodu jedné tuny bulv a příslušného množství listů odebere cukrová řepa 5 kg dusíku, 0,7 kg fosforu, 6,5 kg draslíku (Ložek 2000). Na začátku vegetace roste velmi pomalu. Při růstu bulv rostlina výrazně zvyšuje příjem živin.

Zastoupení fosforu a dusíku je v listech a bulvách přibližně stejné, ale draslík se kumuluje v listech. (Ložek 2000). Dusík ve výživě rostlin výrazně ovlivňuje úrodu a kvalitativní parametry cukrové řepy. Při zvyšování dávek dusíku se zvýší úroda bulv, ale snižuje se cukernatost a zvyšuje se obsah alfa-aminodusíku, který je škodlivý. Při vyšším množství dusíku se zvětšuje nárůst listů a tím klesá cukernatost bulv řepy, v případě jeho nedostatku je růst omezen a rostliny jsou zakrnělé. (Ložek 2000).

Dostatečný obsah fosforu při pěstování cukrové řepy umožňuje vytvořit energetické zdroje na biosyntézu sacharidů. Obsah fosforu v půdách se v současném období snižuje, je proto potřeba mu věnovat pozornost, jelikož spolu s dusíkem se významně podílí na tvorbě a stabilitě dosahované úrody. Rostlina přijímá fosfor rovnoměrně v rámci celého období růstu. Přísun fosforu je důležitý zvláště v letním období, protože dochází k menším srážkám a výskytům relativně dlouhých suchých období. Při nedostatku fosforu zůstávají rostliny malé, starší rostliny projevují nedostatek fosforu žloutnutím listů. (Ložek 2000).

Hnojení draslíkem je potřeba přizpůsobit nárokům rostliny, protože červená řepa je považována za draskomilnou rostlinu. Množství draslíku je nutné určit co nejpřesněji, protože draslík má vliv nejen jako regulátor úrody, ale také se významně podílí na tvorbě melasotvorných látek, jež významně ovlivňují technologickou hodnotu cukrové řepy. Vysoké

dávky draslíku zhoršují kvalitativně hodnoty cukrové řepy a vysoké koncentrace draselného kationtu v půdním roztoku působí antagonisticky na příjem kationtů vápníku a hořčíku. Příznaky nedostatku draslíku se na dospělých listech projevují spálením na okrajích a mezi žilnatinou. (Ložek 2000).

Trimpler et al. (2016) se zabýval emisemi oxidu uhličitého při pěstování cukrové řepy a dospěli k závěru, že hnojení dusíkem je hlavním zdrojem emisí oxidu uhličitého při pěstování. Při použití organických hnojiv bylo méně emisí oxidu dusného. Dle jeho výsledků výnos cukru nezávisí na intenzitě hnojení dusíkem. Baryga et al. 2020 testoval fermentační zbytek vyrobený z řízků cukrové řepy, který využil ke hnojení plantáže cukrové řepy. Řízky cukrové řepy představují odpad vznikající při výrobě cukru, jeho nejčastější využití je v podobě krmiva pro dobytek. Hnojením vyrobeného fermentačního zbytku zajistilo získání řepy, která splnila všechny požadavky pro výrobu cukru.

7.1.5 Aplikace

Během aplikace fermentačního zbytku na zemědělskou půdu může dojít k vyluhování živin (fosforu či dusíku) a jejich vyplavování do povrchových a podzemních vod. Po dobu dvou let nebylo během polních pokusů pro posuzování technologií v rámci kanadského vládního programu při jarní aplikaci prokázáno žádné zvýšení vyluhování dusíku z fermentačního zbytku. Při podzimní aplikaci fermentačního zbytku se množství dusíku vyluhovaného do přírodních vod téměř zdvojnásobilo. Aplikaci hnojiv lze ovlivnit správným načasováním, nesmí být velké srážky a není doporučeno hnojit v období, kdy má rostlina nízký přírůstek. Na vyluhování živin má vliv i typ půdy, na písčitých půdách je potenciál vyluhování vyšší, protože mají malou schopnost zachycovat vodu (Lukehurst et al. 2014).

Před aplikací se musí věnovat pozornost i očekávanému výnosu, složení fermentačního zbytku a obsahu konkrétních živin v půdě (Lukehurst et al. 2014). K tomu slouží plán péče o živiny. Ten udává řadu postupů řízení s použitím živin způsobem šetrným k životnímu prostředí (Sead et al. 2013).

Při hnojení fermentačním zbytkem nedochází k popálení rostlin, jež může nastat při aplikaci surového hnoje díky účinku mastných kyselin s nízkou molekulovou hmotností (třeba kyseliny octové). Většina mastných kyselin je procesem anaerobní fermentace rozložena a nezdržuje se, v případě kapalně frakce, na rostlinách a snižuje tím i riziko poškození listů (Seadi et al. 2013). Surový fermentační zbytek lze aplikovat různými typy zařízení. Pevná frakce

s obsahem sušiny větším než 18 % se aplikuje na povrch, při obsahu 18–12 % se aplikuje povrchově nebo se injektuje pod povrch. Při povrchové aplikaci fermentačního zbytku se doporučuje zapravení do ornice ihned nebo během několika hodin, aby se zabránilo emisím zápachu a ztrátě živin vyplavením či těkáním (Seadi et al. 2013).

Aplikace fermentačního zbytku na půdu vyvolá procesy těkání amoniaku a emise oxidu dusného, které mohou ihned po aplikaci vést ke ztrátě aplikovaného dusíku. Oxid dusný má vyšší potenciál co se týče globálního oteplování, oproti oxidu uhličitému je asi 300krát větší (Nicholson et al. 2017). Závisí nejen na klimatických podmínkách, ale i na pH půdy a infiltraci. K tomuto existuje řada studií ohledně těkavosti amoniaku v porovnání s hnojem (Seadi et al. 2013).

Sanz et al. (2020) se zabývali antibiotiky a antibiotickou zátěží ve fermentačním zbytku z kejdy prasat, protože se stále zvyšuje rezistence na antibiotika, což je velká hrozba pro lidské zdraví. Odebrali vzorky z šesti farem. Jejich výsledky poukazují na vysoké zatížení několika antibiotiky. Nevylučují, že jejich přítomnost souvisí s veterinárním použitím u prasat. Mohlo by to vést k problémům při následné aplikaci na půdu.

Shen et al. (2018) modeloval emise oxidu dusného z fermentačního zbytku aplikovaného na tři zemědělské půdy ve Velké Británii, kde se pěstuje ozimá pšenice a travní porosty. Vědci vyvinuli několik modelů, jejichž cílem bylo předpovědět množství emisí oxidu dusného při hnojení fermentačním zbytkem na zemědělskou půdu.

Nicholson et al. (2017) se zabýval ztrátami dusíku po použití fermentačního zbytku na zemědělské půdy. Fermentační zbytek z potravinového odpadu má vyšší celkový obsah dusíku oproti vepřové kejdě. Hodnota pH fermentačního zbytku byla 8,5 oproti hodnotě kejdy prasat, jež činila 7,8. Jejich ztráty amoniaku z fermentačního zbytku vyrobeného z potravinového odpadu byly 30–50 % z celkového množství dusíku před aplikací.

7.1.6 Skladování

Fermentační zbytek sice bioplynové stanice produkují celoročně, on sám se ale celý rok na půdu neaplikuje. Vhodný čas pro aplikaci je ve fázi vegetačního období. Potřebná doba skladování se liší podle typu půdy, množství srážek, zeměpisné oblasti, střídání plodin a národních předpisů pro aplikaci fermentačního zbytku nebo hnoje. Skladovací kapacita v mírném pásmu se na produkci fermentačního zbytku doporučuje za cca 6–9 měsíců. Některé

země mají legislativně stanovenou minimální nezbytnou kapacitu pro skladování fermentačního zbytku (Lukehurst et al. 2014).

Při skladování v otevřených nádržích se uvolňuje amoniak a metan, jejichž emise lze snížit zakrytím povrchu kapaliny, kupříkladu ochrannou vrstvou, jež se může skládat z plovoucí vrstvy plastových kousků, sekané slámy nebo přirozeně vznikající krusty, jejíž vrstva je nejméně 10–20 cm (Lukehurst et al. 2014). Dalším způsobem skladování je využití skladovací nádrže zakryté pomocí flexibilních skladovacích vaků nebo vzduchotěsných membrán, tak jako na obrázku č. 15 (Lukehurst et al. 2014).

Li et al. (2018) se zabýval skladováním fermentačního zbytku za různých podmínek. Při studii během skladování v otevřených nádržích došlo ke snížení hmotnosti kvůli odpaření vody, podmínky byly mezofilní ($30 \pm 1^\circ \text{C}$), naopak se zvýšil obsah živin, organické hmoty a těžkých kovů v důsledku koncentračního efektu. Obsah celkového dusíku se během prvních 30 dnů snížil důsledkem těkáním amoniaku, při krytém skladování se navíc snížil obsah antibiotik a došlo k mírné změně chemických vlastností.

Hlavním problémem skladování fermentačního zbytku je uvolňování amoniaku a metanu, proto se volí kryté skladovací nádrže, jež jsou však prostorově náročné, jak je patrné z obrázku č. 15. Uvolňování amoniaku s sebou nese i riziko ztrát dusíku. Pro zakrytí skladovací nádrže lze využít i flexibilní skladovací vaky nebo skladovací nádrž zakrýt vzduchotěsnou membránou (Lukehurst et al. 2020).



Obrázek č. 15: Krytá skladovací nádrž fermentačního zbytku (Lukehurst et al. 2014)

7.1.7 Rizika spojená s hnojením fermentačním zbytkem a jeho složkami

Fermentační zbytek i jeho separované frakce se využívají k hnojení zemědělské půdy. Tyto materiály mají rozdílný obsah sušiny, vlastnosti a způsoby aplikace (viz kapitola 7.2.1 a

7.3.1). Tyto jsou rozdílné a zahrnují značná rizika spojená se složením jednotlivých frakcí (Lukehurst et al. 2020).

Do anaerobní fermentace v zemědělské bioplynové stanici vstupují substráty, jako jsou například exkrementy hospodářských zvířat. Zvířatům se podávají antibiotika při léčbě onemocnění, nejsou ale úplně odstraněny metabolismem zvířat, kdy se 10–90 % léčiv vylučuje stolicí a močí. Antibiotika se mohou objevit i v potravinách, jakými jsou třeba maso, vejce nebo mléčné výrobky. Při zpracování exkrementů zvířat v bioplynové stanici se může snížit jejich obsah, ale úplně se neeliminují (Sun et al. 2020). Následně může dojít k jejich rozvoji a obohacení o geny rezistentní na antibiotika. Aplikace do půdy pomocí fermentačního zbytku vede k riziku akumulace. Následným pěstováním plodin a chováním zvířat, která konzumují tyto plodiny, vzniká značné riziko pro veřejné zdraví v závislosti na patogenitě jednotlivých skupin mikroorganismů. V USA se každoročně vyskytne více než 2,8 milionů infekcí s rezistencí na antibiotika (Sun et al. 2020).

Sun et al. (2020) zkoumal bakterie rezistentní na antibiotika ve fermentačním zbytku z potravinového odpadu a zvířecího hnoje a vyhodnotil citlivost druhů izolovaných na různá antibiotika. V případě hnojení půdy exkrementy hospodářských zvířat může docházet k rozvoji antimikrobiální rezistence a mohou být kultivovány například bakterie rezistentní na antibiotika. Následná konzumace potravin kontaminovaných bakteriemi rezistentními na antibiotika představuje určité riziko pro veřejné zdraví v závislosti na patogenitě bakterií.

Vybral dva druhy fermentačního zbytku vzniklého anaerobní fermentací, konkrétně živočišný hnůj a potravinový odpad, jelikož se v dnešní době používají nejčastěji. Sledoval je pomocí misek živné půdy agar s kasaminovou kyselinou, kdy obsahoval vždy jen jedno antibiotikum. Zjistil přítomnost několika potencionálně patogenních bakterií, např. *Bacillus cereus* a *Bacillus licheniformis*, jež mohou způsobit nemoc přenášenou potravinou a způsobit potraty a mastitidu (zánět mléčné žlázy) u skotu. Klasifikoval i 30 bakteriálních druhů sedmi rodů, kdy většina byla nepatogenní, *Bacillus cereus* byl patogenní (Sun et al. 2020).

Většina identifikovaných druhů se vyskytuje v půdě, ale využití fermentačních zbytků z živočišného hnoje nebo potravinového odpadu s sebou nese určitá rizika při aplikaci na půdu jako hnojivo (Sun et al. 2020).

7.2 Využití pevné frakce separovaného fermentačního zbytku

Pevná frakce separovaného fermentačního zbytku má několik hlavních využití, mimo jiné jako hnojivo a pevné palivo. Lze ji využít také jako podestýlku ve stájích pro chov hospodářských zvířat, náhradit tak slámu. Řada výzkumů prokázala, že pevná frakce může být použita k výrobě méně kvalitních stavebních materiálů, jako jsou dřevnovláknité desky nebo kompozitní materiály. Po sušení vláken fermentačního zbytku se pevná separovaná frakce namíchá s kapalnou pryskyřicí, poté se směs lisuje a tvaruje (Seadi et al. 2013).

Dalším potenciálem pevné frakce je jeho využití ve formě biopesticidu pro pěstování *Bacillus thuringiensis*, která je nezbytná pro výrobu mnoha biopesticidů. V tomto případě je nutné věnovat se vhodnosti kultivačního média. Pevná frakce může být smíchána s ostatními surovinami a znovu přiváděná do anaerobní fermentace za účelem zvýšení obsahu sušiny (Seadi et al. 2013).

7.2.1 Hnojení pevnou frakcí

Pevná frakce je potenciální hnojivo, jehož živiny jsou ve formě pevných částic, jejichž aplikací se může snížit pohyblivost živin. Existuje zde značné riziko eutrofizace, tzn. procesu obohacování vod o živiny způsobeného vyplavováním přebytečných živin do přírodních vod (Wang et al. 2020).

Hnojení pevnou frakcí fermentačního zbytku vede k významně nižším výtěžkům ve srovnání s kapalným fermentačním zbytkem a minerálními hnojivy. Tato frakce je charakterizována jako hnojivo podobné pevnému hnoji, ale s vysokým obsahem dusíku a fosforu. Je vhodná k aplikaci na ornou půdu ke zvýšení tvorby půdního humusu a ke zvýšení obsahu půdní organické hmoty (Valentinuzzi et al. 2020).

Ronga et al. 2019 testoval pevný fermentační zbytek jako pěstební médium pro růst hlávkového salátu. Pevným fermentačním zbytkem lze nahradit běžné pěstební médium při kultivaci bez půdy.

Muscolo et al. (2017) obohatil vstupní surovinu anaerobní fermentace (exkrementy hospodářských zvířat) o syrovátku z mléka, citrusovou dužinu, olivový odpad a kukuřičnou siláž. Vytvořil dvě směsi lišící se v zastoupení použitých substrátů a hnojili tímto fermentačním zbytkem. Prokázal, že mícháním vstupních surovin ovlivnili kvalitu tohoto zbytku. V případě

ošetření pevnou frakcí půda vykazovala nejvyšší obsah organické hmoty a nejvyšší poměr uhlíku k dusíku.

Výsledky potvrdily, že společné zpracování olivového odpadu s citrusovou dužinou má příznivý účinek, jenž je způsoben hlavně zvýšením obsahu organických látek a optimalizací bilance živin aktivací půdních enzymů mající pozitivní dopad na úrodnost zemědělské půdy. Hnojení fermentačním zbytkem místo syntetických nebo organických hnojiv může snížit zátěž životního prostředí, jedná se zejména o dopad emisí oxidu uhličitého a methanu z výrobního procesu průmyslových hnojiv (Muscolo et al. 2017).

7.2.2 Pevné palivo

Sušený separát ve formě pevného paliva vypadá jako slibná alternativa paliva. Pro snížení nákladů na skladování a přepravu lze pevnou frakci sušit v blízkosti bioplynové stanice. Živiny (draslík, fosfor a vápník) zůstávají v popelu po spalování palivových pelet. Těžké kovy, zejména olovo a kadmium, se po spalování fermentačního zbytku nacházejí v hrubém, cyklonovém a filtračním popelu (Kratzeisen et al. 2010).

Cílem práce Keatzeisen et al. (2010) bylo ověřit, zda je vhodné využití fermentačního zbytku jako tuhé palivo a zároveň ho klasifikovat jako biopalivo podle platných předpisů. Došlo i k analýze možného využití hrubého popele jako hnojiva. Fermentační zbytek autor upravil na obsah vlhkosti kolem 15–20 % pomocí dekantéru a bubnové sušárny. Před spalováním byl slisován na pelety bez přidání dalších přísad.

Co se týče výhřevnosti, studoval dva různé fermentační zbytky: první měl výhřevnost 17,2 MJ/kg a druhý 16,4 MJ/kg, zatímco borové dřevo s kůrou mělo výhřevnost 18,5 MJ/kg. Rozdíly nebyly velké. Fermentační zbytek ale překročil limitní hodnotu v obsahu síry, chloru a dusíku, které jsou zodpovědné za tvorbu škodlivých emisí během spalování. Účinnost odhadl na cca 85 %, naopak dřevěné pelety mají zhruba 90 %, což je výrazně více. V popelu nebyl obsažen dusík, protože téměř úplně unikl (Kratzeisen et al. 2010).

Keatzeisen et al. (2010) doporučil zkoumané fermentační zbytky jako palivo pro spalování, během něhož nebyly překročeny mezní hodnoty emisí spalin v rámci stanovených limitů pro biopaliva.

Pawlak-Kruczek et al. (2020) se zabýval zlepšením mechanického odvodnění pomocí hydrotermální karbonizace (HTC) fermentačních zbytků, což je termochemický proces pod tlakem nasycení při teplotě 200 až 260 °C, kdy dochází k valorizaci biomasy na uhlíkaté

produkty. Zjistil, že pevná frakce fermentačního zbytku vznikající při anaerobní fermentaci exkrementů krav je vhodnější pro palivové účely oproti fermentačnímu zbytku komunálního pevného odpadu. Při testování fermentačního zbytku z typické bioplynové stanice a z mokré frakce tuhého komunálního odpadu po separaci vedla hydrotermální karbonizace ke zvýšení obsahu uhlíku v každém testovaném fermentačním zbytku. Nejvíce viditelná změna byla v rozsahu makro pórů.

7.3 Využití separované kapalné frakce

7.3.1 Hnojení kapalnou frakcí

Kapalná frakce fermentačního zbytku se využívá ke hnojení půdy, přičemž se vyznačuje oproti minerálnímu hnojivu nízkým obsahem sušiny, dostupnějším fosforem a vysokým obsahem dusíku a draslíku. Vlastnosti kapalné frakce fermentačního zbytku jsou závislé na použité surovině a na technologických procesech použitých při anaerobní fermentaci (Valentinuzzi et al. 2020).

Valentinuzzi et al. (2020) provedl experiment s hnojením kapalnou frakcí fermentačního zbytku a jeho vlivem na růstové parametry rostlin okurky a kukuřice – při aplikaci kapalné frakce se zvýšila biomasa listů u okurky.

Wang et al. (2020) se zabýval získáním fosforu z kapalné frakce fermentačního zbytku pomocí biouhlu získaného z kalu bohatého na železo. Využil různé techniky, třeba rentgenovou fotoelektronovou spektroskopii, a zkoumal účinky teplot pyrolýzy, aby došlo k co největší adsorpci fosforu na biouhel bohatý na železo. Zároveň aplikoval kapalnou frakci na klíčící semena a tím zvýšili klíčivost o 66 %.

Ronga et al. (2019) testoval kapalný fermentační zbytek jako živný roztok při kultivaci listového salátu (*Lactusa sativa*). Zdůraznil tak, že kapalnou frakci fermentačního zbytku lze využít jako živný roztok.

7.3.2 Opětovné využití kapalné frakce

Oproti fyzikálně-chemickým metodám zpracování kapalné frakce lze kapalnou frakci upravit pomocí biologických metod, a tak snížit náklady. Využití biologických metod je omezeno vysokou zátěží potenciálních biologických procesů dusíkem. Technologie aerobního reaktoru s granulovaným kalem (GSBR) překonává negativní účinek zátěže dusíku a využívá se

pro čištění odpadní vody s vysokou koncentrací dusíku a nízkým poměrem CHSK/N (Świątczak et al. 2018).

Cílem studie Świątczak et al. (2018) bylo zjistit, zda lze použít kapalnou frakci fermentačního zbytku čištěného v GSBR s následnou ultrafiltrací za účelem zavlažování. Použili fermentační zbytek vzniklý při zpracování exkrementů hospodářských zvířat z bioplynové stanice v Polsku a zjistili, že některé mikroorganismy odstranily znečišťující látky. Úpravou GSBR a následnou ultrafiltrací zajistili kvalitu kapalné frakce a vyhodnotili, že kapalná frakce fermentačního zbytku je vhodná pro zavlažování nebo jako užitková voda.

Kapalná frakce po separaci pevná látka – kapalina je často opětovně přiváděná do reaktoru anaerobní fermentace. Lze ji použít při fermentaci suché siláže, po smíchání siláže a kapalné frakce probíhá společný rozklad obou materiálů. Kapalná frakce se využívá k recirkulaci mikroorganismů a živin v procesu, využívá se v případě bioplynových stanic, jež používají exkrementy hospodářských zvířat jako surovinu anaerobní fermentace. Pomocí kapalné frakce lze dosáhnout požadovaného obsahu sušiny substrátu pro výrobu bioplynu kolem 10 % (Seadi et al. 2013).

7.3.3 Řasy

Golueke & Oswald v 50. letech 20. století provedli počáteční pokus o kultivaci mikrořas ve fermentačním zbytku. Tato problematika začala být více zkoumána v posledních letech díky růstu poptávky po zpracování fermentačního zbytku (Xia & Murphy 2016). Biopaliva a bioprodukty na bázi mikrořas jsou nadějně pro budoucnost. V případě provozu bioplynových stanic nejsou produkovány komerčně, protože jsou současné náklady na provoz a pěstování řas v prostředí fermentačního zbytku příliš vysoké. Polovinu nákladů a vstupů energie při pěstování mikrořas může představovat využití živin z fermentačního zbytku (kupř. dusík, fosfor). Snížit náklady lze kombinací kultivací mikrořas a ošetření kapalným fermentačním zbytkem na místě (Xia & Murphy 2016).

Fotosyntetické mikrořasy redukují oxid uhličitý na organické sloučeniny a využívají energii ze světla k extrakci elektronů a protonů z vody. Existují tři hlavní kultivační režimy: mixotrofní, heterotrofní a fotoautotrofní. Mixotrofní řasy po ošetření kapalnou frakcí zlepšují produktivitu biomasy, odstraňování fosforu a dusíku, ale umožňují i odstranění organického a anorganického uhlíku. Ve venkovních foto-bioreaktorech mohou dosáhnout

o jeden až dva stupně vyšší produktivitu oproti fotoautotrofním kulturám (Xia & Murphy 2016).

Fotoautotrofní kultivace se hojně využívá v tzv. průmyslových rybnících. Mikrořasy se zde využívají jako zdroj energie a uhlíku organické sloučeniny (třeba cukrů). Lze dosáhnout vyšší produktivity a koncentrace biomasy při zabránění omezování a inhibice světla ve fotosyntéze. Zásadním problémem je zde udržování kultury mikrořas, protože se snadno kontaminují jinými mikroorganismy. Mixotrofní kultivace používá jak organické, tak anorganické zdroje uhlíku, protože mikrořasy využívají jak heterotrofii, tak i fotoautotrofii (Xia & Murphy 2016).

Kapalný fermentační zbytek je vhodný pro kultivaci mikrořas, protože obsahuje vysoké množství dusíku a fosforu, což jsou primární potřebné živiny pro jejich růst. Preferují dusík ve formě NH_4^+ a fosfor ve formě fosfátu. Hlavním problémem u tohoto využití je vysoký zákal, ačkoliv ho mikrořasy částečně snižují, proto byly využity některé metody předúpravy pro odstranění zákalu, mimo jiné filtrace, centrifugace nebo srážení (Xia & Murphy 2016).

Xia & Murphy (2016) došli k závěru, že „mikrořasy mohou účinně extrahovat živiny z fermentačního zbytku a zároveň poskytovat vysoce hodnotnou biomasu pro biorafinerie“. Poukázali na několik otázek, kterým je potřeba věnovat více výzkumné práce, například použití externího zdroje uhlíku pro zvýšený růst mikrořas při použití dvoustupňové fermentace. Jiang et al. (2018) využili kapalný fermentační zbytek vysrážený struvitem a pěstované mikrořasy, jež produkují lipidy sloužící pro výrobu bionafty. Zkonstruovali tak nový způsob využití fermentačního zbytku.

Sebök & Hanelt (2020) zkoumali použití předupraveného fermentačního zbytku pro pěstování mořských makrořas, jelikož makrořasy jsou zajímavým zdrojem obnovitelné biomasy pro různé použití. Využívají se nejen do potravin, krmiv, ale i jako surovina pro farmaceutické a zemědělské aplikace, mimoto jsou schopny čistit odpadní vodu. Pro pěstování makrořas se testovaly různé technologie, avšak kombinace zemědělské bioplynové stanice a pěstování v blízkosti bioplynové stanice je mnohem snazší než pěstování v moři. Náklady lze snížit využitím energie z bioplynové stanice pro míchání, regulaci teploty kultivačního média a dodávkou umělého osvětlení. Bioplyn obsahuje vysoký obsah oxidu uhličitého, díky němuž makrořasy rychleji rostou. Fermentační zbytek může být zároveň zdrojem živin.

Cílem jejich studie bylo otestovat technologie pro snížení obsahu živin ve fermentačním zbytku a určit optimální poměr fermentačního zbytku, jako zdroje živin pro suchozemské pěstování makrořas. Výzkum prokázal využití fermentačního zbytku nejen pro mikrořasy, ale také i pro makrořasy. Nutné bylo upravit kapalnou frakci kvůli snížení koncentrace živin., proto použili uměle vytvořenou mořskou vodu s kapalnou frakcí získanou separací fermentačního zbytku s přidáním flokulačních činidel naředěnou v poměru 50:1 pro maximální zvýšení produkce biomasy řas (Seböck & Hanelt 2020).

8 Závěr

Bakalářská práce si kladla za cíl vytvořit souhrn s metodami a postupy zpracování vedlejších produktů provozu zemědělských bioplynových stanic. Fermentační zbytek vystupující z anaerobní fermentace je hodnotný vedlejší produkt s vysokým obsahem živin. Mezi nejcennější živiny patří dusík, jehož významná část však uniká ve formě těkavého amoniaku. Pro efektivnější využití fermentačního zbytku se dále zpracovává pomocí separatorů/odstředivek na kapalnou a pevnou frakci. Separované frakce lze efektivněji využít vzhledem k jejich různému obsahu živin a rozdílné konzistenci. Separováním fermentačního zbytku a následným zpracováním jeho frakcí např. sušením, či membránovou filtrací se usnadní přeprava fermentačního zbytku a je potřeba méně prostorů na skladování.

Ohledně problematiky využití fermentačního zbytku a jeho jednotlivých frakcí je zde velký potenciál. Existuje však poměrně málo výzkumů zabývajících se problematikou zpracování a využití fermentačního zbytku, je zde velký potenciál pro výzkum do budoucnosti, protože se touto problematikou věda zabývá pouze několik posledních let. Obvykle se fermentační zbytek využívá ke hnojení zemědělské půdy. V této práci byly zvoleny tři plodiny, u kterých je popsán vliv živin na růst rostliny včetně případného nadbytku či nedostatku základních živin v rostlině, které fermentační zbytek obsahuje.

Hnojením vhodným množstvím fermentačního zbytku lze posílit jak kvalitu produkce, tak i výnosy. V porovnání s okolními státy jsou v České republice nižší výnosy plodin na hektar. Fermentačním zbytkem lze obohacovat půdy i v chudších oblastech, a tím docílit vyšší produkce plodin a zúrodnit tak téměř neúrodné půdy.

V práci bylo zmíněno využití kapalné frakce jako živného roztoku. Pomocí dalšího výzkumu a nového způsobu úpravy kapalné frakce by zkoumající mohl nalézt více využití roztoku, například i pro mikrobiologii.

Účelem této práce bylo představit technologie pro separaci fermentačního zbytku, zpracovatelských způsobů separovaných frakcí pro efektivnější využití, možné způsoby zpracování jednotlivých frakcí a jejich využití především v zemědělství pro zvýšení kvality rostlinné produkce. Z literární rešerše vyplývá, že existuje řada možností, jak fermentační zbytek separovat a dále zpracovat, které lze vzájemně kombinovat.

9 Literatura

1. Straka, F. a kolektiv, 2003. Bioplyn. Příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. GAS s.r.o. Říčany.
2. Al Seadi T, Drosch B, Fuchs W, Rutz D, Janssen R. 2013. The biogas handbook, - Science, Production and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing.
3. ÚKZÚS ODDĚLENÍ HNOJIV, 2016. Digestát a jejich využití v zemědělství.
4. Drosch B, Fuchs W, Seadi AL, Madsen M, & Linke B (2015) Nutrient recovery by biogas digestate processing. IEA Bioenergy (2015)
5. JAROLÍMOVÁ, Veronika. Aplikace kalů z čistíren odpadních vod na zemědělské půdě a související legislativa. Biom 1/20019 Půda a organická hmota. 2019(1).
6. ŠKORVAN, Ondřej, Marek HOLBA a Karel PLOTĚNÝ. Jak naložit s produkty anaerobní digesce v souladu se zákonem. ASIO, s. r. o., Botanický ústav AV ČR, v.v.i., VŠCHT Praha, 2012.
7. SMATANOVÁ, PH.D., Ing. Michaela. Digestát jako organické hnojivo. Rostlinná výroba. 2012, 21-22.
8. Černý, M. Holba, M., Došek, M.: Technologie vs. fermentační zbytek. In TVI. Hustpoeče: CEMC, 2015, ISBN 978-80-85990-26-3.
9. DANETV (2010) Verification Statement for GEA Westfalia Decanter Centrifuge for
10. Post-treatment of Digested Biomass. Danish Centre for Verification of Climate and Environmental Technologies (DANETV). See www.etv-denmark.com.
11. Ditl, P., Nápravník, J., & Šulc, R. (2017). Chemical pre-treatment of fugate from biogas stations. Biomass and Bioenergy, 96, 180–182. doi:10.1016/j.biombioe.2016.12.005.
12. Hu, L., Yu, J., Luo, H., Wang, H., Xu, P., & Zhang, Y. (2019). Simultaneous Recovery of Ammonium, Potassium and Magnesium from Produced Water by Struvite Precipitation. Chemical Engineering Journal, 123001. doi:10.1016/j.cej.2019.123001.
13. Pantelopoulos, A., Magid, J., & Jensen, L. S. (2016). Thermal drying of the solid fraction from biogas digestate: Effects of acidification, temperature and ventilation on nitrogen content. Waste Management, 48, 218–226. doi:10.1016/j.wasman.2015.10.008.
14. Chia, W. Y., Chew, K. W., Le, C. F., Lam, S. S., Chyi Chee, C. S., Luan Ooi, M. S., & Show, P. L. (2020). Sustainable Utilization of Biowaste Compost for Renewable Energy and Soil Amendments. Environmental Pollution, 115662. doi:10.1016/j.envpol.2020.115662.

15. El Diwani, G., El Rafie, S., El Ibiari, N. N., & El-Aila, H. I. (2007). Recovery of ammonia nitrogen from industrial wastewater treatment as struvite slow releasing fertilizer. *Desalination*, 214(1-3), 200–214. doi:10.1016/j.desal.2006.08.019.
16. Vondra, M., Máša, V., & Bobák, P. (2018). The energy performance of vacuum evaporators for liquid digestate treatment in biogas plants. *Energy*, 146, 141–155. doi:10.1016/j.energy.2017.06.135.
17. 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*, 33(6), 1339–1344. doi:10.1016/j.wasman.2013.02.023.
18. Fernandes, F., Silkina, A., Fuentes-Grünewald, C., Wood, E. E., Ndovela, V. L. S., Oatley-Radcliffe, D. L., ... Llewellyn, C. A. (2020). Valorising nutrient-rich digestate: Dilution, settlement and membrane filtration processing for optimisation as a waste-based media for microalgal cultivation. *Waste Management*, 118, 197–208. doi:10.1016/j.wasman.2020.08.037.
19. Zhao, Z., Jin, M., Qin, F., & Yang, S. X. (2021). A novel neural network approach to modeling particles distribution on vibrating screen. *Powder Technology*, 382, 254-261.
20. Chen, Z., Li, Z., Xia, H., & Tong, X. (2020). Performance optimization of the elliptically vibrating screen with a hybrid MACO-GBDT algorithm. *Particuology*.
21. Wang, Y., Pan, Z., Jiao, F., & Qin, W. (2020). Understanding bubble growth process under decompression and its effects on the flotation phenomena. *Minerals Engineering*, 145, 106066.
22. Calábková, Katrin & Malíková, Petra & Heviánková, Silvie & Červenková, Michaela. (2018). Recycling of Phosphorus and Ammonia Nitrogen from Digestate. *GeoScience Engineering*. 64. 36-39. 10.2478/gse-2018-0020.
23. LUKEHURST, Clare T., Peter FROST a Teodorita AL SEADI (2014). Utilisation of digestate from biogas plant or biofertilizer. *IEA Bioenergy*
24. Wang, H., Xiao, K., Yang, J., Yu, Z., Yu, W., Xu, Q., Liu, B. (2020). Phosphorus recovery from the liquid phase of anaerobic digestate using biochar derived from iron-rich sludge: A potential phosphorus fertilizer. *Water Research*, 115629. doi:10.1016/j.watres.2020.115629.

25. Giuseppe, M., Emanuele, C., Rita, P., Roberta, S., & Biagio, P. (2020). Performance evaluation of digestate spreading machines in vineyards and citrus orchards: preliminary trials. *Heliyon*, 6(6), e04257.
26. Alburquerque, J. A., de la Fuente, C., Campoy, M., Carrasco, L., Nájera, I., Baixauli, C., ... Bernal, M. P. (2012). Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy*, 43, 119–128. doi:10.1016/j.eja.2012.06.001.
27. Markou, G., Diamantis, A., Arapoglou, D., Mitrogiannis, D., González-Fernández, C., & Unc, A. (2020). Growing *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) in seawater supplemented with digestate: trade-offs between increased salinity, nutrient and light availability. *Biochemical Engineering Journal*, 107815. doi:10.1016/j.bej.2020.107815.
28. Abelenda, A. M., Semple, K. T., Lag-Brotons, A. J., Herbert, B. M., Aggidis, G., & Aiouache, F. (2021). Impact of sulphuric, hydrochloric, nitric, and lactic acids in the preparation of a blend of agro-industrial digestate and wood ash to produce a novel fertiliser. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 105021.
29. Lee, M. S., Urgun-Demirtas, M., Shen, Y., Zumpf, C., Anderson, E. K., Rayburn, A. L., & Lee, D. K. (2021). Effect of digestate and digestate supplemented with biochar on switchgrass growth and chemical composition. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105928.
30. Claudia, S., Marta, C., Laia, N.-M., Đorđe, T., Joan, P., Jordi, T., Benjamin, P. (2020). Antibiotic and antibiotic-resistant gene loads in swine slurries and their digestates: implications for their use as fertilizers in agriculture. *Environmental Research*, 110513. doi:10.1016/j.envres.2020.110513
31. Shen, J., Treu, R., Wang, J., Nicholson, F., Bhogal, A., & Thorman, R. (2018). Modeling nitrous oxide emissions from digestate and slurry applied to three agricultural soils in the United Kingdom: Fluxes and emission factors. *Environmental Pollution*. doi:10.1016/j.envpol.2018.08.102.
32. Wang, W., & Lee, D. J. (2020). Valorization of anaerobic digestion digestate: A prospect review. *Bioresource Technology*, 124626.
33. Muscolo, A., Settineri, G., Papalia, T., Attinà, E., Basile, C., & Panuccio, M. R. (2017). Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes: Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem. *Science of The Total Environment*, 586, 746–752. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.02.051.

34. Nicholson, F., Bhogal, A., Cardenas, L., Chadwick, D., Misselbrook, T., Rollett, A., ... Williams, J. (2017). Nitrogen losses to the environment following food-based digestate and compost applications to agricultural land. *Environmental Pollution*, 228, 504–516. doi:10.1016/j.envpol.2017.05.023.
35. Garfí, M., Gelman, P., Comas, J., Carrasco, W., & Ferrer, I. (2011). Agricultural reuse of the digestate from low-cost tubular digesters in rural Andean communities. *Waste Management*, 31(12), 2584–2589. doi:10.1016/j.wasman.2011.08.007.
36. Li, Y., Liu, H., Li, G., Luo, W., & Sun, Y. (2018). Manure digestate storage under different conditions: Chemical characteristics and contaminant residuals. *Science of The Total Environment*, 639, 19–25. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.05.128.
37. Kratzeisen, M., Starcevic, N., Martinov, M., Maurer, C., & Müller, J. (2010). Applicability of biogas digestate as solid fuel. *Fuel*, 89(9), 2544–2548. doi:10.1016/j.fuel.2010.02.008.
38. Pawlak-Kruczek, H., Niedzwiecki, L., Sieradzka, M., Mlonka-Mędrala, A., Baranowski, M., Serafin-Tkaczuk, M., & Magdziarz, A. (2020). Hydrothermal carbonization of agricultural and municipal solid waste digestates – Structure and energetic properties of the solid products. *Fuel*, 275, 117837. doi:10.1016/j.fuel.2020.117837.
39. Miliotti, E., Casini, D., Rosi, L., Lotti, G., Rizzo, A. M., & Chiaramonti, D. (2020). Lab-scale pyrolysis and hydrothermal carbonization of biomass digestate: Characterization of solid products and compliance with biochar standards. *Biomass and Bioenergy*, 139, 105593. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105593.
40. Slepetiene, A., Volungevicius, J., Jurgutis, L., Liaudanskiene, I., Amaleviciute-Volunge, K., Slepetys, J., & Ceseviciene, J. (2020). The potential of digestate as a biofertilizer in eroded soils of Lithuania. *Waste Management*, 102, 441–451. doi:10.1016/j.wasman.2019.11.008.
41. Xia, A., & Murphy, J. D. (2016). Microalgal Cultivation in Treating Liquid Digestate from Biogas Systems. *Trends in Biotechnology*, 34(4), 264–275. doi:10.1016/j.tibtech.2015.12.010.
42. Sun, H., Bjerketorp, J., Levenfors, J. J., & Schnürer, A. (2020). Isolation of antibiotic-resistant bacteria in biogas digestate and their susceptibility to antibiotics. *Environmental Pollution*, 115265. doi:10.1016/j.envpol.2020.115265.

43. Rehl, T., & Müller, J. (2011). Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, 56(1), 92–104. doi:10.1016/j.resconrec.2011.08.007.
44. Sebök, S., & Hanelt, D. (2020). Examining the capacity for cultivating marine macroalgae using process liquids from biogas digestate as nutrient source and cultivation medium. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105762. doi:10.1016/j.biombioe.2020.105762.
45. Jiang, Y., Pu, X., Zheng, D., Zhu, T., Wang, S., Deng, L., & Wang, W. (2018). Cultivation of lipid-producing microalgae in struvite-precipitated liquid digestate for biodiesel production. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1). doi:10.1186/s13068-018-1102-3.
46. Zielińska, M., & Galik, M. (2017). Use of Ceramic Membranes in a Membrane Filtration Supported by Coagulation for the Treatment of Dairy Wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(5). doi:10.1007/s11270-017-3365-x.
47. Barampouti, E. M., Mai, S., Malamis, D., Moustakas, K., & Loizidou, M. (2020). Exploring technological alternatives of nutrient recovery from digestate as a secondary resource. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110379. doi:10.1016/j.rser.2020.110379.
48. Lee, J., & Park, K. Y. (2020). Conversion of heavy metal-containing biowaste from phytoremediation site to value-added solid fuel through hydrothermal carbonization. *Environmental Pollution*, 116127. doi:10.1016/j.envpol.2020.116127.
49. Svehla, P., Vargas, L.M.V, Michal, P., Tlustos, P., 2019. Nitrification of the liquid phase of digestate can help with the reduction of nitrogen losses. *Environ. Technol. Inno.* doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100514>.
50. Świątczak, P., Cydzik-Kwiatkowska, A., & Zielińska, M. (2019). Treatment of the liquid phase of digestate from a biogas plant for water reuse. *Bioresource technology*, 276, 226-235.
51. Claudia, S., Marta, C., Laia, N.-M., Đorđe, T., Joan, P., Jordi, T., ... Benjamin, P. (2020). Antibiotic and antibiotic-resistant gene loads in swine slurries and their digestates: implications for their use as fertilizers in agriculture. *Environmental Research*, 110513. doi:10.1016/j.envres.2020.110513.
52. Svehla, P., Radechovska, H., Pacek, L., Michal, P., Hanc, A., Tlustos, P., 2017. Nitrification in a completely stirred tank reactor treating the liquid phase of digestate: The way towards rational use of nitrogen. *Waste Manage.* 64, 96–106.

53. ROY, A., A. JELÍNEK, M. KARBAN a B. PETRÁČKOVÁ. Úprava fugátu z digestátu bioplynových stanic pro závlahy kukuřice určené pro výrobu siláže využitelné v bioplynových stanicích. [Modification of fugatami from digestate of biogas plants for irrigation on maize for silage useful in biogas plants]. In: Snížení vláhového deficitu v rostlinné výrobě využitím odpadních zálivkových vod z farem. [Reducing the water deficit in crop production using waste water from farms grout]. Sborník z mezinárodní konference. Praha: VÚZT, v.v.i. 2016. s. 23-31. ISBN 978-80-86884-96-7.
54. 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.* 46(4), 879–888.
55. Khan, E.U., Nordberg, A., 2018. Membrane distillation process for concentration of nutrients and water recovery from digestate reject water. *Sep. Purif. Technol.* 206, 90-98.
56. Basařová, P., Bartovská, L., Kořínek, K., & Horn, D. (2005). The influence of flotation agent concentration on the wettability and flotability of polystyrene. *Journal of Colloid and Interface Science*, 286(1), 333–338. doi:10.1016/j.jcis.2005.01.016.
57. Michal, Petr. Bioplyn-energie ze zemědělství. Praha 2005.
58. PAMPILLÓN-GONZÁLEZ, L., LUNA-GUIDO, M., RUÍZ-VALDIVIEZO, V. M., FRANCO-HERNÁNDEZ, O., FERNÁNDEZ-LUQUEÑO, F., PAREDES-LÓPEZ, O., ... DENDOOVEN, L. (2017). Greenhouse Gas Emissions and Growth of Wheat Cultivated in Soil Amended with Digestate from Biogas Production. *Pedosphere*, 27(2), 318–327. doi:10.1016/s1002-0160(17)60319-9.
59. Sapp, M., Harrison, M., Hany, U., Charlton, A., & Thwaites, R. (2015). Comparing the effect of digestate and chemical fertiliser on soil bacteria. *Applied Soil Ecology*, 86, 1–9. doi:10.1016/j.apsoil.2014.10.004.
60. Dragicevic, I., Eich-Greatorex, S., Sogn, T. A., Horn, S. J., & Krogstad, T. (2018). Use of high metal-containing biogas digestates in cereal production – Mobility of chromium and aluminium. *Journal of Environmental Management*, 217, 12–22. doi:10.1016/j.jenvman.2018.03.090.
61. Richter, Rostislav a Jaroslav HLUŠEK. Výživa a hnojení rostlin. 1. vyd. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 1999, 171 s. ISBN 80-715-7138-5.
62. Zimolka, Josef. Kukuřice: hlavní a alternativní užitkové směry. 1. vyd. Praha: Profi Press, 2008, 200 s. ISBN 978-80-86726-31-1.

63. Vaněk, Václav. Výživa polních a zahradních plodin. Praha: Profi Press, 2007, 167 s. ISBN 978-80-86726-25-0.
64. Barbosa, D. B. P., Nabel, M., & Jablonowski, N. D. (2014). Biogas-digestate as Nutrient Source for Biomass Production of *Sida Hermaphrodita*, *Zea Mays* L. and *Medicago sativa* L. *Energy Procedia*, 59, 120–126. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.357.
65. Trimpler, K., Stockfisch, N., & Märlander, B. (2016). The relevance of N fertilization for the amount of total greenhouse gas emissions in sugar beet cultivation. *European Journal of Agronomy*, 81, 64–71. doi:10.1016/j.eja.2016.08.013.
66. Baryga, A., Połec, B., & Klasa, A. (2020). Quality of Sugar Beets under the Effects of Digestate Application to the Soil. *Processes*, 8(11), 1402. doi:10.3390/pr8111402.
67. Valentinuzzi, F., Cavani, L., Porfido, C., Terzano, R., Pii, Y., Cesco, S., ... Mimmo, T. (2020). The fertilising potential of manure-based biogas fermentation residues: pelleted vs. liquid digestate. *Heliyon*, 6(2), e03325. doi:10.1016/j.heliyon.2020.e03325.
68. Ronga, D., Setti, L., Salvarani, C., De Leo, R., Bedin, E., Pulvirenti, A., ... Francia, E. (2019). Effects of solid and liquid digestate for hydroponic baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation. *Scientia Horticulturae*, 244, 172–181. doi:10.1016/j.scienta.2018.09.037.
69. Fecenko J., Ložek O. 2000. Výživa a hnojení polních plodin. SPU v Nitre a Duslo, a.s. Šála.
70. KÁRA, J., Pastorek, Z., & Přibyl, E. (2007). Výroba a využití bioplynu v zemědělství. Praha: VÚZT, 11, 117.
71. Roy, R. N., Finck, A., Blair, G. J., & Tandon, H. L. S. (2006). Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. *FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin*, 16, 368.
72. Chantigny, M. H., Angers, D. A., Rochette, P., Bélanger, G., Massé, D., & Côté, D. (2007). Gaseous Nitrogen Emissions and Forage Nitrogen Uptake on Soils Fertilized with Raw and Treated Swine Manure. *Journal of Environment Quality*, 36(6), 1864. doi:10.2134/jeq2007.0083
73. Směrnice Rady 91/676/EHS ze dne 12. prosince 1991 o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů, Kapitola 15 Svazek 005 S. 275 - 346