

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta agrobiologie, potravinových a přírodních zdrojů

Katedra agroenvironmentální chemie a výživy rostlin



**Česká zemědělská
univerzita v Praze**

**Postupy vedoucí k racionalizaci využití živin obsažených
ve fermentačním zbytku**

Bakalářská práce

Kristina Pismennaja

Veřejná správa v zemědělství a krajině

Ing. Pavel Švehla, Ph.D.

© 2021 ČZU v Praze

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Postupy vedoucí k racionalizaci využití živin obsažených ve fermentačním zbytku" 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 neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 01.05.2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala zejména svému vedoucímu práce Ing. Pavlovi Švehlovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady, připomínky, ochotu a volný čas, který mi věnoval při zpracování této práce. Také bych chtěla poděkovat své rodině a přátelům za vstřícnost a podporu, kterou mi po celou dobu studia věnovali.

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.

Postupy vedoucí k racionalizaci využití živin obsažených ve fermentačním zbytku

Souhrn

Cílem této práce bylo vytvoření literární rešerše na téma "Postupy vedoucí k racionalizaci využití živin obsažených ve fermentačním zbytku".

V první řadě je zde popsána bioplynová stanice a její rozdělení (zemědělská, čistírenská a ostatní BPS). Podrobněji se práce zabývá anaerobní fermentací, kde jsou popsány fáze průběhu anaerobní fermentace a faktory, které ovlivňují proces a vzniklé produkty jako je bioplyn, ale také fermentační zbytek, jehož separací lze získat fugát a separát. Existuje řada technologií pro zpracování fermentačního zbytku z bioplynových stanic. Hlavní úprava fermentačního zbytku je oddělení pevné a kapalné frakce a k tomu se využívá např. šnekových lisů nebo dekantačních odstředivek. Pevnou frakci (separát) je možno využít jako hnojivo, nebo může být dále upravována, např. kompostováním či sušením. Z usušeného separátu lze vyrábět tuhá alternativní paliva. Tekutá frakce (fugát) se zpravidla dále upravuje celou řadou procesů například stripováním amoniaku, využitím membránových procesů atd. Tyto procesy vedou k zahuštění fugátu.

Fermentační zbytek obsahuje jisté množství živin a bývá využíván v zemědělství jako hnojivo. Vysoký obsah vody ve fermentačním zbytku a s ním spojená nízká koncentrace živin však zvyšují náklady na jejich skladování a přepravu. Odvodnění zfermentovaného materiálu by mohlo přispět ke snížení těchto nákladů.

Klíčová slova: bioplynová stanice, fermentační zbytek, ztráty dusíku, nitrifikace, tepelné zahušťování, fugát

The Methods Leading to Rationalization of the Utilization of Nutrients Contained in Digestate

Summary

The main point of this work is to create a literary research on the topic of „The methods leading to rationalization of the utilization of nutrients contained in digestate“.

First of all, the biogas plant and its classification (agricultural, treatment and other BPS) is described. In more detail, the work deals with anaerobic digestion, which describes the stages of anaerobic fermentation and the factors that affect the process and the resulting products such as biogas, but also the digestate, the separation of which can produce fugate and separate. There are a number of technologies for processing fermentation residue from biogas plants. The main treatment of the fermentation residue is the separation of the solid and liquid fractions, for example by using screw presses or decanting centrifuges. The solid fraction (separate) can be used as a fertilizer or can be further treated, for example by composting or drying. Solid alternative fuels can be produced from the dried separate. The liquid fraction (fugate) is usually further treated by a number of processes, for example by stripping of ammonia, using membrane processes etc. These processes lead to thickening of the fugate.

The fermentation residue contains a certain amount of nutrients and could be used in agriculture as a fertilizer. However, the high water content of the fermentation residue and the associated low concentration of nutrients increases their storage and transport costs. Dewatering the digested material could help to reduce these costs.

Keywords: biogas plants, fermentation residue, nitrogen losses, nitrification, thermal thickening, liquid digestate

Obsah

1 Úvod.....	10
2 Cíl práce.....	11
3 Literární rešerše.....	12
3.1 Bioplynové stanice.....	12
3.2 Rozdělení bioplynových stanic	12
3.2.1 Zemědělské bioplynové stanice.....	12
3.2.2 Čistírenské bioplynové stanice	13
3.2.3 Ostatní bioplynové stanice	13
3.3 Anaerobní fermentace	13
3.3.1 Fáze anaerobní fermentace.....	13
3.3.1.1 Hydrolýza	14
3.3.1.2 Acidogeneze.....	14
3.3.1.3 Acetogeneze	14
3.3.1.4 Metanogeneze.....	14
3.3.2 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci.....	15
3.3.2.1 Koncentrace mikroorganismů	15
3.3.2.2 Vstupní materiály.....	16
3.3.2.3 Velikost částic	16
3.3.2.4 Teplota.....	16
3.3.2.5 Hodnota pH.....	17
3.3.2.6 Poměr C: N.....	18
3.3.2.7 Přítomnost inhibujících látek.....	18
3.3.3 Produkty anaerobní fermentace	18
3.4 Fermentační zbytek	19
3.4.1 Dělení fermentačního zbytku	20
3.4.1.1 Podle použitých vstupních surovin	21
3.4.1.2 Podle způsobu následného využití	21
3.4.2 Složení a vlastnosti fermentačního zbytku	23
3.4.3 Prvkové složení fermentačního zbytku.....	25
3.4.3.1 Původ minerálních složek fermentačního zbytku.....	25

3.4.3.2	Význam minerálních sloučenin ve fermentačním zbytku	25
3.4.4	Přehled makroelementů a stopových prvků v půdě	25
3.4.5	Zpracování fermentačního zbytku	28
3.4.6	Ztráty dusíku z půdy.....	29
3.4.6.1	Ztráty dusíku z půdy vyplavením.....	29
3.4.6.2	Ztráty dusíku z půdy v plynné formě.....	30
3.4.7	Separace fermentačního zbytku	31
3.4.8	Zpracování pevné frakce fermentačního zbytku	32
3.4.8.1	Kompostování	32
3.4.8.2	Sušení	33
3.4.8.3	Karbonizace	34
3.4.9	Zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku (fugátu)	35
3.4.9.1	Tepelné zahušťování	35
3.4.9.2	Stripování amoniaku	37
3.4.9.3	Membránové procesy	38
3.4.9.4	Vysrážení struvitu	39
3.4.10	Biologická nitrifikace	40
3.4.11	Skladování a způsob používání fermentačního zbytku.....	41
3.4.12	Legislativa omezující nakládání s fermentačním zbytkem	42
4	Závěr	43
5	Literatura.....	44

1 Úvod

V dnešní době se stále zvyšuje počet bioplynových stanic (BPS), ať už zemědělských, čistírenských nebo ostatních. Nejvíce rozšířené u nás jsou bioplynové stanice zemědělské. Z těchto stanic vychází stále více a více produktů.

Bioplynové stanice jsou zařízení, ve kterých se anaerobními procesy rozkládá biomasa za vzniku bioplynu a fermentačního zbytku (FZ). Bioplyn představuje jeden z alternativních zdrojů energie a fermentační zbytek neboli digestát je sekundárním výstupem anaerobního rozkladu biologických materiálů. Bioplynové stanice ve většině případů mají jisté množství přebytečné tepelné energie. Jedním ze způsobů efektivního využití tepelné energie je její spojení se zařízením pro zahušťování fermentačního zbytku, které může být žádoucí z více příčin. V první řadě vede ke zmenšení objemu fermentačního zbytku, a kromě toho po zahuštění jsou i nižší skladovací náklady fermentačního zbytku, což se v případě výstavby nové BPS promítne v nižších nákladech. Musíme ale přemýšlet i nad tím, že se stále více vyčerpávají hnojivé látky v přírodě, které nejsou trvale udržitelné. Je vhodné snažit se získávat hnojivé látky v co nejúčinnější, zahuštěné formě, a obecně s nimi hospodárně nakládat.

Hlavním požadavkem na zařízení pro zahušťování fermentačního zbytku je, aby hnací silou pro zvýšení podílu sušiny ve fermentačním zbytku, bylo právě odpadní teplo, optimálně s minimální spotřebou elektrické energie.

Fermentační zbytek je stabilizovaný materiál v kapalné podobě, jehož vlastnosti jsou závislé na charakteru a složení vstupních substrátů a na provozních parametrech procesu (např. na teplotě ve vyhnívací nádrži, době zdržení materiálu v nádrži atd.). Jelikož stále roste počet BPS vzniká otázka, jak účinně ocenit produkty anaerobní fermentace, které získávají významné množství minerálních a organických látek po jejím ukončení. Díky svým vlastnostem a obsahu minerálních živin se nepohlíží na fugát pouze jako na odpadní produkt procesu anaerobní fermentace, ale je možnost využívat ho jako alternativní hnojivo. Kvalitní fermentační zbytek představuje hnojivo s obsahem organických látek a minerálních živin, který má pozitivní účinky na pěstování zemědělských plodin.

Surový fermentační zbytek vycházející z fermentoru (tj. nádrž, ve které probíhá anaerobní rozklad biomasy) obsahuje značné množství vody (degradačními procesy klesne podíl sušiny o 50 až 80 % oproti výchozímu materiálu a podíl vody v surovém fermentačním zbytku je často více než 90 %). Neupravený fermentační zbytek je tedy poměrně zředěný s ohledem na obsah živin. S tímto jsou spojené zvyšující se náklady na jejich skladování a přepravu. Proto je potřeba redukovat objem fermentačního zbytku a zvýšit tak v něm koncentraci živin (Brandejsová & Příbyla 2009; Vítěz et al. 2013; Matějka et al 2014; European biogas association et al. 2015).

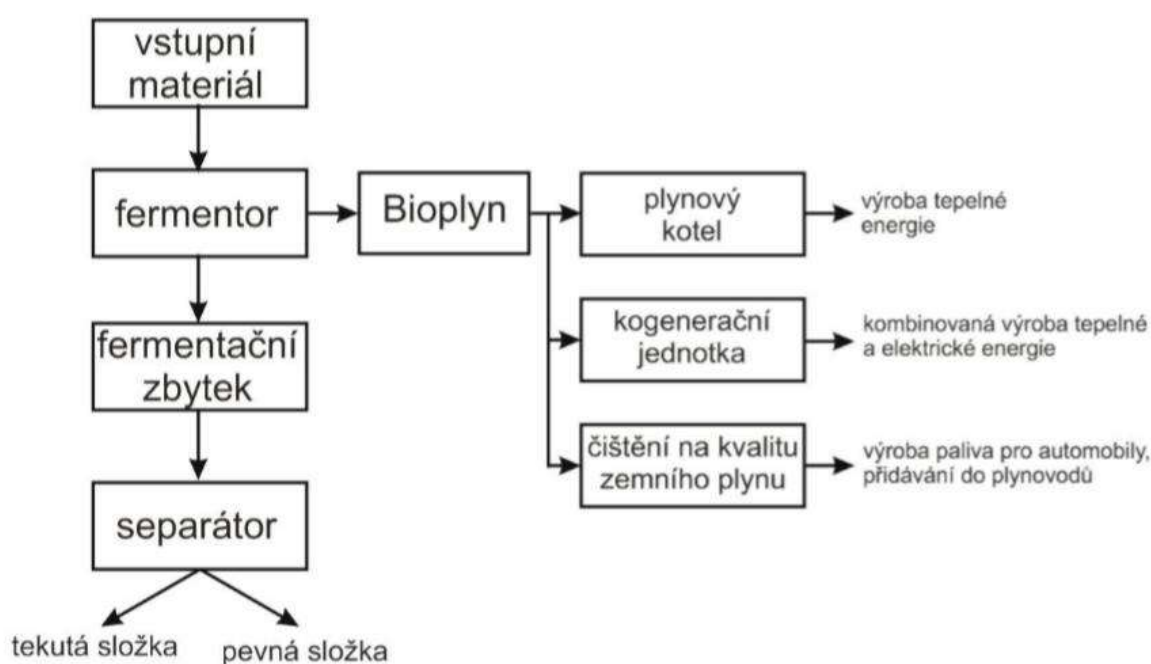
2 Cíl práce

Cílem bakalářské práce bude vytvoření literární rešerše na téma "Postupy vedoucí k racionalizaci využití živin obsažených ve fermentačním zbytku". Bude vytvořen zevrubný přehled metod vedoucích k minimalizaci ztrát živin při manipulaci s fermentačním zbytkem, vznikajícím jako vedlejší produkt při provozu zemědělských bioplynových stanic. Zároveň se práce zaměřuje na postupy vedoucí k minimalizaci objemu fermentačního zbytku. Zvláštní pozornost bude věnována zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku (tzv. fugátu) dvoustupňovou úpravou spočívající v biologické nitrifikaci a následném tepelném zahuštění.

3 Literární rešerše

3.1 Bioplynové stanice

Bioplynová stanice (BPS) je zařízení sloužící ke zpracování biomasy v reaktorech za pomoci anaerobní fermentace. Jejímž hlavním produktem je bioplyn, který lze využít jako zdroj energie a dále tzv. fermentační zbytek (FZ) neboli digestát. Fermentační zbytek může sloužit jako kvalitní hnojivo. V některých případech při separaci fermentačního zbytku dochází k rozdělení, a to na dvě složky: fugát (tekutá část) a separát (pevná část). Obecně lze říci, že se technologie bioplynových stanic skládá z několika na sebe navazujících technologických celků. Obecné schéma bioplynové stanice je znázorněno na obrázku 1 (Lapčík 2009).



Obrázek 1: Obecné schéma bioplynové stanice (Hobson et al. 1981)

3.2 Rozdělení bioplynových stanic

Bioplynové stanice se nejčastěji dělí podle zpracovávaného substrátu, a to na stanice zemědělské, čistírenské a ostatní (Brandejsová & Příbyla 2009).

3.2.1 Zemědělské bioplynové stanice

Zemědělská bioplynová stanice je jedním z nejrozšířenějších typů BPS.

Zemědělské BPS jsou určeny pro zpracování statkových hnojiv a materiálu rostlinného charakteru. Jedná se o zařízení určená pro zpracování zemědělských surovin v relativně stálém množství a neměnné kvalitě s maximálně zjednodušenou technologií (Brandejsová & Příbyla 2009).

3.2.2 Čistírenské bioplynové stanice

Čistírenské BPS zpracovávají jenom kaly z čistíren odpadních vod a jsou jejich součástí. Technologie anaerobní fermentace je používána za účelem anaerobní stabilizace kalu vznikajícího na ČOV. Tyto technologie nezpracovávají bioodpad a nenakládají s odpady, ale jsou pouze součástí kalového hospodářství ČOV. Do tohoto zařízení nepřicházejí jiné materiály než kaly z ČOV, septiků a žump. Pokud se do těchto nádrží dostanou jiné odpady podle zákona o odpadech, jedná se o ostatní bioplynové stanice (Brandejsová & Příbyla 2009).

3.2.3 Ostatní bioplynové stanice

Bioplynové stanice zpracovávající ostatní vstupy mohou zpracovávat bioodpady uvedené v příloze č. 2 metodického pokynu Ministerstva životního prostředí (MŽP).

Pokud ostatní BPS zpracovávají vedlejší produkty živočišného původu, spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1774/2002 a musí plnit veškeré podmínky v nich stanovené např. hygienizace odpadů (pasterizace, vysokoteplotní hygienizace) (Brandejsová & Příbyla 2009).

3.3 Anaerobní fermentace

Technologie anaerobní fermentace (methanová fermentace) je původně přírodní rozkladný proces probíhající bez přístupu vzduchu. Tyto procesy probíhají přirozeně např. v bažinách, na dně rybníků nebo jezer. Takové reakce jsou běžné v přírodě, ale probíhají velmi pomalu a hlavním důvodem je nízká teplota a nízká koncentrace aktivní biomasy. Jedná se o soubor procesů, při kterém směsná kultura mikroorganismů rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu kyslíku za vzniku bioplynu (Matějka et al 2014).

Tyto přírodní procesy jsou převzaty člověkem a jsou využity jak pro biologické čištění odpadních vod za anaerobních podmínek, tak pro zpracování pevných org. materiálů a odpadů v bioplynových stanicích (Matějka et al 2014).

Anaerobní zpracování organických materiálů a anaerobní čištění odpadních vod je velmi vhodné pro odpadní vody a materiály s vyšší teplotou, s vysokou koncentrací org. látek a pro substráty vyžadující hygienizaci. Výhodou je pozitivní energetická bilance, malá produkce biomasy a nízké provozní náklady. Jako vedlejší produkt při anaerobní fermentaci získáme nepáchnoucí kal a v bioplynových stanicích fermentační zbytek, který můžeme dále zpracovávat (Pandey 2008; Matějka et al 2014).

3.3.1 Fáze anaerobní fermentace

Jedná se o složitý biochemický děj, který se skládá z mnoha fyzikálních, fyzikálně-chemických a biologických procesů (Pastorek et al. 2004). Finálními produkty jsou vzniklá biomasa, plyny (CO_2 , H_2 , N_2 , CH_4 , H_2S) a nerozložitelný zbytek organické hmoty, který je dále stabilizován. Samotný proces lze rozdělit na následující čtyři fáze: hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi (Stams et al. 2003).

3.3.1.1 Hydrolýza

Prvním stádiem rozkladu je hydrolýza. Proces hydrolýzy představuje několik postupných kroků zahrnujících produkci enzymů, difúzi, adsorpci. Během tohoto stádia jsou rozkládány makromolekulární rozpuštěné i nerozpuštěné organické látky (polysacharidy, lipidy, proteiny atd.) na jednodušší organické látky, které jsou rozpustné ve vodě (Altmann et al. 2010).

Rychlost rozkladu v průběhu hydrolýzy závisí do značné míry na povaze vstupního materiálu, velikosti a tvaru částic zpracovávaného materiálu, produkci enzymů a adsorpci. Rozklad materiálu, který obsahuje polysacharidy (celulózu, hemicelulózu, škrob) je mnohem pomalejší, než rozklad materiálů obsahujících bílkoviny a tuky (Trávníček et al. 2015).

3.3.1.2 Acidogeneze

Druhou fází anaerobní fermentace je acidogeneze. Produkty hydrolýzy jsou pak uvnitř buňky rozkládány na jednodušší organické látky (kyseliny, alkoholy), oxid uhličitý a vodík (Altmann et al. 2010).

Velice důležitou skutečností je, že acidogenní mikroorganismy nespotřebovávají ve svém metabolismu mastné kyseliny, ty tak mohou být substrátem v následujícím stupni anaerobní fermentace, acetogenezi.

Hydrolýzu i acidogenezi zajišťují velmi četné kultury anaerobních mikroorganismů (čeledi: *Streptococcaceae* a *Enterobacteriaceae* a rody: *Clostridium*, *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Eubacterium* a další), které se aktivují v obou prostředích (Altmann et al. 2010).

3.3.1.3 Acetogeneze

Třetí fáze je někdy označována jako mezifáze. Při procesu acetogeneze probíhá oxidace vyšších organických kyselin, kyseliny mléčné, valerové a dalších na vodík, oxid uhličitý a kyselinu octovou (Pastorek et al. 2004). Velmi důležitou roli zde hrají tzv. syntrofní acetogenní bakterie, které produkují vodík a oxid uhličitý. Pro ně je velmi důležitá spolupráce s dalšími skupinami mikroorganismů (methanogeny, sulfát redukující bakterie), které následně spotřebovávají jimi vytvořený vodík. Přebytný vodík v systému může inhibovat činnost acetogenních mikroorganismů, a tím pádem celou produkci methanogenních substrátů v systému (Straka et al. 2003).

3.3.1.4 Metanogeneze

V posledním stádiu vzniká methan pomocí methanogenních mikroorganismů a ty rozkládají jednoduché látky na methan a oxid uhličitý (Altmann et al. 2010). Tyto organismy jsou nejdůležitější trofickou skupinou, která má specifické požadavky na životní podmínky. Methanogenní organismy rozkládají především kyselinu octovou na methan a oxid uhličitý, hydrogenotrofní bakterie produkují methan z vodíku a oxidu uhličitého. Některé kmeny metanogenních mikroorganismů se chovají jako obojetné, jsou schopny provádět oba zmíněné procesy (Pastorek et al. 2004).

Metanogenní fáze probíhá přibližně pětikrát pomaleji než předchozí fáze. Kvůli tomu se musí přizpůsobit konstrukce bioplynových technologických systémů a kontrolovat dávkování surového materiálu, aby nedošlo k přetížení fermentoru se všemi nepříznivými důsledky (Pastorek et al. 2004).

3.3.2 Faktory ovlivňující anaerobní fermentaci

Proces anaerobní fermentace ovlivňuje řada faktorů, kterými jsou například konstrukce fermentoru, teplota, pH, poměr C: N apod (Gollakota & Meher, 1988). Pro dobrý průběh procesu anaerobní fermentace je velmi důležité upravit surovinovou skladbu substrátu tak, aby se dodržely základní podmínky jako je vysoký podíl biologicky rozložitelných látek, malý obsah anorganického podílu (popelovin) a optimální obsah sušiny. U pevných odpadů bývá přibližně 22–25 % a u tekutých odpadů 8–14 % (Altmann et al. 2010). Základní požadavky na prostředí jsou uvedeny v tabulce 1 (Gollakota & Meher, 1988).

Tabulka 1: Požadavky na prostředí v průběhu anaerobní fermentace (Gollakota & Meher, 1988)

parametr	hydrolýza/acidogeneze	acetogeneze/metanogeneze
Teplota [°C]	25–35	Mezofilní 30–45 Termofilní 50–60
pH [-]	5,2–6,3	6,7–7,5
C: N [-]	10–45	20–30
Redox potenciál [mV]	+400 až -300	< -250
Požadovaný C: N:P:S	500:15:5:3	600:15:5:3
Stopové prvky	nevyžadovány	Ni, Co, Mo, Se

Mezi faktory, kterými je ovlivňován či limitován proces anaerobní fermentace, patří:

3.3.2.1 Koncentrace mikroorganismů

Každý druh mikroorganismů má jinou dobu nutnou pro vývoj a pro rozmnožování. Nejdelší generační období mají metanogenní mikroorganismy. V porovnání s nimi je generační doba hydrolytických a acidogenních mikroorganismů význačně kratší (Trávníček et al. 2015).

Tabulka 2: Generační doba anaerobních mikroorganismů (Trávníček et al. 2015)

Anaerobní mikroorganismy	Generační doba
Acidogenní mikroorg. <i>Bacteroides</i> <i>Clostridia</i>	<24 hodin 24–36 hodin
Acetogenní mikroorg.	80-90 hodin
Metanogenní mikroorg. <i>Methanosarcina barkeri</i> <i>Methanococcus</i>	5–16 dnů 10 dnů

3.3.2.2 Vstupní materiály

Biologická rozložitelnost a tím i produkce bioplynu závisí na složení vstupních materiálů (Pastorek et al. 2004). Mezi takové materiály patří tuk, polysacharidy, monosacharidy, proteiny atd. V následující tabulce je uvedena kvalita a teoretická produkce bioplynu z 1 kg organické sušiny některých složek vstupních materiálů (Trávníček et al. 2015).

Tabulka 3: Teoretická produkce bioplynu (Hobson et al. 1981)

Látky	produkce bioplynu [m ³] vztahená na kg organické sušiny	složení bioplynu [%obj.] CH ₄ : CO ₂
Tuky	1,10–1,60	80:20
Polysacharidy a monosacharidy	0,75–0,90	54:46
Proteiny	0,60–0,80	60:40

3.3.2.3 Velikost částic

Výroba bioplynu je ovlivněna velikostí částic vstupního materiálu. Pro mikroorganismy jsou špatně zpracovatelné materiály, které mají částice větší než 20 mm, protože jejich specifický povrch je daleko menší než u částic menších než 8 mm. Regulace velikosti částic vstupního materiálu tak ovlivňuje produkci bioplynu, resp. metanu (Ward et al. 2008).

3.3.2.4 Teplota

Jedním z významných faktorů je teplota, protože má přímý vliv na aktivitu různých kmenů bakterií. Optimální teplota pro mikroorganismy je taková teplota, při které nejrychleji rostou a jsou energeticky nejefektivnější.

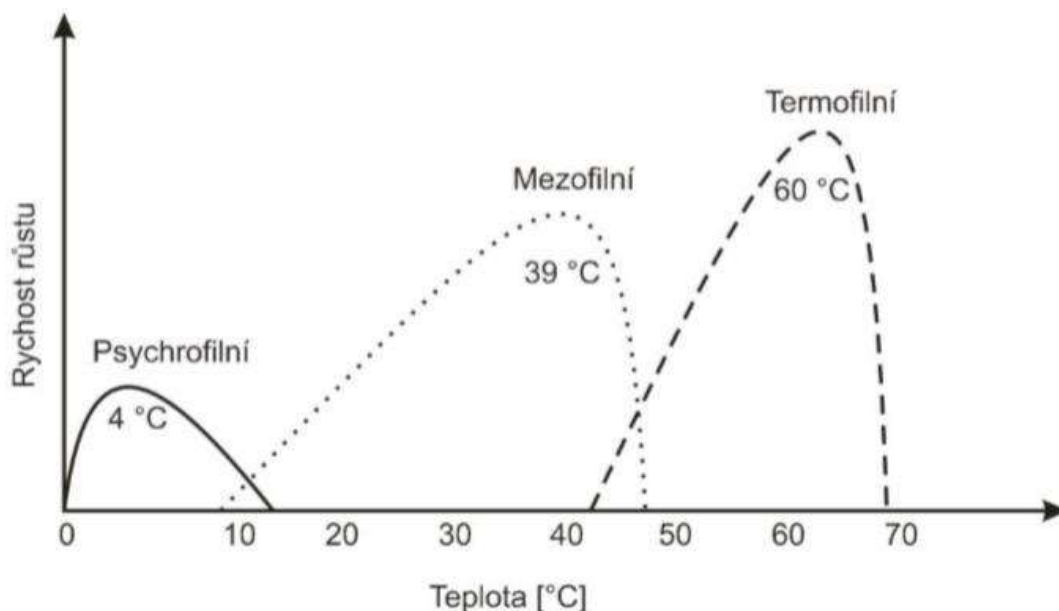
Mikroorganismy je možno členit do různých skupin v závislosti na teplotě, která je pro ně optimální. Jedná se o tyto teplotní režimy (Minimalizace produkce čistírenských kalů 2004):

- psychrofilní 0–20 °C
- mezofilní 25–40 °C
- termofilní 45–60 °C

V bioplynových stanicích se nejčastěji používá mezofilní nebo termofilní režim, protože optimální teplota je 35–55 °C (Ward et al. 2008). Bioplynové technologie provozované v praxi nepřevyšují teplotní hranici 60–70 °C (Trávníček et al. 2015), ale známe i takové metanogenní mikroorganismy, které mohou pracovat při teplotě 110 °C. Při teplotě nad 60 °C je aktivita metanogenních mikroorganismu snížena natolik, že nejsou schopny

zpracovávat produkty předchozích stupňů, a to má dopad na kumulaci mastných kyselin ve fermentoru a selhání celého procesu (Trávníček et al. 2015).

Poněvadž jsou methanogenní mikroorganismy citlivé na prudké změny teplot, je nezbytné teplotu striktně dodržovat. Bioplynové stanice provozované v termofilním režimu jsou na změny teplot náchylnější než BPS provozované v mezofilním, teplotním režimu (Trávníček et al. 2015).



Obrázek 2: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech (Junga et al. 2015)

3.3.2.5 Hodnota pH

Hodnota pH je velmi důležitým faktorem průběhu anaerobní fermentace a pro produkci bioplynu je nejlepším indikátorem stability procesu (Minimalizace produkce čistírenských kalů 2004). Různé fáze anaerobní fermentace požadují různé optimální hodnoty pH. Methanogenní mikroorganismy jsou velmi citlivé na změny pH. Prostředí s nižší hodnotou pH působí na tyto mikroorganismy inhibičně a kvůli tomu může docházet k negativnímu ovlivnění tvorby bioplynu.

Nejnižší hodnota pro přežití methanogenních mikroorganismů je obvykle označována jako hodnota pH 5. Pokud tato hodnota klesá, znamená to, že produkce mastných kyselin vytvořených acidogenními organismy je vyšší než jejich spotřeba v methanogenní fázi. Tento stav vzniká přetížením procesu nebo působením nežádoucích látek, jako jsou antibiotika, dezinfekční prostředky apod. Naopak zvýšení pH nad 8 je inhibiční pro acidogenezi (Trávníček et al. 2015).

Jako optimální pH se považuje pH v rozmezí 6,5 – 7,5 (Minimalizace produkce čistírenských kalů 2004). Tento rozsah je docela veliký, a proto optimální hodnota pH vždy závisí na zpracovávaném materiálu a použité technologii. Abychom správně udrželi konstantní hodnoty pH, je podstatné upravit vztah mezi koncentrací nižších mastných kyselin a hydrogenuhličitanů.

3.3.2.6 Poměr C: N

Mezi základní živiny anaerobních mikroorganismů patří uhlík a dusík. Poměr mezi uhlíkem a dusíkem by se měl optimálně pohybovat v rozsahu 30:1 (Pastorek et al. 2004), protože zásadně působí na růst a činnost mikroorganismů (Trávníček et al. 2015). Jakýkoliv vstupní materiál může být v případě jeho výhradního použití problematický, neboť zpravidla obsahuje limitované množství živin. Optimálním řešením je kofermentace, tzn. zpracování různých vstupních materiálů v jednom zařízení, kdy můžeme spojit vstupní suroviny s různým obsahem uhlíku a dusíku za účelem získání žádaného poměru C: N (Trávníček et al. 2015).

3.3.2.7 Přítomnost inhibujících látek

Některé sloučeniny během anaerobní fermentaci jsou schopné být toxické nebo mohou potlačovat mikrobiální společenstvo obsažené ve fermentoru. Podmínkou reakce je provozně bezpečná koncentrace inhibitorů, složení vstupních materiálů a adaptace mikroorganismů na inhibitor. Mezi hlavní inhibitory procesu bývá uváděn amoniak, ionty alkalických kovů (Li, Na, K, Rb), těžké kovy, mastné kyseliny, sulfidy, antibiotika, dezinfekční přípravky atd (Trávníček et al. 2015).

3.3.3 Produkty anaerobní fermentace

Produktem anaerobní fermentace je fermentační zbytek (digestát) a bioplyn (kalový plyn), který obsahuje především metan a oxid uhličitý. Dalšími (minoritními) složkami bioplynu jsou vodík, sirovodík, dusík, vodní pára a další (Straka et al. 2010). Spalitelnou složkou bioplynu je především metan. Jeho koncentrace je velice variabilní a pro energetické využití by se měla pohybovat od 50 % objemových výše.

Bioplyn je považován za obnovitelný zdroj energie získaný z biologicky rozložitelných materiálů a je jeden z nejlepších alternativních fosilním palivům (Junga et al. 2015). Bioplyn je bezbarvý, hořlavý plyn, který vzniká biochemickými procesy při anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných materiálů (živočišného, rostlinného nebo průmyslového původu) (Vítěz et al. 2013).

Bioplyn je směsí plynů: CH₄, CO₂, H₂, N₂, H₂S, NH₃. Hlavními složkami jsou methan 50–75 % objemových a oxid uhličitý 25–50 % objemových (Pastorek et al. 2004). Zastoupení jednotlivých složek v bioplynu je znázorněno v Tabulce 4.

Tabulka 4: Složení bioplynu (Pastorek et al. 2004)

Složka	Koncentrace
Metan (CH ₄)	50–75 [% obj.]
Oxid uhličitý (CO ₂)	25–50 [% obj.]
Voda (H ₂ O)	2–7 [% obj.] (20–40 °C)
Sirovodík (H ₂ S)	0–0,5 [% obj.]
Dusík (N ₂)	<2 [% obj.]
Kyslík (O ₂)	<2 [% obj.]
Vodík (H ₂)	<1 [% obj.]

Složení bioplynu závisí na druhu rozkládané suroviny a řízení procesu anaerobní fermentace (především na teplotě a pH). Mezi postupy energetického využití bioplynu spadá přímé spalování, výroba elektrické energie, využití bioplynu v palivových článcích apod. Další možnost, která je v dnešní době používána, je vylepšení bioplynu na čistý methan (biomethan), který získáme odstraněním oxidu uhličitého z bioplynu (Wellinger et al. 2013).

3.4 Fermentační zbytek

Anaerobní fermentace biologicky rozložitelného materiálu produkuje dva hlavní výstupy, bioplyn a fermentační zbytek.

Fermentační zbytek, který splňuje podmínky pro aplikaci na zemědělskou půdu, bývá často používán na pozemky jako hnojivo. Pokud fermentační zbytek nesplňuje požadavky legislativy, může být uplatněn jako vstupní materiál v kompostárnách, rekultivační materiál mimo zemědělskou a lesní půdu nebo po vysušení jako palivo (Vítěz et al. 2013).

Jakost a výživový obsah fermentačního zbytku jsou ovlivněny některými faktory, kromě druhu zpracovávaných vstupních materiálů se také jedná o způsob předúpravy vstupních materiálů, procesní podmínky (provozní teplota ve fermentoru, doba zdržení zpracovávaného materiálu v anaerobním reaktoru, obsah sušiny apod.), způsob a doba skladování (Vítěz et al. 2013).

Fermentační zbytek je sekundárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologických materiálů v BPS (Junga et al. 2015). Jedná se o stabilizovaný materiál v kapalné podobě. Při fermentačním procesu se rozkládají organické látky, stabilnější z nich zůstávají a společně s minerálními a organickými nutrienty tvoří fermentační zbytek.

Fermentační zbytek je po určité době odveden z fermentoru do uskladňovací nádrže, kde je skladován do svého dalšího použití. Před samotnou aplikací jej lze upravit různým způsobem. Jednou ze základních úprav fermentačního zbytku je separace pevné složky (separát) od kapalné (fugát).

Fermentační zbytek obsahuje vysokou koncentraci celkového dusíku, z čehož 60–80 % tvoří dusík amoniakální, dále pak fosfor a draslík, což má velmi kladný účinek při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu. Obsah organické hmoty a organického uhlíku ve fermentačním zbytku je ve srovnání s původním substrátem pro výrobu bioplynu snížen o určitou část snadno rozložitelných sloučenin uhlíku, které jsou přeměněny biochemickými

procesy na bioplyn (Trávníček et al. 2015). Hodnota pH fermentačního zbytku je obvykle uváděna v rozmezí 7,0 - 8,3 a účinnost rozkladu organické hmoty v průběhu anaerobní fermentace kolísá mezi 12 a 53 %. Obsah snadno rozložitelných organických látek závisí hlavně na způsobu provozu bioplynové stanice. Chceme-li aby fermentační zbytek neobsahoval snadno rozložitelné organické látky, dosáhneme toho tak, že substrát stráví delší dobu v anaerobním reaktoru BPS a dalšími faktory např. složením substrátu, teplotou atd. Přítomnost těžkých kovů a stopových prvků může zabránit používání fermentačního zbytku, jako hnojiva na zemědělských půdách. Týká se to zejména bioplynových stanic, které zpracovávají materiály s vysokou koncentrací těchto prvků. Potom může být obsah stopových prvků a těžkých kovů vyšší ve srovnání s minerálními hnojivy (Trávníček et al. 2015).

Množství fermentačního zbytku produkovaného při provozu bioplynových stanic, je dáno základní hmotnostní bilancí pro danou bioplynovou stanici. Vzhledem k tomu, že jsou nejčastěji zpracovávány materiály s vysokou vlhkostí, je množství fermentačního zbytku prakticky vždy velké, protože se vlhkost z anaerobního systému neztrácí (nevýznamná část odejde s bioplynem jako pára) (Ochodek et al. 2007). Množství fermentačního zbytku je ovlivněno množstvím zpracovávaných vstupních surovin a nakládání s ním je jednou z hlavních otázek návrhu i provozu všech bioplynových stanic.

Je – li fermentační zbytek mechanickou separací (odstředěním, lisováním) oddělen, vzniká:

- pevná frakce – tzv. separát
- kapalná frakce – tzv. fugát



Obrazek 3: Separované složky digestátu

3.4.1 Dělení fermentačního zbytku

Fermentační zbytek lze rozdělit do mnoha skupin. Nejčastěji však bývají uváděny tyto (Marada et al. 2008):

- dle vstupních surovin
- dle obsahu sušiny
- dle možnosti využití

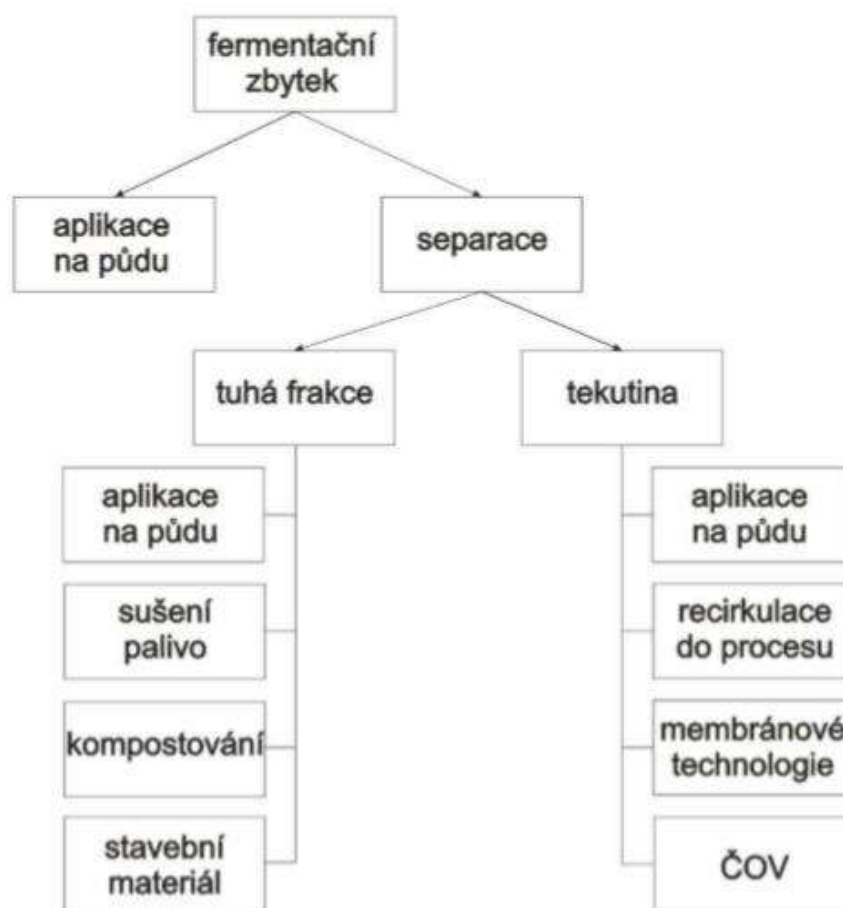
Na fermentační zbytky jsou podle legislativy přísné hygienické podmínky.

3.4.1.1 Podle použitých vstupních surovin

Vyskytuje se celá řada materiálů, které se používají jako vstupní materiál pro bioplynové stanice, např. kaly, rostlinné suroviny, biologicky rozložitelné odpady atd. Podle druhu použitých vstupních surovin je nezbytné pečlivě rozlišovat fermentační zbytek a stanovovat na něj různé požadavky v rámci platné legislativy (Marada et al. 2008).

3.4.1.2 Podle způsobu následného využití

Způsob nakládání s fermentačním zbytkem je ovlivněn jeho kvalitou, která je závislá na vstupních surovinách každé bioplynové stanice, ale i na podmínkách panujících při anaerobní fermentaci. Co všechno se dá dělat s fermentačním zbytkem, můžete vidět na obrázku 4 (Marada et al. 2008; Trávníček et al. 2015).



Obrázek 4: Některé způsoby nakládání s fermentačním zbytkem (Trávníček et al. 2015)

Využití fermentačního zbytku jako hnojiva

Použitím fermentačního zbytku jako hnojiva se do půdy transportují potřebné makro i mikroživiny. Fermentační zbytek lze použít jako hnojivo, při splnění podmínek zákona o hnojivech (zákon č.156/1998 Sb.).

Výjimkou je fermentační zbytek, který vznikl na zemědělských BPS. Provozovatel je povinen tyto zbytky aplikovat na vlastních pozemcích. O registraci hnojiva rozhoduje na základě žádosti Ústřední kontrolní a zkušební ústav zemědělský (ÚKZUZ). Společně se žádostí žadatel předkládá vzorek fermentačního zbytku, který musí být analyzován. Podle vyhlášky MŽP č. 131/ 2014 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva, je fermentační zbytek organickým hnojivem typově 18.1 e) (Vyhláška č. 131/2014 Sb.). Laboratorním rozbořem akreditovanou laboratoří se ve vzorku zjišťují následující parametry: Obsah sušiny, spalitelné látky, celkový dusík N, hodnota pH, celkový fosfor ve formě P_2O_5 , celkový draslík ve formě K_2O a přítomnost rizikových prvků (Váňa 2007).

Požadavky na fermentační zbytek a seznam sledovaných rizikových prvků s mezními koncentracemi jsou uvedeny ve vyhlášce MŽP 131/2014 sb., v platném znění. (tab.5,6).

Tabulka 5: Limitní hodnoty rizikových prvků v organických hnojivech (vyh. MŽP 131/2014 sb.)

Mg/kg sušiny	Kadmium Cd	Olovo Pb	Rtut Hg	Arsen As	Crom Cr	Měd Cu	Molybden Mo	Nikl Ni	Zinek Zn
Sušina do 13 %	2	100	1	20	100	100	5	50	300
Sušina nad 13 %	2	100	1	20	100	150	20	50	600

Tabulka 6: Požadavky na fermentační zbytek (příloha č. 3 vyhlášky MŽP 131/2014 sb)

Číslo typu	Označení typu	Minimální obsah živin	Součásti určující typ, formy a rozpustnost živin	Hodnocené součásti a další požadavky	Složení, způsob výroby	Zvláštní ustanovení
18.1 e)	Organické hnojivo	Digestát 3-13 %	sušina		Výhradně z krmiv a statkových hnojiv	Hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu
		0,3 % N	Celkový dusík	Dusík hodnocený jako celkový dusík ve vzorku		

Kvalitní fermentační zbytek, který můžeme využívat jako hnojivo, by vůbec neměl zapáchat, což můžeme dosáhnout správným složením vstupních surovin a dostatečnou dobou ve fermentoru při mezofilních nebo termofilních teplotních režimech (Vítěz et al. 2013). Mezi vhodné prostředky ke zlehčení a provzdušnění půdy patří jednotlivé separované složky (fugát, separát), vhodné jsou zejména pro použití na těžkých půdách (Alburquerque 2012).

Používání fermentačního zbytku jako hnojiva, je limitováno hygienickými požadavky, salinitou a přítomností rizikových prvků. U fermentačního zbytku bývají stanovené vyšší koncentrace Cu a Zn, které neodpovídají legislativním požadavkům (Albuquerque 2012).

Využití fermentačního zbytku jako palivo

Fermentační zbytek obsahuje hlavně špatně rozložitelnou, stabilní organickou hmotu.

Voda, která je ve fermentačním zbytku, snižuje jeho výhřevnost. K odstranění vody používáme fyzikální metodu (odlučování) nebo tepelnou metodu (sušení). Do prvního kroku, při zpracování fermentačního zbytku, patří odvodnění (k odvodnění fermentačního zbytku dochází např. při filtraci nebo centrifugaci), výhodou odvodnění fermentačního zbytku je získání nových, vedlejších produktů, které můžeme dále zpracovávat. Dále je možné sušit separát na síťových nebo na bubnových separátorech. Získaný separát je polotuhý „koláč“, který můžeme jednoduše skladovat (Frischmann 2012).

Pro následný proces sušení se vyžaduje konečná sušina separátu v rozmezí 10–15 %. Pro sušení jsou používány pásové sušárny sestaveny pro různé výkonové velikosti bioplynových stanic. Pracují s teplotou v rozmezí od 80 do 120 °C. Jako hlavní zdroj tepla se používá zbytkové teplo z kogenerace a teplo z chladicí vody. Množství odpadního tepla je nedostačující na usušení celkového množství separátu. Pokud je vlhkost fermentačního zbytku dostatečně nízká a účinnost spalování vysoká, spalování může probíhat bez potřeby vnějšího zdroje tepla nebo přídavného paliva.

3.4.2 Složení a vlastnosti fermentačního zbytku

Obecně platí, že fyzikálně-chemické vlastnosti fermentačního zbytku jsou různé, zejména v závislosti na povaze a složení substrátu a na provozních podmínkách (tj. obsah sušiny, teplota ve fermentoru, doba zdržená apod.) (Drosg et al. 2015).

Jedná se o látku vysoce bohatou na živiny. Obsahuje buňky mikroorganismů anaerobního rozkladu a nestavitelné zbytky původního substrátu. Veškeré důležité živiny jako jsou dusík, fosfor a draslík zůstanou přítomny v surovině i po anaerobní fermentaci, jsou tedy přítomny ve fermentačním zbytku. Živiny jsou navíc přítomny v lépe dostupných formách než v původním substrátu, což představuje pro rostliny snadnější využití (Pančíková 2016).

Ve srovnání s dalšími statkovými hnojivy má fermentační zbytek své výhody:

- redukce zápachu při manipulaci a hnojení
- zredukováno množství patogenů
- omezeno klíčení semen plevelů
- obsahuje žádoucí živiny (N, P, K)
- přispívá ke zlepšení odolnosti plodin
- snížení žíravého účinku kejdy na rostliny

Nevýhodami fermentačního zbytku jako hnojiva jsou:

- vysoké pH
- obsah amoniaku ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$), který zvyšuje riziko emisí amoniaku a oxidu dusného do atmosféry
- riziko znečištění podzemních a povrchových vod (Monlau et al. 2015)
- riziko zamoření půdy těžkými kovy (Cu, Zn, Mn) (Nkoa 2014)

V porovnání se zvířecími exkrementy a kaly, má fermentační zbytek nižší celkový obsah sušiny a organického uhlíku nižší poměr C: N a nižší viskozitu. Na druhou stranu má vyšší hodnotu pH a koncentraci amonných iontů ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) (Ochodek et al. 2007; Whelan et al. 2010). Vlastnosti jsou shrnuty v tabulce 7.

Tabulka 7: Vlastnosti a složení fermentačního zbytku

Parametr	Hodnota
Sušina	3-10 % hm.
Organická sušina	60-80 % hm.
pH	7-9
C/N	<10

Fermentační zbytek obsahuje o 50 až 80 % méně sušiny než výchozí materiál. Toto zmenšení podílu sušiny je způsobeno rozložením velké části sloučenin uhlíku, obsaženého v organické sušině vstupního materiálu, na metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2), tedy bioplyn (Kratochvílová et al. 2009). Koncentrace sušiny ve fermentačním zbytku se pohybuje v rozmezí 3–10 %. Obsah sušiny závisí hlavně na počátečním obsahu sušiny v substrátu a také na obsahu snadno rozložitelných organických hmot. Až 70 % sušiny fermentačního zbytku je tvořeno organickými látkami, které při aplikaci do půdy přispívají k tvorbě humusu (Drosg 2015).

Hodnota pH fermentačního zbytku je obvykle v rozmezí 7,0 – 8,3 (Gómez et al. 2007). Vyšší hodnota pH označuje degradaci nepříjemně zapáchajících mastných kyselin plus vyšší těkavost amoniaku (Drosg 2015).

Přítomnost některých nečistot ve fermentačním zbytku může být závislá na jejich nadbytku v původním substrátu. Během fermentačního procesu může být rozkládáno biologické znečištění (patogeny, semena plevelů). Míra jejich degradace závisí na teplotě a době zdržení materiálu ve fermentorech. Při teplotě nad 52 °C a zdržení ve fermentoru minimálně po dobu jedné hodiny dochází k odstranění nejrizikovějších plevelů a patogenů (Drosg 2015).

Nečistoty charakteru větších částic, nerozpuštěných látek a chemické kontaminanty (těžké kovy Fe, Ni, Co, Mo, atd.) jsou fermentačním procesem zachovány, přechází tedy do fermentačního zbytku. Mají negativní vliv na jeho kvalitu a omezují použití fermentačního zbytku na zemědělskou půdu (Vítěz et al. 2013). Výběr vhodných substrátů má tedy značný vliv na kvalitu výsledného fermentačního zbytku a na vlastnosti fermentačního zbytku mají vliv také procesní podmínky.

3.4.3 Prvkové složení fermentačního zbytku

Fermentační zbytek obsahuje vysoké koncentrace celkového dusíku, z čehož 60–80 % je dusík amoniakální, dále fosfor a draslík, což zvyšuje kladný vliv fermentačního zbytku při aplikaci na zemědělskou půdu (Tambone et al. 2009).

3.4.3.1 Původ minerálních složek fermentačního zbytku

Prvky, které jsou obsažené v systému bioplynové technologie v kapalinách, plynech a aerosolech, mohou za určitých podmínek vytvářet minerální sloučeniny amorfni anebo krystalické. Minerální fáze, obsažené ve fermentačním zbytku mohou být dvojího původu Alogenní (původní) minerální fáze a Autogenní (novotvořené) minerální fáze (Vítěz et al. 2013).

Alogenní minerální sloučeniny jsou zaváděny jako součást substrátu do bioplynových reaktorů a následně přecházejí do fermentačního zbytku. Týká se to nerozpustných anorganických látek, které nacházíme zejména v oporných a ochranných strukturách živočišných i rostlinných organismech (Vítěz et al. 2013).

Autogenní minerální sloučeniny vznikají z látek obsažených v substrátu po jeho rozkladu ve fermentoru. Probíhá zde mineralizace (rozklad organických látek na anorganické) při změně okolních podmínek prostředí, především teploty, tlaku, pH atd (Vítěz et al. 2013).

3.4.3.2 Význam minerálních sloučenin ve fermentačním zbytku

Vznik minerálních fází je pro bioplynové stanice negativní i pozitivní.

Negativním projevem je inkrustace, která způsobuje zarůstání potrubního vedení, nádrží nebo sběrných kanálů. Tyto inkrustace brání průtoku kapaliny, způsobují poruchovost armatur a dalších pohyblivých součástí zařízení. Pokud se do bioplynové stanice dostávají nečistoty společně se substrátem (například zbytky půdy), pak je jejich účinek na technologické prvky primárně mechanický (Vítěz et al. 2013).

Pozitivními projevy jsou makroelementy, které jsou vhodné pro výživu rostlin především N, P, K, Mg a stopové prvky například Fe, Cu a Zn. V minerálních sloučeninách díky tomu dochází ke stabilizaci a při aplikaci fermentačního zbytku do půdy k pozvolnému uvolňování. Tím je zároveň zabráněno rychlému odplavení prvků závlivkovou vodou (Vítěz et al. 2013).

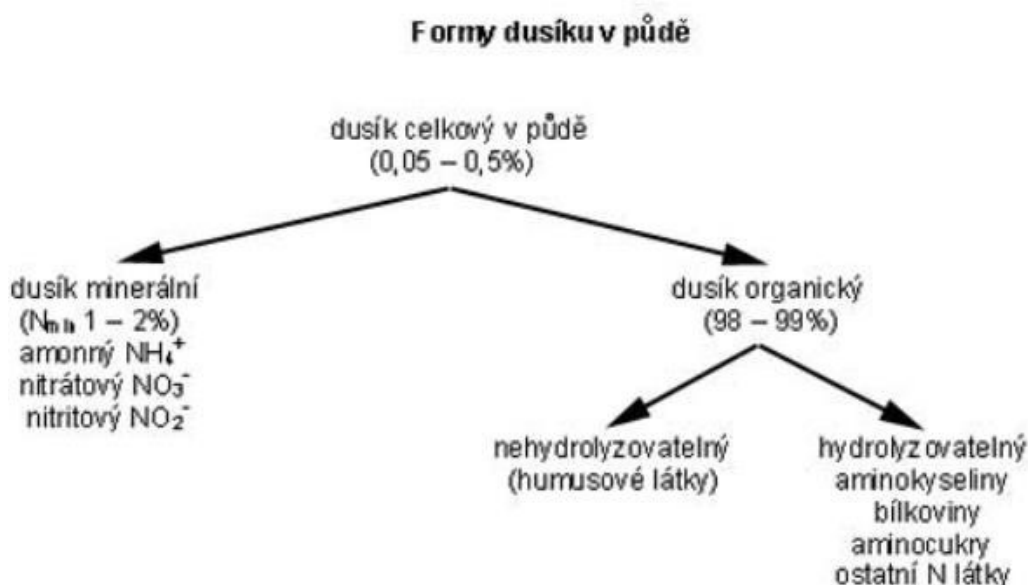
3.4.4 Přehled makroelementů a stopových prvků v půdě

V půdě je přirozený koloběh živin. Velmi důležité je množství a kvalita půdního humusu a také obsah organické hmoty v půdě, je to vlastně zásobník půdních živin. Jedním ze zdrojů živin v půdě je fermentační zbytek. Dodávání dusíku, z vnějšího prostředí musí být zajištěno především recyklací živin ve formě statkových hnojiv (Urban 2012; Alburquerque et al. 2012).

Kromě dusíku mají ostatní živiny například vápník, hořčík, fosfor atd. svůj původ v horninách a minerálech, v půdotvorném substrátu, ze kterého vznikla a nadále se tvoří půda (Urban 2012).

Dusík v půdě

V ornici se obsah dusíku pohybuje v rozmezí 0,1 – 0,2 %, může ale kolísat ve značném rozmezí 0,03-0,5 % (záleží na stanovišti, genetickém vzniku půdy atd). Dále se dá vypočítat, že v ornici je přibližně 3000-9000 kg N/ha (Balík et al. 2012). V půdě je převážná část dusíku ve formě organických sloučenin (převážně více než 95 %). Týká se to zejména rostlinných a živočišných zbytků, biomasy mikrobů a jejich metabolitů a humusových látek vznikajících při transformaci organických látek. Dusík je pro rostliny v této formě nedostupný, a proto musí přejít na minerální formy N-NH_4^+ a dále N-NO_3^- , které jsou využívány mikroorganismy, které se účastní procesů těchto přeměn, a zároveň slouží rostlinám jako zdroj dusíku (Balík et al. 2012).



Obrázek 5: Formy dusíku v půdě (Richter 2004)

Dusík v půdě podléhá mnohým přeměnám. Odehrávají se zde mineralizační procesy, kdy je v procesu amonizace uvolňován N-amon, který je zdrojem dusíku pro mikroflóru. Probíhají zde také opačné procesy, při kterých jsou minerální formy dusíku (především N-NH_4^+) využity mikroorganismy pro složení své biomasy, jde o proces imobilizace. Obsah minerálního dusíku je díky tomu ovlivňován účinností těchto procesů. V biologicky činných půdách probíhá nitrifikace, kdy je N-amon oxidován nitrifikačními organismy až na N-NO_3^- (Möller & Müller 2012).

Tabulka 8: Distribuce dusíku z hnojiv po hnojení (Vaněk et al. 2007)

	%
Využito rostlinami (nadzemní hmota)	40-60
Vázáno v organické hmotě v půdě	20-50
Minerální dusík	5-20
Ztráty denitrifikací a volatizací	2-30
Ztráty vyplavením	2-10

Fosfor v půdě

Celkový obsah fosforu v půdě se pohybuje v rozmezí 0,03 - 0,13 % (Richter & Hlušek 1994). Značná část celkového fosforu v půdách je pro rostliny nevyhovující, nemohou ho přijímat. Sloučeniny fosforu, které pracují jako eventuální zdroj výživy rostlin a půdních mikroorganismů, jsou tvořeny minerálními a organickými sloučeninami. Část minerálních sloučenin se mění v závislosti na druhu a typu půdy, hloubce půdního profilu nebo úrovni fosforečného hnojení.

Organické formy fosforu jsou nedílnou součástí organické půdní hmoty. Převážnou část organického fosforu tvoří fytyl, fosfolipidy, nukleové kyseliny, nukleoproteidy, fosforylované lipidy. Značná část organicky vázaného fosforu v půdách je následkem biologické sorpce fosforu půdními mikroorganismy, které do svých těl fosfor imobilizují a po jejich smrti se v dalších procesech mineralizace uvolňuje a zpřístupňuje se pro rostliny (Vaněk et al. 2007).

Draslík v půdě

Celkový obsah draslíku v půdě se většinou pohybuje v rozmezí 0,5 – 3,2 % (Richter & Hlušek 1994). Draslík v půdě lze rozdělit do tří kategorií:

- Draslík nevýměnný
- Draslík výměnný
- Draslík vodorozpustný

Nevýměnný draslík se nachází v primárních a sekundárních minerálech. Vázaný draslík představuje kationt K^+ , který je vázán na půdní sorpční komplex a odtud bývá vytěsněn roztoky neutrálních solí (Richter & Hlušek 1994).

Výměnný draslík má zvláštní význam pro rostliny, protože takto vázané kationty K^+ jsou ze značné části snadno přístupné a nepodléhají rychlému vyplavení (Richter & Hlušek 1994).

Vodorozpustný draslík je nejlepší forma draslíku pro rostliny, protože se nachází v půdním roztoku. Podíl vodorozpustného draslíku je přibližně 1–10 % z draslíku výměnného (Richter & Hlušek 1994).

Vápník v půdě

Střední obsah vápníku je přibližně 2 %, může být ale i mnohem větší (Richter & Hlušek 1994). Nejvíce se nachází v těžko rozpustných sloučeninách, především uhličitanech, křemičitanech, hlinitokřemičitanech a síranech. Rozpustnost uhličitanů je závislá na pH půdy, čím je pH kyslejší, tím je větší rozpustnost. Vliv na rozpustnost uhličitanů má rovněž obsah CO_2 , protože se v jeho důsledku rozpouští vápenec na hydrogenuhličitan. Tento hydrogenuhličitan je dobře rozpustný ve vodě, a tím pádem dobře pohyblivý v půdě a může být snadno vyplavován. Pokud je vápníku v půdním roztoku přiměřené množství, zajišťuje nám dobrý průběh většiny biologických, chemických i fyzikálních procesů včetně vytvoření vhodných podmínek pro růst a zásobování rostlin (Vaněk et al. 2007).

Hořčík v půdě

Průměrný obsah hořčíku se v půdě pohybuje v rozmezí 0,4 - 0,6 % (Richter & Hlušek 1994). Celkový obsah hořčíku v půdě je určován minerálním složením matečných hornin (vysoký obsah je v minerálech serpentín a olivín). Vedle těchto minerálů jsou významnými

sloučeninami uhličitany – magnezit a dolomity. Hořčík se nachází i ve formě síranů, fosforečnanů, chloridů i dusičnanů. Hořečnaté soli jsou poměrně dobře rozpustné. Podobně jako vápník tak i hořčík působí na fyzikálně chemické a biologické vlastnosti půdního roztoku a sorpčního komplexu. Přijatelnost hořčíku ovlivňuje antagonistické působení jiných iontů jako K^+ , NH_4^+ , Na^+ , Ca^{2+} (Richter & Hlušek 1994; Vaněk et al. 2007).

Železo v půdě

Většina půd má vysoký obsah železa, a to okolo 2 %. Vysoké procento železa je v oxidové formě Fe^{3+} , kde je značně stabilní, a proto se v těchto formách hromadí. Většina železa se nachází v půdě v anorganické formě, ale v malém množství se objevuje i v komplexech s humusovými látkami. Pro anorganické sloučeniny železa je typická malá rozpustnost, která je závislá na pH prostředí. V redukčních podmínkách (tzn. v zamokřených a málo provzdušněných půdách) převládá přítomnost a příjem Fe^{2+} , ale v provzdušněných půdách s dostatečnou biologickou činností se jedná o Fe^{3+} (Richter & Hlušek 1994).

Měď v půdě

Měď se v půdě vyskytuje v organických a anorganických sloučeninách. Měď je v půdě silně vázaná, a to na sorpční komplex, proto je velmi málo pohyblivá a její větší část je koncentrovaná v humusovém horizontu. Dá se říci, že většina půd má mědi dostatek a ani při jejím nadbytku ji rostliny nepřijímají ve větším množství, než potřebují (Vaněk et al. 2007).

Zinek v půdě

Zinek se v půdě vyskytuje především v minerální formě jako součást minerálů. Jedna část je vázaná jako Zn^{2+} nebo $ZnOH^+$ v sorpčním komplexu a malé procento zinku je v půdě vázáno v organických sloučeninách. Mobilita zinku v půdě je relativně malá, zvláště při vyšším obsahu fosforu a vyšších hodnotách pH (Vaněk et al. 2007).

3.4.5 Zpracování fermentačního zbytku

Cílem zpracování fermentačního zbytku může být například získání produktu s vyšší koncentrací živin než v nezpracovaném fermentačním zbytku. Fermentační zbytek, který ještě nebyl upraven, je zředěný s ohledem na obsah živin. Obsah vody v surovém fermentačním zbytku je více než 90 % (European biogas association et al. 2015) a to přináší zvýšené náklady na dopravu, při jeho aplikaci na zemědělskou půdu a na jeho skladování. Toto jsou některé důvody, kvůli kterým musíme upravovat fermentační zbytek před jeho samotným využitím. Dalšími mohou být environmentální a legislativní omezení. Z legislativních důvodů nelze všechny fermentační zbytek uplatnit na půdu v surové podobě (Drosg et al. 2015). Též zpracování fermentačního zbytku přispívá k efektivnímu řízení zdrojů (fermentační zbytek představuje udržitelný zdroj fosforu a draslíku). Fermentační zbytek, který obsahuje velké množství vody, není vhodné aplikovat na pozemky, které se nacházejí ve velmi deštivých oblastech a vlhkých podnebních pásech (Drosg et al. 2015).

Existuje řada technologií pro zpracování fermentačního zbytku z BPS, které lze navzájem vhodně kombinovat. Tradiční způsob zpracování fermentačního zbytku spočívá ve využití jeho maximálního potenciálu: recyklace všech nutrientů, které obsahuje (N, P, K),

jejich aplikace jako hnojiva a použití separované kapalné frakce k zavlažování nebo k ředění obsahu fermentoru (Došek et al. 2015).

Nejvíce je využívána separace fermentačního zbytku na pevnou (separát) a kapalnou (fugát) frakci. K tomu se v závislosti na konzistenci fermentačního zbytku nejčastěji používá šnekový lis nebo odstředivka. Poté následuje úprava kapalné a pevné části odděleně (Drosg et al. 2015).

Mezi technologie pro další zpracování kapalné frakce fermentačního zbytku patří tepelné zahuštění, stripování amoniaku atd (Drosg et al. 2015). Koncentrát se aplikuje jako hnojivo na zemědělské půdě, čistá odpadní voda může být využívána v areálu BPS. K nejčastěji používaným odvodňovacím technologiím fugátu patří tepelné zahušťování, membránové technologie nebo stripování amoniaku. Separát může být použit v zemědělství, zahradnictví a k úpravě krajiny, kdy se využívá podobným způsobem jako kompost. Pevnou frakci je také možno sušit a vyrábět z ní tuhá alternativní paliva, nebo může být karbonizována (Došek et al. 2015).

3.4.6 Ztráty dusíku z půdy

Ztráty dusíku z půdy můžeme rozdělit do dvou velkých skupin:

- Ztráty dusíku z půdy vyplavením
- Únik dusíku v plynné formě

3.4.6.1 Ztráty dusíku z půdy vyplavením

Vyplavení dusičnanů do vod je ovlivněno množstvím a rozdělením srážek, teplotou vzduchu, půdním typem, odběrem živin porostem, obsahem půdního minerálního dusíku, množstvím, uložením a formou N hnojiv, včetně přidavku inhibitoru nitrifikace (Duffková & Mühlbachová 2016).

Obecně platí, že užitečnější z hlediska vyplavení N-NO_3 do vod jsou dělené dávky hnojiv, které zabezpečí rovnoměrnější distribuci živin pro porosty a sníží tak riziko ztrát dusíku v období nízkého čerpání živin (tzn. do aplikace druhé dávky fermentačního zbytku nebo fugátu). Případné ztráty dusíku je možno také snížit dodáním inhibitoru nitrifikace do tuhých a kapalných hnojiv. Při nedostatku srážek může aplikovaný dusík zůstat v amonné formě, a to vyvolá nižší dostupnost pro rostliny, což může snížit výnos pěstovaných plodin a zvýšit obsah zbylého N v půdě po sklizni. Kvůli tomu je nejlepší zapracovat inhibitor do větších hloubek (např. 15-20 cm) (Duffková & Mühlbachová 2016).

3.4.6.1.1 Jednorázová dávka fugátu a fermentačního zbytku

Hnojiva jsou aplikována jednorázově před setím.

Během vegetační sezóny jsou hlavním faktorem srážky, které ovlivňují vyplavení N-NO_3^- . Pokud jsou odchylky rozložení srážek od optimální potřeby vody, vede to dříve či později ke ztrátám N-NO_3^- vyplavením. To znamená, že rizikové nejsou jenom vyšší srážkové úhrny, ale i suché období. Vysoké srážky přímo ovlivňují ztráty dusičnanů a během suchého období se dusík hromadí v půdě (Duffková & Mühlbachová 2016).

3.4.6.1.2 Dělená dávka fugátu a fermentačního zbytku

Hnojiva jsou aplikována ve dvou dělených dávkách: 55-60 % z celkové dávky před setím s okamžitým zapravením a zbytek ve fázi 4.-5. lístku (Duffková & Mühlbachová 2016).

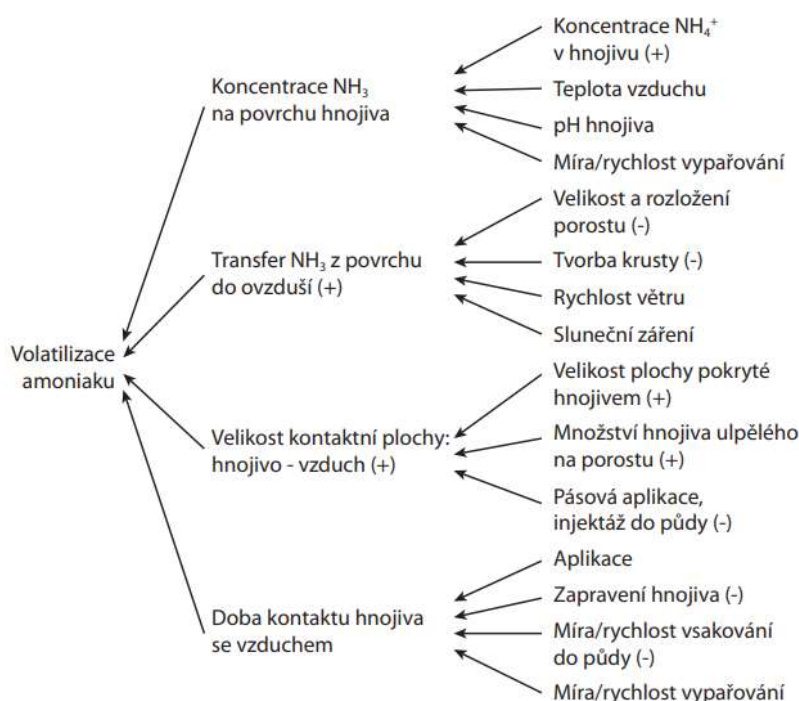
Dělením dávek fugátu při srážkově silně vlhké vegetační sezóny snižuje vyplavení N-NO_3 ve srovnání s jednorázovou dávkou fugátu. Po aplikaci dělené dávky fugátu je vyplavení nižší než po aplikaci dělené dávky minerálních hnojiv (Duffková & Mühlbachová 2016).

Ve srážkově silně vlhkém roce nemá dělení dávek fugátu vliv na obsah reziduálního dusíku, ale naopak v suchém roce dělená dávka fugátu zvyšuje riziko vyplavení N-NO_3 , ve srovnání s jednorázovou dávkou (Duffková & Mühlbachová 2016).

3.4.6.2 Ztráty dusíku z půdy v plynné formě

Pro účinné využití aplikovaného dusíku je potřeba minimalizovat ztráty N volatilizací NH_3 . Volatilizace znamená těkavost, je to proces přeměny chemické látky na plynný nebo parní stav.

Na půdu by se neměla aplikovat tekutá hnojiva před očekávanými intenzivními srážkami, ale naopak mírný déšť po aplikaci nám snižuje úniky amoniaku do ovzduší (Thapa et al. 2015). Vhodné je též chladnější počasí bez přímého slunečního světla. Hodně záleží na půdních podmínkách (pH, vlhkost, teplota, sorpční schopnost), na vlastnostech hnojiva (sušina, pH, podíl amonného dusíku), způsobu aplikace, době a způsobu zapravení (obr. 6). Dokonce při teplotách blízkých nule dochází k nízké, ale stále volatilizaci, která vede k masovým ztrátám dusíku (Sommer & Hutchings, 2001; Whelan et al. 2010).



Obrázek 6: Faktory ovlivňující volatilizaci amoniaku z aplikovaných statkových hnojiv (Sommer & Hutchings 2001)

Dešťové srážky během nebo ihned po aplikaci ředí fermentační zbytek, snižují koncentraci $\text{NH}_4\text{-N}$ a zpomalují volatilizaci. Současně se může usnadnit vsakování hnojiv do půdy. Je zde ale riziko opětovného zvýšení emisí NH_3 při dalším vypařování vody

(Gordon & Schuepp, 1994). Ztráty amoniaku se mohou zvětšit v důsledku opakovaného zvlhčení hnojiva (například při opakovaných srážkách) (Chambers et al. 1997).

Při místní aplikaci kejdy vlečenými hadicemi jsou ztráty amoniaku podstatně nižší (méně než 1 % aplikovaného $\text{NH}_4\text{-N}$) než při aplikaci postřikem (více než 10 % aplikovaného $\text{NH}_4\text{-N}$) (Sommer & Hutchings 2001). Podstatná je i doba kontaktu hnojiva s ovzduším a rychlost jeho vsakování či zapravení. Zjistilo se, že u fermentačního zbytku je rychlejší vsakování do půdy než u původní kejdy před digescí, což vysvětluje jeho lepší homogenitu a tokové charakteristiky (Dumitru 2014).

Ztráty dusíku představují pro zemědělce vážný ekonomický problém. Nitrifikace umožní oxidaci významné části amoniakálního dusíku na dusičnany a zároveň vede k poklesu pH fugátu, čímž mohou být minimalizovány ztráty dusíku těkáním amoniaku.

3.4.7 Separace fermentačního zbytku

Základním krokem zpracování fermentačního zbytků, je zpravidla separace pevné a kapalné fáze. Surový fermentační zbytek obsahuje sušinu v rozmezí 3-13 % (v případě mokré anaerobní fermentace – mokrá fermentace představuje nejrozšířenější technologii anaerobní fermentace ve většině zemí EU, vč. České republiky). Separací procesy je možno fermentační zbytek rozdělit na separát (obrázek 7), který obsahuje většinu pevných látek a na fugát – tekutou frakci (obrázek 8) (Došek et al. 2015). Separát je možno využívat v zemědělství s výhodou podstatně nižších nákladů na dopravu vzhledem ke zmenšenému obsahu vody. Oddělená tuhá frakce vyžaduje nižší nároky na uskladnění. Separát může být uplatňován na zemědělskou půdu, kompostován nebo sušen. Další možností zpracování tuhé frakce je výroba pelet pro vytápění. Avšak vysoký obsah dusíku v palivu a s tím související zvýšený podíl emisí NO_x při jeho spalování tvoří určitá omezení při používání této varianty (Drosg et al. 2015).



Obrázek 7: Tuhá frakce – separát



Obrázek 8: Tekutá frakce – fugát

Naším cílem při separaci je oddělit kapalnou frakci od pevné. Složení separované kapaliny se liší pro různé způsoby dělení fermentčního zbytku a také pro jeho původní složení. Obsah sušiny v pevné frakci bývá považován za ukazatel výkonu separace. Určitou část kapalné složky je možné recyklovat v procesu BPS – za účelem naředění vstupních surovin. Zbylý fugát může být přímo uplatněn na zemědělské půdě nebo dále upravován s cílem zvýšení koncentrace hnojivých látek a redukce objemu fugátu (Drosg et al. 2015).

Technologie využívané k separaci fermentčního zbytku:

- Šnekový lis
- Dekantační odstředivka
- Filtry – vibrační filtry
- pásové filtry

3.4.8 Zpracování pevné frakce fermentčního zbytku

Separát je oddělená tuhá část z fermentčního zbytku. Oddělení probíhá např. pomocí odstředivky v BPS.

Obsah sušiny v separátu se pohybuje v rozmezí od 20 do 30 %. Samostatná pevná frakce je již zčásti stabilizována, a to nám zjednodušuje její skladování a dává možnost k přímé aplikaci separátu, jako hnojiva či půdního přídatku. Přesto ale tato frakce neustále obsahuje jisté množství biologicky rozložitelného materiálu, jehož potenciální rozklad způsobí emise zápachu. Chceme-li získat stabilní a prodejný hnojící produkt, je nezbytné provést další zpracování separátu, např. kompostování, sušení atd (Fuchs & Drosg 2013).

3.4.8.1 Kompostování

Kompostování je vedle sušení nejčastější následný způsob zpracování separátu (Rehl & Müller). Přímé zemědělské využití separátu není vždy vhodné či bezpečné, a to hlavně

kvůli riziku emise zapáchajících látek vlivem mikrobiálního rozkladu. Naprostá biologická stabilizace může být pomocí kompostování, tedy aerobní fermentace (Monfet et al. 2018).

V průběhu kompostování dochází pomocí mikroorganismů k aerobnímu rozkladu a ke změně organické hmoty na kompost (Monfet et al. 2018). Kompost je stabilizovaný organický materiál obsahující humusotvorné látky a díky pomalému uvolňování živin tvoří ideální bio hnojivo a je také náležitý k obohacení půdy. Během kompostování může docházet pomocí nitrifikace k uložení dusíku do formy dusičnanů, což zabraňuje jeho ztrátám. Ztráty ale může způsobovat následná denitrifikace dusičnanů na N_2 . Určité množství dusíku se ale může uvolnit ve formě plynného amoniaku (Frischmann 2012). Vzhledem k vlhkosti separátu a jeho částečné degradaci vlivem fermentačního procesu, je potřeba ho doplnit zdrojem uhlíku např. dřevní štěpky nebo travní hmoty. Přidaný materiál nám napomáhá stabilizovat kompost a přisun vzduchu do procesu (aerobní podmínky) (Drosg et al. 2015). Zvláštním druhem kompostování je vermikompostování (nejpokročilejší metoda kompostování) tzn. degradace bioodpadů pomocí žížal za účelem získání produktu pro hnojení, obnovení půdní kultury apod (Hanč & Plíva 2013).

3.4.8.2 Sušení

Sušení je proces zpracování pevného podílu fermentačního zbytku, který se orientuje na stabilizaci produktu, snížení jeho celkové hmotnosti a zvýšení koncentrace živin. K sušení se nejčastěji využívá přebytečné teplo z kogenerační jednotky BPS. Nároky na teplo jsou poměrně vysoké, přímo úměrné obsahu vody, což klade nároky na vysokou účinnost předcházející mechanické separace (Frischmann 2012). Sušit je možno mimo separovanou tuhou frakci a také původní fermentační zbytek bez předchozí úpravy. Častěji se ale tento typ zpracování materiálu aplikuje na separát (Drosg et al. 2015). Máme dva principy procesu (sušení přímé a nepřímé):

- sušení přímé (konvekční)
Při přímém sušení je přiváděn horký plyn. Příklady zařízení pracujících tímto způsobem jsou solární, rotační bubnové, pásové a fluidní sušičky (Vondra 2017).
- sušení nepřímé (kontaktní)
Při nepřímém sušení je teplo k sušenému materiálu přenášeno teplosměnnou plochou (Vondra 2017). Rovněž v tomto případě se jedná o proces kombinující přenos hmoty (difúzi) a přenos tepla (kondukcí). Kontaktní sušení probíhá např. v diskové sušárně.

Vyskytují se různé druhy sušáren, které používáme k sušení surového fermentačního zbytku nebo pevné frakce, např. pásová sušička, bubnová sušička, fluidní sušička apod. Pro sušení fermentačního zbytku se používá pásová sušárna, která pracuje s teplotou 80–120 °C a využívá zbytkové teplo z kogenerace (Došek et al. 2015). Alternativou uvedených sušiček může být systém solárního sušení s podporou přebytečného tepla, z kogenerační jednotky (Drosg et al. 2015, Frischmann 2012).

Plyn odváděný ze sušiček fermentačního zbytku obsahuje prachové částice, amoniak a další těkavé látky. Abychom snížili emisi těchto látek, je zapotřebí vybavit systém prachovými filtry, mokrou vypírkou nebo jinými složkami k čištění plynů (Drosg et al. 2015).

Sušený fermentační zbytek může být prodáván v sypké podobě nebo ve formě granulí, čímž umožní jednodušší skladování, manipulaci, přepravu a využití materiálu (Frischmann 2012). Tyto produkty se poskytují jako hnojivo pro zahradnictví a do pěstitelských školek atd (Drosg et al. 2015).

Usušený materiál se může také využívat pro výrobu tuhých alternativních paliv. V kombinaci s dalšími druhy biomasy (např. dřevní odpad z lesní těžby, seno, sláma aj.) se materiál lisuje do briket (obrázek 9), které je možné spalovat (Kára & Koutný 2009).



Obrázek 9: Brikety ze separátu a různých druhů biomasy (Kára & Koutný 2009).

3.4.8.3 Karbonizace

Další úpravou separátu je jeho termochemická přeměna (karbonizace) na biouhel nebo jinak řečeno biochar (tzn. biouhel je obdobou dřevěného uhlí, ovšem vyrobený ze zbytkové biomasy). Ke vzniku biouhlu dochází vlivem dostatečně vysoké teploty, za minimálního nebo žádného přístupu vzduchu (Hu et al. 2010). Chemicky stabilní uhlík, který nepodléhá dalšímu rozkladu ani oxidaci, představuje základní složku zuhelněné biomasy (obrázek 10). Karbonizace je chemická reakce (anaerobní), během které vznikají pyrolýzní plyny a voda, dehty a tuhý zbytek – biouhel.

Kapalnou frakci fermentačního zbytku můžeme filtrovat přes biouhel, v němž se zadrží živiny. Biouhel podporuje zlepšení kvality zemědělské půdy, zvýšení úrodnosti a také zamezuje vyplavování živin a snižuje emise skleníkových plynů.



Obrázek 10: Biouhel (Došek et al. 2015)

3.4.9 Zpracování kapalně frakce fermentačního zbytku (fugátu)

Navzdory separaci tuhé frakce od kapalně, fugát stále obsahuje velké množství nerozpuštěných látek a živiny, hlavně amoniakálního dusíku (N-amon). Oddělený fugát nelze vypouštět přímo do vodních recipientů (nevyhovuje environmentálním požadavkům). Část kapalně frakce bývá využita v BPS pro úpravu sušiny substrátu na požadovanou hodnotu, a to během drcení a promíchání výchozího substrátu předtím, než vstoupí do fermentorů. Při zpracování BRKO (tzn. odpad např. biologicky rozložitelný odpad, směsný komunální odpad, papír atd.) kapalně frakce je vždy nutná předúprava vstupujícího bioodpadu drcením. Množství použitelného fugátu závisí na vlhkosti substrátu a na koncentraci amonného dusíku a solí v procesu (vysoká koncentrace těchto látek vede k inhibici dějů ve fermentoru). Kapalnou frakci můžeme využít jako procesní vodu, abychom snížili náklady na další úpravu fugátu. Pokud má BPS svoji kompostárnu, lze kapalnou frakci použít k hydrataci kompostu (Drosg et al. 2015).

Vylepšit využití živin obsažených ve fugátu je možno fyzikálně-chemickými metodami, vedoucími k získání amonného dusíku, např. stripováním amoniaku. Veškeré postupy jsou spojeny s produkcí odpadního materiálu (tj. voda zbavena živin). Taková odpadní voda se velmi obtížně čistí, protože obsahuje velké množství různých chemických látek (Drosg et al. 2015).

3.4.9.1 Tepelné zahušťování

Tepelné zahušťování neboli odpařování, podobně jako membránové procesy, se zaměřuje na zvýšení koncentrace živin, za současného snížení obsahu vody (snížení objemu) (Drosg et al. 2015). Hlavní podmínkou pro uplatnění této technologie je dostatek tepla, což u zemědělských BPS bývá splněno, protože mají dostatečně velký přebytek tepla.

V zařízení, které je označováno jako odparka dochází k odlučování nejtěkavější složky z roztoku, suspenze nebo emulze. Takovým způsobem se získává nejtěkavější složka směsi (nejčastěji voda) nebo se zahušťuje roztok. Vstupní proud (nástrík) se v odparkách dělí na destilát a koncentrát (Vondra et al. 2015). Pro odpařování vody z fugátu je charakteristické, že brýdové páry obsahují amoniak a těkavé organické kyseliny. Tento problém lze částečně řešit

snížením pH fugátu, což má za následek, že prakticky veškerý amoniak je přítomen ve formě NH_4^+ a zůstává v koncentrátu. Další možností je nitrifikace N-amon obsaženého ve fugátu. Nitrifikace je biochemická oxidace N-amon na dusičnany a je součástí přirozeného koloběhu dusíku ve vodním prostředí (kapitola 3.4.10). Destilát vzniká kondenzací odloučených par v kontaktu s chladicí vodou, kterou může být v některých případech přehříváný nástřík. Zdrojem tepla může být např. horká voda, pára, tepelné čerpadlo atd. Odparky mohou být jedno či vícestupňové, pracující za atmosférických podmínek i za sníženého tlaku (vakuové) (Vondra et al. 2015). Výhodou vakuových odparek je provoz za relativně nízkých teplot ($<100\text{ }^\circ\text{C}$), který je umožněn snížením bodu varu kapaliny (Chiumenti et al. 2013). Schéma jednostupňové odparky zachycuje obr. 12.

Pro zpracování tekuté frakce fermentačního zbytku se používají:

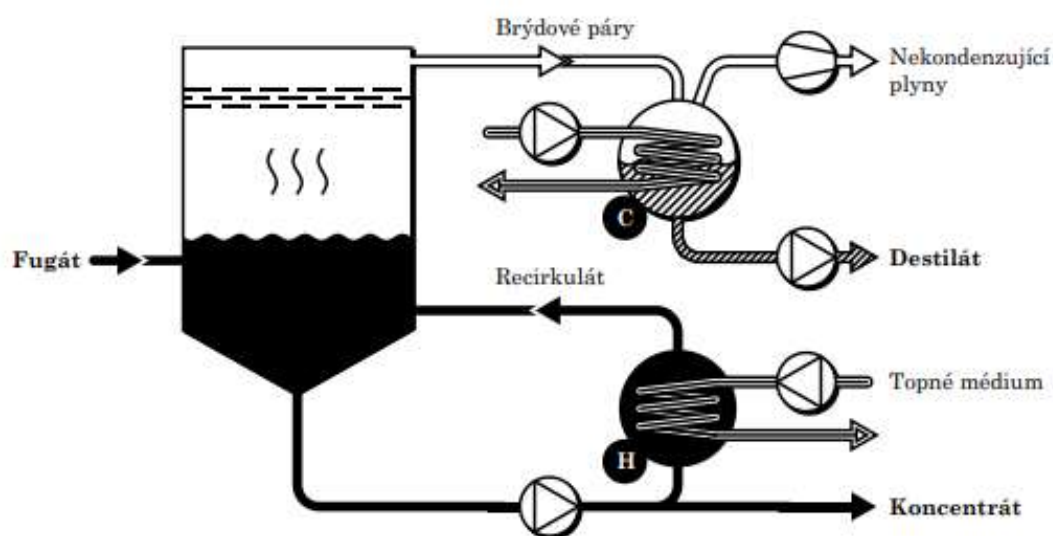
- odparky s externím ohřevem a nucenou cirkulací
- odparky s externím ohřevem a přirozenou cirkulací

Tyto dva typy zařízení se používají pro svou relativně robustní konstrukci s ohledem na obsah pevných látek ve fugátu. Velké částice je přesto stejně jako u membránových procesů potřeba odstraňovat, ale z pravidla stačí dostatečně účinná mechanická separace (Drosg et al. 2015).

Hned po separaci tekuté frakce je především úprava fugátu a potom samotná evaporizace. Úprava spočívá v přidání kyseliny sírové H_2SO_4 , díky tomu se sníží hodnota pH a dojde ke stabilizaci dusíku ve formě NH_4^+ (po procesu tepelné zahušťování zůstane prakticky veškerý dusík v koncentrátu) (Frischmann 2012; Drosg et al. 2015). Po okyselení fugátu vstupuje na řadu odpařování – třístupňový systém nízkotlakového odpařování. Nízkotlakový systém dovoluje dosáhnout varu kapaliny při nižší teplotě (Drosg et al. 2015). Zkondenzovanou páru je možno použít jako procesní vodu v BPS. Za určitých okolností by kondenzát z tohoto procesu mohl být vhodný pro bezprostřední vypouštění do povrchových vod. Bohužel tomu tak ve většině případů ale není, protože kapalina obsahuje vyšší koncentraci amoniaku a těkavých organických kyselin, než dovolují limity (Drosg et al. 2015).

Proces tepelné zahušťování se uplatňuje k zahušťování cukerné šťávy, k výrobě koncentrovaných kapalných hnojiv atd. Využití nachází také v petrochemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu. Nejrozšířenější použití odparek je však odsolování mořské vody, jež neustále nabývá na významu.

Na základě zkušeností se při zpracování fugátu udává tepelná energetická náročnost tohoto procesu ve výši 300-350 kWh na tunu odpařené vody (Drosg et al. 2015).

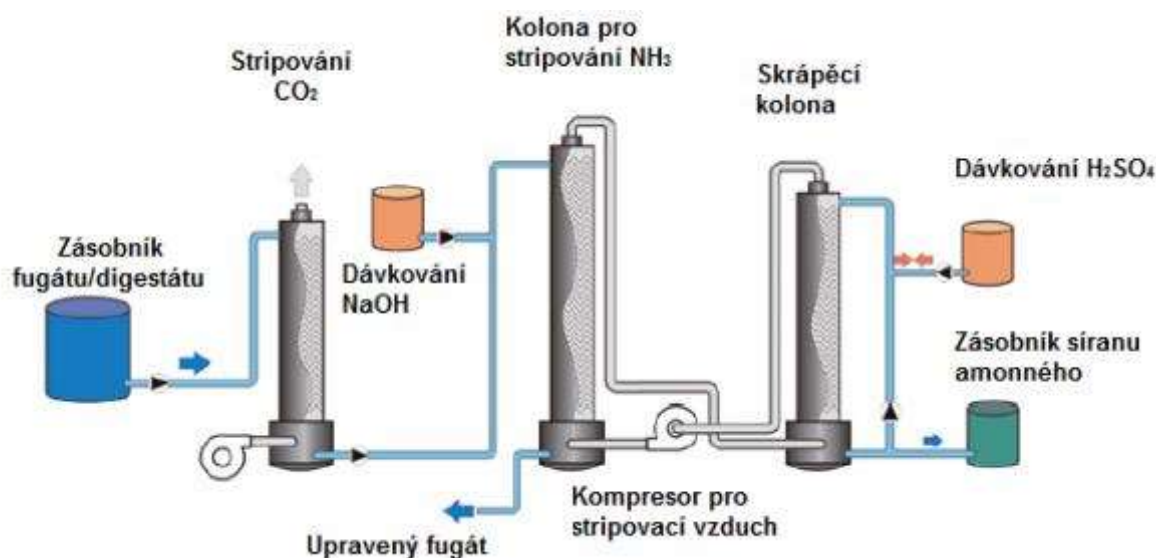


Obrázek 11: Odparka s extrémním ohřevem a nucenou cirkulací (C a H značí kondenzátor) (Vondra 2017)

3.4.9.2 Stripování amoniaku

Stripování plynem je proces výměny hmoty, při kterém z kapaliny přechází těkavé látky do plynu, zpravidla do vzduchu nebo páry (Vaneekhaute et al. 2017). V tomto případě, je cílem odstranit z fugátu dusík, ve formě amoniaku. Ke zvýšení těkavosti amoniaku, ve vodném roztoku, pomáhá zvýšená teplota a hodnota pH. Pro vyšší teplotu lze využít odpadní teplo z kogenerace a vyšší hodnoty pH dosáhneme odstraněním CO_2 nebo přidáním alkálie (např. vápno).

Samotný proces probíhá v tzv. stripovacích kolonách. Existují dva hlavní procesy stripování amoniaku – stripování vzduchem a stripování párou. Při stripování vzduchem (obrázek 12) vstupuje ohřátý fugát do stripovací kolony, kde je prvním krokem odstranění CO_2 . V další stripovací koloně, která obsahuje výplňový materiál za účelem zvětšení plochy rozhraní kapalně a plynné fáze, dochází k přesunu amoniaku z kapalného fugátu do proudu plynu. Z plynné fáze je amoniak odstraněn ve skrápěcí koloně pomocí kyseliny sírové H_2SO_4 za vzniku síranu amonného $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, který je obchodně ceněným hnojivem. Plyn, který byl vyčištěný, může být znovu použit ve stripovací koloně (Drosg et al. 2015; Vaneekhaute et al. 2017).



Obrázek 12: Stripování amoniaku vzduchem (Došek et al. 2015)

Při stripování párou je princip velmi podobný jako na obrázku 10, rozdíl je v tom, že tam není potřeba skrápěcí kolona, neboť amoniak může společně s párou kondenzovat za vzniku amonné vody (Drosg et al. 2015).

Ve výplňové stripovací koloně, může dojít k zneprůchodnění kolony zbytkovými pevnými částicemi, vyskytujícími se v kapalně frakci. Z toho důvodu, je potřeba pečlivá separace fermentačního zbytku, před použitím této technologie. Hlavní výhodou stripování amoniaku je dosažení čistého dusíkatého hnojiva. Roztok tohoto hnojiva může být použit k rozšíření a standardizování dalších produktů úpravy fermentačního zbytku, a to vede ke zvýšení jejich prodejnosti (Frischmann 2012).

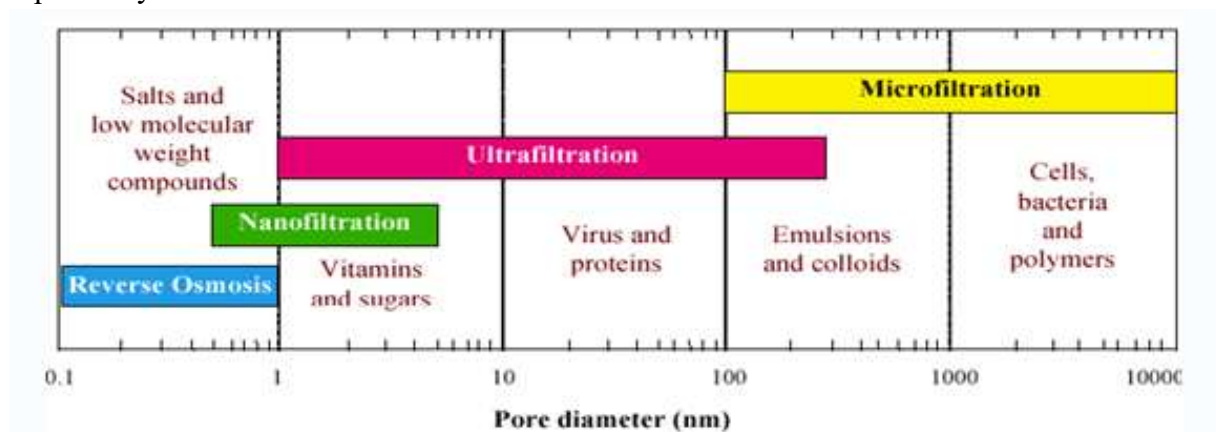
3.4.9.3 Membránové procesy

Membránový proces je fyzikální separační proces, při kterém čistěná, kapalná látka vstupuje přes membránu. Tento proces vede k zakoncentrování živin v jednom proudu (retenát), za současné tvorby relativně čisté vody v druhém proudu (permeát) (Monfet et al. 2018). Membrána působí jako síto a umožňuje zachytit některé částice, resp. nečistoty. Částečně vyčištěná voda prochází přes membránu.

Velikost částic, které je membrána schopna zachytit, závisí na velikosti pórů membrány a transmembránového tlaku (Charcosset 2006). Membránové procesy lze na základě tohoto kritéria rozdělit na (Drosg et al. 2015):

- mikrofiltraci (MF)
- ultrafiltraci (UF)
- nanofiltraci (NF)
- reverzní osmózu (RO)

Na obrázku 13 jsou popsány jednotlivé membránové procesy s ohledem na velikost separovaných částic.



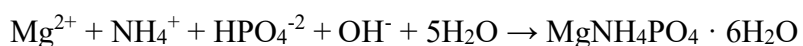
Obrázek 13: Přehled membránových procesů (Slávik & Uher 2014)

Membránové čištění je složitý proces, který se skládá z několika kroků. Výchozím materiálem je fugát, který byl od fermentačního zbytku oddělen, například pomocí dekantační odstředivky. Následuje mikrofiltrace, ultrafiltrace, a nakonec reverzní osmóza (Drosg et al. 2015). Používají se polymerní membrány, ale nejčastěji se používají keramické membrány, které jsou mohutnější a chemicky odolnější.

Výsledkem zpracování fugátu membránovou technologií, je snížení objemu a zkoncentrování hnojiva. Voda z procesu, je většinou uspokojivě čistá pro přímé vypouštění (Frischmann 2012). Nevýhodou membránového čištění, je omezené množství vyčištěné vody, velký podíl vedlejších produktů a poměrně drahé i energeticky náročné čištění membrány. Filtrace fugátu představuje technologicky a finančně náročnou metodu úpravy fermentačního zbytku (Drosg et al. 2015).

3.4.9.4 Vysrážení struvitu

Tento proces je pro získávání dusíku a fosforu z fugátu, za současné krystalizace hydratované sloučeniny zvané struvit (Monfét et al. 2018), který je dobrým hnojivem s pomalu se uvolňujícími živinami (Vaneeckhaute et al. 2017). Reakce vedoucí ke vzniku:



Struvit (obrázek 14) se získá ve formě krystalů a lze ho použít jako anorganické hnojivo nebo jako surovinu pro výrobu pelet.



Obrázek 14: Struvit vyrážený ve formě krystalů (vlevo), struvitové pelety (vpravo)
(Frischmann 2012)

Pro zvýšení efektivity tvorby struvitu se do fugátu přidává oxid hořečnatý a kyselina fosforečná. Vysrážení struvitu se obvykle provádí v reaktorech s fluidním ložem. Oddělení struvitu od roztoku se uskutečňuje v odstředivce nebo dochází k sedimentaci struvitových krystalů na dně reaktoru.

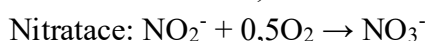
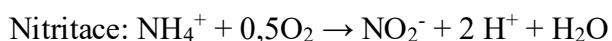
Nevýhodou této metody bývá nevhodný poměr N a P ve fugátu a je nutná přítomnost velkého množství chemických látek, což má za následek vysoké provozní náklady. Výhodou je jednoduchý a spolehlivý provoz (Zarebska et al. 2015).

3.4.10 Biologická nitrifikace

Nitrifikace je děj postupné biochemické oxidace N-amon na dusitany a dusičnany v aerobních podmínkách. Proces nitrifikace je citlivý na vnější podmínky například na pH, teplotu, koncentraci kyslíku, účinek inhibitorů atd.

Při tepelném zahušťování potřebujeme zamezit úniku amoniaku do atmosféry. Dá se toho docílit úpravou hodnoty pH fugátu. Upravit pH fugátu je možné bez přidávání chemických činidel a dosáhneme toho při nitrifikaci N-amon obsaženého ve fugátu. Nitrifikace je biochemická oxidace N-amon na dusičnany plus je součástí koloběhu dusíku ve vodním prostředí (Míchal et al 2017).

Nitrifikace probíhá ve dvoustupňovém procesu a podílejí se na něm dvě nezávislé skupiny nitrifikačních bakterií. V prvním stupni dochází k oxidaci amoniakálního dusíku na dusitany činností nitrifikačních organismů (ammonium oxidizing bacteria – AOB) – nitritaci. Následně v druhém stupni na dusičnany činností nitrifikačních organismů (nitrite oxidizing bacteria – NOB) – nitrataci. Organismy ve druhém stupni nitrifikace jsou mnohem citlivější na podmínky procesu než organismy v prvním stupni.



Každý stupeň nitrifikace je provázen jinou skupinou bakterií. V prvním stupni jsou bakterie rodu *Nitrosomonas*, *Nitrosococcus* a další a v druhém jsou bakterie rodu *Nitrobacter*, *Nitrospira* a další (Svehla et al. 2017).

V první fázi (nitritaci) jsou uvolňovány ionty H^+ . Ve vodním prostředí s velkou koncentrací N-amoniaku dochází při nitrifikaci k poklesu hodnoty pH a ke zmenšení ztrát dusíku těkáním amoniaku. Pokud značná část N-amoniaku není při nitrifikaci převedena do oxidované formy, zastoupení těkavého NH_3 je minimální (Míchal et al 2017).

Nitrifikační mikroorganismy jsou Gram-negativní, autotrofní mikroorganismy využívající jako zdroj uhlíku formy oxidu uhličitého (CO_2). Jako akceptor elektronů při tomto procesu se využívá rozpuštěný molekulární kyslík a při nitrifikaci mikroorganismy využívají energii oxidace. Při biologické nitrifikaci se uvolňují vodíkové ionty, které se podílí na snížení hodnoty pH. Současně se snižuje hodnota kyselinové neutralizační kapacity. Vhodné pH je v rozmezí 7,5–8,5. Pro první stupeň je nejvhodnější pH 7,9–8,2 a pro druhý stupeň 7,2–7,6 (Malá 2008).

Tabulka 9: Základní údaje nitrifikace

	NITRIFIKACE
Reakce	biochemická oxidace
Prostředí	aerobní (oxické)
Hlavní mikroorganismy	chemolitotrofní
Hlavní vstupní sloučenina	amoniakální dusík
Hlavní vystupující sloučenina	dusičnany
Uvolňuje se	vodíkový iont
Vliv na pH	klesá do kyselé oblasti
Optimální pH	7,5 – 8,5
Závislost na teplotě	ano (velká)
Růstová rychlost bakterií	malá
Potřeba organického substrátu	Ne

3.4.11 Skladování a způsob používání fermentačního zbytku

Fermentační zbytek se nesmí používat na půdě, výjimkou je vegetační období (Wisniewski et al. 2015). Je nutné vyřešit jeho skladování. Skladování a způsob využití hnojiv musejí být v souladu s vyhláškou č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů. Podle této vyhlášky se fermentační zbytek (fugát) musí skladovat v nepropustných, nadzemních nádobách, nádržích nebo jímkách a v těchto skladovacích nádržích je nutné použít míchadla, aby se na hladině nevytvořila obtížně odstranitelná krusta (Dvořáček 2008). Separát se musí skladovat ve stejných nádobách, jako tuhá statková hnojiva, se zabráněním přítoku povrchových nebo srážkových vod. Separát ze statkových hnojiv, který slouží pro vlastní využití, může být před jeho použitím uložen na zemědělské půdě nejdéle 24 měsíců.

Část fugátu se zpětně využije k naředění vstupního substrátu na požadované hodnoty, při vstupu do fermentorů, zbytek se použije na hnojení.

Při aplikaci fermentačního zbytku na povrch orné půdy nesmí dojít k průniku do povrchových vod a na sousední pozemek. Rovněž je nutno zapracovat fermentační zbytek do půdy tak, aby se zábránilo úniku amoniaku.

Během použití fermentačního zbytku na ornou půdu je nutné ho zapracovat do 24 hodin. U aplikace separátu je nutné dodržet jeho zapravení do 48 hodin. Evidenci hnojení požaduje zákon o hnojivech. K evidenci aplikace fermentačního zbytku na zemědělskou půdu je tabulka uvedená v příloze č.1 k vyhlášce č.377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojit.

3.4.12 Legislativa omezující nakládání s fermentačním zbytkem

Nitrátová směrnice je předpis Evropské unie (91/676/EHS) vytvořený pro ochranu vod před znečištěním dusičnany ze zemědělství. Jeden ze zákonných požadavků na hospodaření, které jsou kontrolovány v systému kontroly dotací („cross compliance“). Na území České republiky je nitrátová směrnice uplatněna v § 33 vodního zákona (zákon č.254/2001 Sb.). Prováděcím předpisem je nařízení vlády č. 262/2012 Sb., o stanovení zranitelných oblastí a akčním programem, ve znění pozdějších předpisů (zkráceně NV č. 262/2012 Sb.) (Směrnici 2018).

Zranitelné oblasti dusičnany (ZOD) jsou oblasti, kde se vyskytují vody znečištěné dusičnany ze zemědělských zdrojů. Tyto oblasti jsou vymezeny v hranicích katastrálních území (k.ú.). Vymezení zranitelných oblastí podléhá přezkoumání a případným úpravám nejdéle ve čtyřletých intervalech (Směrnici 2018).

Nitrátová směrnice řadí fermentační zbytek mezi organická a organominerální hnojiva. Dávka fermentačního zbytku v současné době není omezena mimo zranitelné oblasti (cca 50% zemědělské plochy ČR). Během dávkování fermentačního zbytku, se musí vycházet z obsahu dusíku a je potřeba dávat pozor, zda jsou % N v absolutní (stoprocentní sušině) nebo v čerstvé hmotě fermentačního zbytku (Pecinová & Halousková 2005).

4 Závěr

Bakalářská práce si kladla za cíl představit technologie vhodné ke zpracování fermentačního zbytku z provozu bioplynových stanic. Hlavní motivací úpravy fermentačního zbytku (digestátu) v BPS je redukce jeho objemu a zvýšení koncentrace živin v něm obsažených. Nezpracovaný fermentační zbytek obsahuje značné množství vody (více než 90 %), což má za následek poměrně vyšší náklady na jeho skladování a přepravu. Využití odvodňovacích technologií k úpravě fermentačního zbytku tak výrazně přispěje ke snížení těchto nákladů. Další výhodou zpracování fermentačního zbytku je možnost k odvodňovacím procesům využít odpadního tepla z kogenerační jednotky. Bioplynové stanice ve většině případů mají jisté množství přebytečné tepelné energie, jež může být efektivně využita právě ke zmíněným účelům. Významnou roli v opodstatnění úpravy fermentačního zbytku hrají rovněž environmentální a legislativní omezení, která definují požadavky na nakládání s fermentačním zbytkem a na jeho kvalitu.

Na základě provedené rešerše lze technologie vhodné k úpravě fermentačního zbytku rozdělit do dvou hlavních skupin, a to zpracování původního fermentačního zbytku a upravování separované složky. Separace tuhé a kapalné frakce fermentačního zbytku se provádí např. pomocí šnekového lisu nebo dekantální odstředivky. Tuhá frakce (separát) se může kompostovat nebo sušit a použít k výrobě tuhých alternativních paliv. Cílem další úpravy tekuté frakce (fugátu) je vytvoření koncentráту a relativně čisté vody. Při stripování amoniaku nebo vysrážení struvitu získáváme v koncentrované formě většinou dusík, popřípadě fosfor. Koncentrát se aplikuje jako hnojivo na zemědělské půdě, čistá voda může být využívána v areálu BPS. K nejčastěji používaným odvodňovacím technologiím fugátu patří tepelné zahušťování a membránová technologie.

5 Literatura

- Albuquerque J. A, de la Fuente C, Ferrer-Costa A, Carrasco L, Cegarra J, Abad M, Bernal M. P. 2012. Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and bioenergy* **40**: 181-189.
- Albuquerque J. A, et al. 2012. Agricultural use of digestate for horticultural crop production and improvement of soil properties. *European Journal of Agronomy* **43**: 119-128.
- Altmann V, Vaculík P, Mimra M. 2010. Technika pro zpracování komunálního odpadu: vědecká monografie. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Balík J, Černý J, Kulháněk M. 2012. Balance dusíku v zemědělství. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Brandejsová E, Příbyla Z. 2009. Bioplynové stanice:(zásady zřizování a provozu plynového hospodářství). GAS, Praha.
- Došek M, Holba M, Černý M. 2015. Technologie vs. fermentační zbytek. Odpadové fórum. Mendelova Univerzita v Brně, Brno.
- Drosg B, Fuchs W, Al Seadi T, Madsen M, Linke B. 2015. Nutrient recovery by biogas digestate processing. IEA Bioenergy.
- Duffková R, Mühlbachová. 2016. Metodický postup pro efektivní užití digestátu ze zemědělských bioplynových stanic. Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, Praha.
- Dumitru M. 2014. Studies concerning the utilisation of digestate in biogas plants. Scientific Paper Series Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development, 14.1.
- Dvořáček T. 2008. Základní problémy přípravy a provozu bioplynových stanic v České republice. Biom.cz. Available from <https://biom.cz/cz-rychle-rostouci-dreviny/odborne-clanky/zakladni-problemy-pripravy-a-provozu-bioplynovych-stanic-v-ceske-republice> (accessed October 2008).
- European Biogas Association. 2015. Digestate Factsheet: The value of organic fertilisers for Europe's economy, society and environment. Digestate Factsheet **9**: 2017.
- Frischmann P. 2012. Enhancement and treatment of digestates from anaerobic digestion. A review of enhancement techniques, processing options and novel digestate products Project code: OMK006-002 Research date: February 2012.
- Fuchs W, Drosg B. 2013. Assessment of the state of the art of technologies for the processing of digestate residue from anaerobic digesters. *Water science and technology* **67.9**: 1984-1993.
- Gollakova K. G., Meher K. K. 1988. Effect of particle size, temperature, loading rate and stirring on biogas production from castor cake (oil expelled). *Biological wastes*, **24.4**: 243-249.

- Gómez X, Cueto M.J, García A.I, Morán A. 2007. An evaluation of stability by thermogravimetric analysis of digestate obtained from different biowastes. *Journal of hazardous materials*, **149.1**: 97-105.
- Gordon R, Schuepp P. 1994. Water-manure interactions on ammonia volatilization. *Biology and fertility of soils*, **18.3**: 237-240.
- Hanč A, Plíva P. 2013. Vermikompostování bioodpadů. Certifikovaná metodika. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.
- Hobson P.N, Bousfield S, Summers R. 1981. Methane production from agricultural and domestic wastes. Applied Science Publishers, London.
- Hu B, Wang K, Wu L, Yu SH, Antonietti M, Titirici MM. Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Advanced materials* **22.7**: 813-828.
- Charcosset C. 2006. Membrane processes in biotechnology: an overview. *Biotechnology advances* **24.5**: 482-492.
- 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.
- Junga P, Vítěz T, Vítězová M, Geršl M. 2015. Technika pro zpracování odpadů II. Mendelova univerzita, Brno.
- Kára J, Koutný R, Kouda J. 2009. Využití fermentačních zbytků anaerobní digesce jako paliva. Výzkumný ústav zemědělské techniky, v.v.i., Praha.
- Kratochvílová Z, Habart J, Sladký V, Jelínek F, Rosenberg T, Stupavský V, Dvořáček T. 2009. Průvodce výrobou a využitím bioplynu. CZ Biom – České sdružení pro biomysu, Praha.
- Lapčík V. 2009. Průmyslové technologie a jejich vliv na životní prostředí. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, Ostrava.
- Malá J. ODSTRANĚNÍ DUSÍKU Z VOD S VYSOKOU KONCENTRACÍ AMONNÝCH SOLÍ A NÍZKOU KONCENTRACÍ BIOLOGICKY ROZLOŽITELNÉ ORGANICKÉ HMOTY V SB-REAKTORU [Habilitační práce]. Vysoké učení Technické, Brno.
- Marada P, Večeřová V, Kamarád L, Dundálková P, Mareček J. 2008. Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Matějka J, Kajan M, Nobilis L, Rosenberg T, Klast Bioplyn z.s.p.o. 2014. Studie využití bioplynu pro energetickou bezpečnost a rozvoj obcí a mikroregionů (úvod pro metodiku). Technologická agentura České republiky.
- Míchal P, Švehla P, Pacek L, Tlustoš P. 2017. Zpracování kapalně frakce fermentačního zbytku biologickou nitrifikací a tepelným zahuštěním. In: WASTE. p. 299.

- Minimalizace produkce čistírenských kalů. 2004. Minimalizace produkce čistírenských kalů (přednášky ze semináře konaného k závěrečnému projednání výsledků řešení projektu Národní Agentury pro zemědělský výzkum QD 1069 "Minimalizace množství produkovaných čistírenských kalů"). Asociace čistírenských expertů České republiky, Klatovy.
- Ministerstvo zemědělství. 1998. Zákon č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd (zákon o hnojivech). Pages 6709-6715 in Sbírka zákonů České republiky, 1998, částka 54. Česká republika.
- Ministerstvo zemědělství. 2014. Vyhláška č. 131/2014 Sb., kterou se mění vyhláška Ministerstva zemědělství č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, a vyhláška č. 377/2013 Sb., o skladování a způsobu používání hnojiv. Pages 1314-1345 in Sbírka zákonů České republiky, 2014, částka 56. Česká republika.
- Möller K, Müller T. 2012. Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences* **12.3**: 242-257.
- Monfet E, Aubry G, Ramirez A. A. 2018. Nutrient removal and recovery from digestate: a review of the technology. *Biofuels* **9.2**: 247-262.
- Monlau F, Sambusiti C, Ficara E, Aboulkas A, Barakat A, Carrère H. 2015. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives. *Energy & Environmental Science* **8.9**: 2600-2621.
- Nkoa R. 2014. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review. *Agronomy for Sustainable Development* **34.2**: 473-492.
- Ochodek T, Koloničný J, Branc M. 2007. Technologie pro přípravu a energetické využití biomasy. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava.
- Pančíková J. 2016. Digestáty a jejich využití v zemědělství. Uroda.cz. Available from <https://www.uroda.cz/digestaty-a-jejich-vyuziti-vzemedelstvi/> (accessed February 2016)
- Pandey A. 2008. Handbook of plant-based biofuels. CRC press, Boca Raton.
- Pastorek Z, Kára J, Jevič P. 2004. Biomasa: obnovitelný zdroj energie. FCC Public, Praha.
- Pecinová A, Halousková O. 2005. Současný stav zpracování bioodpadů v legislativě a praxi: sborník semináře: 23.-24.2.2005 Seš-Ústupky, hotel Jezerka. Vodní zdroje Ekomonitor, Chrudim.
- Rehl T, Müller J. 2011. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies. *Resources, Conservation and Recycling* **56.1**: 92-104.
- Richter R, Hlušek R. 1994. Výživa a hnojení rostlin: Určeno pro posl. AF, ZF. Vysoká škola zemědělská, Brno.
- Richter R. (2004). Dusík v půdě. Mendelova univerzita v Brně, Brno. Available from https://web2.mendelu.cz/af_221_multitext/vyziva_rostlin/html/agrochemie_pudy/puda_n.htm (accessed January 2007).

- Slávik A, Uher M. 2014. Membránové procesy při úpravě vod. ASIO, spol. s.r.o., Available from www.asio.cz/cz/247.membranove-procesy-pri-uprave-vod (accessed March 2014).
- SMĚRNICI, ZÁKLADNÍ INFORMACE O. NITRÁTOVÉ. Základní informace o nitrátové směrnici (aktualizace 2020). Nitrat.cz. Available from <http://www.nitrat.cz/zakladni-informace-o-nitratove-smernici.html> (accessed April 2018).
- Sommer SG, Hutchings NJ. 2001. Ammonia emission from field applied manure and its reduction. *European journal of agronomy* **15.1**: 1-15.
- Stams AJM, Oude Elferink SJWH, Westermann P. 2003. Metabolic interactions between methanogenic consortia and anaerobic respiring bacteria. *Advances in biochemical engineering/biotechnology*.
- Straka F, Cíahotný K, Dohányos M, Jeníček P, Kajan M, Lacek P, Zábranská J. 2010. Bioplyn (příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. 3. zkrácené vydání. GAS, Praha.
- Straka F, Dohányos M, Zábranská J, Dědek J, Malíjevský A, Novák J, Oldřich J, Kunčarová M, Musilová M. 2003. Bioplyn (příručka pro výuku, projekci a provoz bioplynových systémů. GAS, Říčany.
- Svehla P, Radechovská H, Páček 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 Management* **64**: 96-106.
- Tambone F, Genevini P, D'Imporzano G, Adani F. 2009. Assessing amendment properties of digestate by studying the organic matter composition and the degree of biological stability during the anaerobic digestion of the organic fraction of MSW. *Bioresource technology* **100.12**: 3140-3142.
- Thapa R, Chatterjee A, Johnson JM, Awale R. 2015. Stabilized nitrogen fertilizers and application rate influence nitrogen losses under rainfed spring wheat. *Agronomy Journal* **107.5**: 1885-1894.
- Trávníček P, Vitáček I, Vítěz T, Kotek L, Junga P. 2015. Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Urban J. 2014. Úrodnost půdy a výživa rostlin. *Zemědělec* **4**: 26-26.
- Váňa J. 2007. Využití digestátů jako organického hnojiva. CZ Biom – České sdružení pro biomasu. Available from <https://biom.cz/czt/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-organickeho-hnojiva> (accessed April 2007)
- Vaneeckhaute C, Lebuf V, Michels E, Belia E, Vanrolleghem PA, Tack FM, Meers E. 2017. Nutrient recovery from digestate: systematic technology review and product classification. *Waste and Biomass Valorization* **8.1**: 21-40.
- Vaněk V, Balík J, Pavlíková D, Tlustoš P. 2007. Výživa polních a zahradních plodin. Profi Press, Praha.

- Vítěz T, Geršl M, Mareček J, Kudělka J, Krčálová E. 2013. Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastností půd. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Vondra M, Bobák P, Vítězslav M. 2015. Využití odpadního tepla k úpravě odpadních vod z průmyslových procesů. Vodohospodářské technicko-ekonomické informace **57.6**: 35-43.
- Vondra M. 2017. Zařízení pro zahušťování odpadní vody z bioplynových stanic [PhD Thesis]. Vysoké učení technické v Brně, Brno.
- Ward AJ, Hobbs PJ, Holliman PJ, Jones DL. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. Bioresource technology **99.17**: 7928-7940.
- Wellinger A, Murphy J, Baxter D. 2013. The biogas handbook: science, production and applications. Woodhead Publishing, Cambridge.
- Whelan MJ, Everitt T, Villa R. 2010. A mass transfer model of ammonia volatilisation from anaerobic digestate. Waste Management **30.10**: 1808-1812.
- Wiśniewski D, Gołaszewski J, Białowiec A. 2015. The pyrolysis and gasification of digestate from agricultural biogas plant/Piroliza i gazyfikacja pofermentu z biogazowni rolniczych. Archives of Environmental Protection, Zabrze.
- Zarebska A, Romero Nieto D, Christensen KV, Fjerbæk Søtoft L, Norddahl B. 2015. Ammonium fertilizers production from manure: a critical review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology **45.14**: 1469-1521.