

Mendelova
univerzita
v Brně



MINISTERSTVO ZEMĚDĚLSTVÍ
ČESKÉ REPUBLIKY

**MINERALOGICKO-CHEMICKÁ
CHARAKTERISTIKA FERMENTAČNÍCH
ZBYTKŮ PŘI VÝROBĚ BIOPLYNU
A MOŽNOSTI JEJICH VYUŽITÍ PRO
ZLEPŠENÍ VLASTNOSTI PŮD**

**Tomáš Vítěz, Milan Geršl,
Jan Mareček, Jan Kudělka, Eva Krčálová**

Brno 2013

Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastností půd

Vítěz T., Geršl M., Mareček J., Kudělka J., Krčálová E.

- 2013-

- 2/47 -

Název | **Mineralogicko-chemická charakteristika fermentačních zbytků při výrobě bioplynu a možnosti jejich využití pro zlepšení vlastností půd**

Objednatel | **Ministerstvo zemědělství ČR,
Praha 1, Těšnov 17, PSČ 117 05
Odbor bezpečnosti potravin
IČ: 00020478**

Důvěrnost, copyright a kopírování | Tento dokument byl zpracován v rámci Smlouvy o dílo č.309-2013-14312. Obsah nesmí být poskytován třetím stranám za jiných podmínek, než jak je uvedeno ve smlouvě.

Jednací číslo | 23613/2013-MZE-14312

Status zprávy | Vydání 1 stran 47

Zhotovitel | **Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta
Ústav zemědělské, potravinářské a environmentální techniky
Zemědělská 1, 613 00 Brno**

Vypracoval | **Ing. Tomáš Vítěz, Ph.D.**

Kolektiv autorů | **Mgr. Milan Geršl, Ph.D.
prof. Ing. Jan Mareček, DrSc., dr.h.c.
Ing. Jan Kudělka
Ing. Eva Krčálová, Ph.D.**

Schválil | **prof. Ing. Jan Mareček, DrSc.**

Brno, říjen 2013

Obsah

1. Úvod a současný stav řešené problematiky	7
2. Bioplynové stanice	7
3. Proces anaerobní fermentace	9
4. Rozdělení bioplynových stanic	11
4.1 Podle druhu zpracovávaného materiálu	11
4.1.1 Zemědělské bioplynové stanice	11
4.1.2 Čistírenské bioplynové stanice	12
4.1.3 Ostatní bioplynové stanice	13
4.2 Dělení podle obsahu sušiny zpracovávaného materiálu	13
4.3 Dělení podle provozní teploty ve fermentoru	13
4.4 Dělení podle počtu fermentorů zařazených v sérii	14
4.5 Dělení podle způsobu dávkování vstupního materiálu do fermentoru	15
5. Parametry ovlivňující anaerobní fermentaci a výslednou kvalitu fermentačního zbytku	16
5.1 Koncentrace mikroorganismů	16
5.2 Vstupní materiál	17
5.3 Velikost částic	17
5.4 Teplota	19
5.5 Hodnota pH	20
5.6 Zatížení fermentoru organickými látkami	21
5.7 Doba zdržení	21
5.8 Míchání obsahu fermentoru	22
5.9 Poměr C:N	22
5.10 Obsah stopových prvků	23
6. Inhibitory anaerobní fermentace	24
7. Vstupní materiály pro bioplynové stanice	25

8. Bioplyn	29
9. Fermentační zbytek	30
9.1 Dělení fermentačních zbytků	31
9.1.1 Podle použitých vstupních surovin.....	31
9.1.2 Rozdělení fermentačních zbytků dle použitých vstupních surovin.....	31
10. Možnosti použití fermentačního zbytku.....	32
11. Minerální složení fermentačních zbytků	34
11.1 Původ minerálních složek fermentačních zbytků	34
11.2 Význam minerálních fází ve fermentačním zbytku	35
11.3 Praktický výzkum minerálních fází ve fermentačním zbytku	36
11.3.1 Elektronová mikroskopie s elektronovou mikrosoudou	36
11.3.2 Rentgenová difrakce	37
12. Zpracování a aplikace fermentačního zbytku do půdy.....	39
12.1 Zacházení s fermentačním zbytkem z pohledu legislativy	39
12.2 Aplikace fermentačního zbytku na zemědělskou půdu	39
12.3 Vlastnosti fermentačního zbytku jako organického hnojiva.....	40
12.4 Omezení při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu.....	43
12.5 Skladování Fermentačních zbytku BPS	44
13.Literatura	45

Seznam Tabulek

Tabulka 1: Požadavky na prostředí v průběhu anaerobní fermentace.

Tabulka 2: Generační doby anaerobních mikroorganismů.

Tabulka 3: Teoretická produkce bioplynu.

Tabulka 4: Průměrné kvalitativní parametry siláží kukuřic a čiroku.

Tabulka 5: Složení bioplynu.

Tabulka 6: Požadavky na fermentační zbytek podle přílohy č. 3 vyhlášky 474/200 Sb.

Tabulka 7: Limitní obsahy rizikových prvků ve fermentačním zbytku podle přílohy č. 1 vyhlášky 474/200 Sb.

Tabulka 8: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-K-11.

Tabulka 9: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-K-20.

Tabulka 10: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-ST-29.

Tabulka 11: Základní parametry fermentačního zbytku.

Tabulka 12: Sušina a obsah NPK v tuhé a tekuté části fermentačního zbytku v závislosti na metodě odvodnění.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Obecné schéma bioplynové stanice.

Obrázek 2: Znárodnění rozkladu organického materiálu na bioplyn.

Obrázek 3: Koloběh uhlíku v anaerobním prostředí s aktivními metanogenními archea.

Obrázek 4: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice.

Obrázek 5: Schematické znázornění diskontinuální (A) a kontinuální (B) fermentace.

Obrázek 6: Produkce metanu z velikostně upravených a velikostně neupravených částic kukuřičné siláže.

Obrázek 7: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech.

Obrázek 8: Produkce bioplynu z vybraných druhů vstupního materiálu.

Obrázek 9: Roční produkce zemědělských plodin využitelných v bioplynových stanicích v České republice.

Obrázek 10: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem.

Obrázek 11: Akumulace rozsivek (SiO_2) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 4626x.

Obrázek 12: Fytolit (SiO_2) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 16457x.

Obrázek 13: Sylvín (KCl) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 10002x.

Obrázek 14: Rentgenogram FZ-K-11.

Obrázek 15: Rentgenogram FZ-K-20.

Obrázek 16: Rentgenogram FZ-ST-29.

Obrázek 17: Aplikace fermentačního zbytku hadicovými aplikátory.

1. Úvod a současný stav řešené problematiky

Využívání bioplynu jako zdroje elektrické, ale i tepelné energie je v posledních letech na zřetelném vzestupu. Výstavba zemědělských bioplynových stanic je v moderní společnosti symbióze se zdravou ekonomikou provozovatele, a také s využitím potenciálu, který obsahují vstupní materiály. Stejně tak je tomu i v Evropě, zejména Německo, Rakousko, Francie, Itálie jsou napředních místech v počtu staveb a instalovaném výkonu bioplynových stanic (BPS). V posledních letech je možno zaznamenat také nárůst počtu bioplynových stanic na Slovensku a v Polsku, kde lze předpokládat velký potenciál pro výstavbu a provozování zemědělských BPS. Majoritní podíl evropského trhu ovládají německé a rakouské technologie, které jsou z pohledu vývoje a konstrukčního řešení na špičce. Provozování bioplynových stanic, vývoj technologie a neustálé zlepšování komponentů má zacíl to, aby se provozovatel musel starat o tuto technologii minimálně a dosahoval s ní maximálních výsledků, které mu pomůžou efektivně provozovat zemědělský podnik. V současné době je na území České republiky v provozu přibližně 481 bioplynových stanic. Několik desítek dalších stanic je ve fázi projektování či výstavby, takže se lze očekávat zprovoznění jubilejní pětistě stanic.

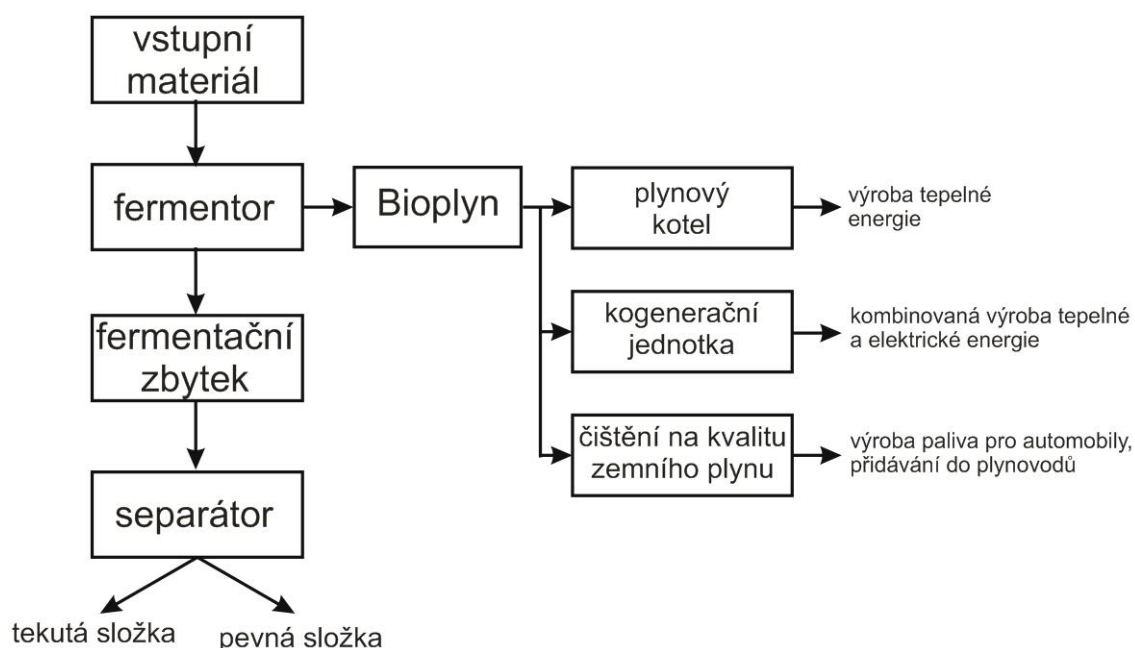
Z pohledu platné legislativy můžeme bioplynové stanice rozdělovat na tři základní druhy, a to zemědělské, čistírenské a ostatní BPS. Tyto tři uvedené druhy bioplynových stanic se liší zejména vstupními surovinami, méně již technologií, ta je zpravidla velmi podobná. Určité odlišnosti však můžeme sledovat u zpracování a nakládání s fermentačním zbytkem a ve výkupní ceně za vyrobenou elektrickou energii.

2. Bioplynové stanice

Bioplynové stanice (BPS) jsou dnes rozšířenou biotechnologií využívající procesu anaerobní fermentace pro řízenou konverzi organického uhlíku obsaženého v biologicky rozložitelných materiálech za nepřístupu vzduchu (anaerobní podmínky) na finální produkty, kterými jsou bioplyn a fermentační zbytek. Bioplynové stanice můžeme považovat za biotechnologii, ve které je proces výroby bioplynu závislý na interakci mezi

různými druhy mikroorganismů. K tomu, aby bylo dosaženo funkčního a stabilního procesu s co nejvyšší produkcí metanu, je důležité vytvořit a udržovat vhodné prostředí pro činnost mikroorganismů (Amon et al., 2006). Díky vhodně nastavené a zvolené technologii bioplynové stanice můžeme maximalizovat výrobu bioplynu jako konečného produktu procesu anaerobní fermentace. V praxi je používáno mnoho technologií pro výrobu bioplynu, v České republice jsou to desítky technologií pro anaerobní zpracování různých druhů materiálů. Tyto systémy se liší zejména v provozních parametrech, přičemž použitá technologie a konstrukce fermentoru závisí primárně na vstupní surovině, která má být zpracována.

Obecně lze říci, že se technologie bioplynových stanic skládá z několika na sebe navazujících technologických celků, které tvoří celek. Obecné schéma bioplynové stanice je znázorněno na obrázku 1.



Obrázek 1: Obecné schéma bioplynové stanice.

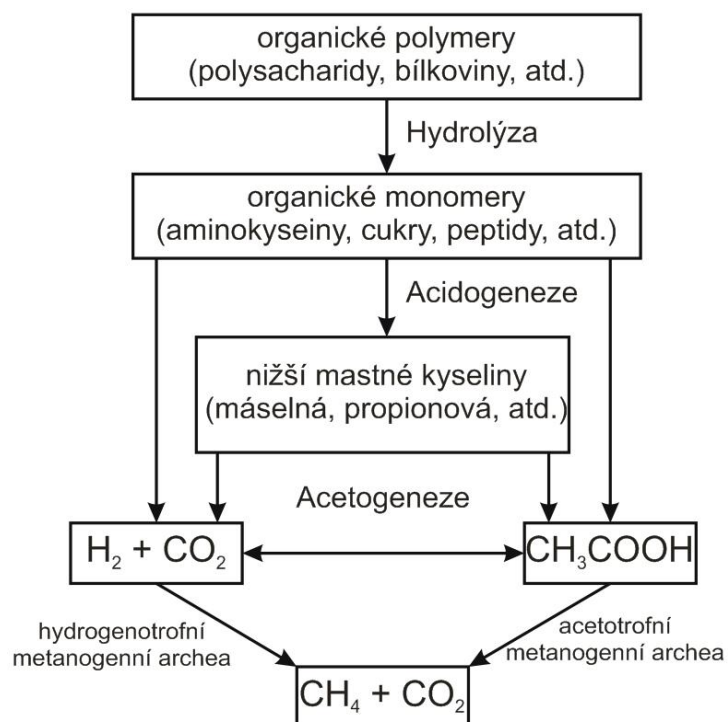
(podle Hobson et al., 1981, upraveno)

3. Proces anaerobní fermentace

Proces anaerobní fermentace je složitý biochemický proces, při kterém dochází v několika na sebe navazujících krocích: hydrolýze, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi díky činnosti mikroorganismů k rozkladu organických látek obsažených ve vstupních surovinách (Stams et al., 2003). Meziprodukty jednotlivých skupin mikroorganismů v jednotlivých krocích jsou spotřebovávány v dalších krocích vzniku bioplynu mikroorganismy jinými. Absence jedné skupiny mikroorganismů může mít negativní dopad na průběh procesu jako celku (Lee et al., 2009; Weiland, 2010).

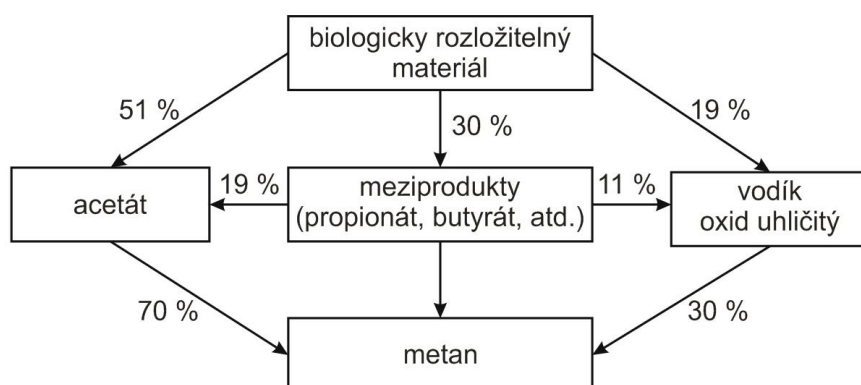
Mikrobiální diverzita v bioplynových fermentorech je stejně rozsáhlá jako mikrobiální diverzita v trávicím traktu přežvýkavců, kde bylo identifikováno sedmnáct základních kmenů anaerobních mikroorganismů. Tyto mikroorganismy mají zásadní roli při výrobě bioplynu (Stieb a Schink, 1987). Důležitou roli v tom, které z kmenů anaerobních mikroorganismů budou přítomny ve fermentoru, samozřejmě sehraje povaha vstupního materiálu, který má být zpracováván v bioplynové stanici (Hattori et al., 2001). Druh vstupního materiálu určuje, zdali budou ve fermentoru převládat **proteolytické mikroorganismy** nebo **amylolytické mikroorganismy**. Mezi nejčastěji se vyskytující se druhy anaerobních mikroorganismů ve fermentorech bioplynových stanic patří *Bacteroidessuccinogens*, *Butyrivibriofibrisolvens*, *Clostridium cellobioparum*, *Ruminococcusalbus*, *Ruminococcusflavofaciens*, *Eubacteriumcellulosolvens*, *Clostridium cellulosolvens*, *Clostridium cellulovorans*, *Clostridium thermocellum*, *Bacteroidescellulosolvens* a *Acetivibriocellulolyticus* (Stieb a Schink, 1987). Je nutné si uvědomit, že existuje jasný rozdíl v druzích celulytických mikroorganismů přítomných v trávicím traktu přežvýkavců a v bioplynové stanici. Zatímco v trávicím traktu přežvýkavců představovali zástupci rodu *Ruminococcus* 60 % z celkového počtu kolonií, ve fermentoru bioplynové stanice převládaly rody *Bacteroides* a *Clostridium* (Switzenbaum et al., 1990).

Zjednodušené schéma průběhu rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je znázorněno na obrázku 2 (Pohland a Gosh, 1971).



Obrázek 2: Znázornění rozkladu organického materiálu na bioplyn.

Koloběh uhlíku při anaerobní fermentaci je schematicky znázorněn na obrázku 3(Ahring, 2003).



Obrázek 3:

Koloběh uhlíku v anaerobním prostředí s aktivními metanogenními archea.

4. Rozdělení bioplynových stanic

4.1 Podle druhu zpracovávaného materiálu

Bioplynové stanice dělíme podle druhu zpracovávaného materiálu a v souladu s metodickým pokynem Ministerstva životního prostředí, k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu na:

- zemědělské bioplynové stanice,
- čistírenské bioplynové stanice,
- ostatní bioplynové stanice.

4.1.1 Zemědělské bioplynové stanice

Tyto BPS zpracovávají materiály rostlinného charakteru a statkových hnojiv, resp. podestýlky. Na těchto bioplynových stanicích není možné zpracovávat odpady podle zákona č. 185/2001 Sb., o odpadech, ani jiné materiály, které spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě.

Na zemědělských bioplynových stanicích je možno zpracovávat zejména následující materiály:

Suroviny živočišného původu

- kejda prasat
- hnůj prasat se stelivem
- kejda skotu
- hnůj skotu se stelivem
- hnůj a stelivo z chovu koní, koz, králíků
- drůbeží exkrementy, včetně steliva

Suroviny rostlinného původu

- sláma všech typů obilovin i olejnin

- plevy a odpad z čištění obilovin
- bramborová nať i slupky z brambor
- řepná nať z krmné i cukrové řepy
- kukuřičná sláma i jádro kukuřice
- travní biomasa nebo seno (senáže)
- nezkrmitelné rostlinné materiály (siláže, obiloviny, kukuřice)

Cíleně pěstovaná biomasa

- obiloviny v mléčné zralosti (celé rostliny) čerstvé i silážované
- kukuřice ve voskové zralosti (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- kukuřice vyzrálá (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- krmná kapusta (celé rostliny) čerstvá i silážovaná
- dřevní biomasa (štěpky anebo řezanka z listnatých dřevin z rychloobrátkových kultur anebo z průklestů)

4.1.2 Čistírenské bioplynové stanice

Tyto BPS pracovávají pouze kaly z čistíren odpadních vod a jsou nedílnou součástí čistíren odpadních vod (ČOV). Technologie anaerobní fermentace je využívána za účelem anaerobní stabilizace kalu vznikajícího na čistírnách odpadních vod. Tyto technologie nejsou určeny ke zpracování biologicky rozložitelných odpadů a k nakládání s odpady, ale slouží pouze jako součást kalového hospodářství ČOV jako celku. Do tohoto zařízení nevstupují jiné materiály než kaly z ČOV, žump a septiků a odpadní voda. V případě, že jsou do těchto nádrží na anaerobní fermentaci přidávány jiné odpady podle zákona o odpadech, jedná se o ostatní bioplynové stanice. Na tato zařízení se pak vztahují všechny požadavky zákona o odpadech a jeho prováděcích předpisů. U bioplynových stanic pracujících pouze v režimu ČOV nejsou požadovány zásobní nádrže na anaerobně stabilizovaný kal. Tyto technologie pracují v režimu čistíren odpadních vod, které mají ve svém provozním řádu zapracovány podmínky nakládání s aktivovaným kalem a anaerobně stabilizovaným kalem.

4.1.3 Ostatní bioplynové stanice

Bioplynové stanice, zpracovávající ostatní vstupy, mohou zpracovávat bioodpady uvedené v tab. 3 v příloze 2., případně substráty uvedené v odstavci 4.1, 4.2 a 4.3 metodického pokynu Ministerstva životního prostředí k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu. Pokud BPS zpracovávají vedlejší živočišné produkty (VŽP), spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 a musí plnit podmínky v něm stanovené. Počet bioplynových stanic sestavený podle druhu zpracovávaného materiálu je uveden v tabulce 2.

4.2 Dělení podle obsahu sušiny zpracovávaného materiálu

Bioplynové stanice, kde jsou zpracovávány materiály s obsahem sušiny na vstupu nižším než 15 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající tekuté substráty. Tyto stanice využívají disperze vstupního materiálu v roztoku se snahou o co největší styčnou plochu zpracovávaného materiálu s mikroorganismy, které jsou přítomny ve fermentoru. Tato technologie představuje v současnosti 98 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

Naopak bioplynové stanice, kde je obsah sušiny vstupního materiálu vyšší než 15 %, obvykle 30–45 %, označujeme jako bioplynové stanice zpracovávající netekuté substráty. Tyto stanice využívají procesní tekutinu (perkolát) jako inokulum pro postřik materiálu, který je naskladněn do fermentoru. Tato technologie představuje pouhé 2 % ze všech instalovaných bioplynových stanic v České republice.

4.3 Dělení podle provozní teploty ve fermentoru

Podle provozní teploty ve fermentoru můžeme bioplynové stanice dělit v zásadě do dvou skupin. Bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí 30–45 °C, to znamená v mezofilním teplotním režimu z hlediska mikrobiologického a na bioplynové stanice pracující s provozní teplotou v rozmezí 50–60 °C, to znamená v termofilním teplotním režimu z hlediska mikrobiologického (Sánchez et al., 2001).

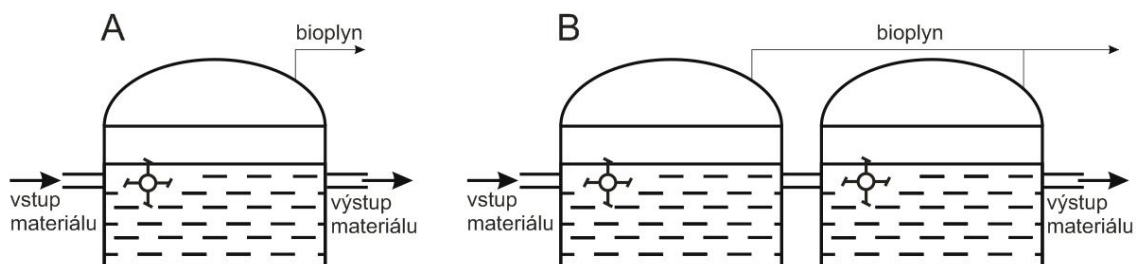
Dnes používané technologie bioplynových stanic využívají v drtivé většině mezofilní teplotní režim 30–45 °C. A to i přes skutečnost, že termofilní teplotní oblast nabízí vyšší reakční rychlosti, vyšší produkce bioplynu a vyšší účinnost při eliminaci patogenních

mikroorganismů obsažených ve zpracovávaném materiálu ve srovnání s mezofilním teplotním režimem. Termofilní proces je však silně citlivý na změny podmínek, resp. na změny životního prostředí ve fermentoru než proces mezofilní (Ahn a Forster, 2002; Hamed et al., 2003; Kim et al., 2002).

4.4 Dělení podle počtu fermentorů zařazených v sérii

Technicky nejjednodušší bioplynové stanice používají pro výrobu bioplynu pouze jeden fermentor pro celý proces anaerobní fermentace, jedná se o **jednostupňovou fermentaci**. U tohoto způsobu konstrukce bioplynové stanice probíhají všechny mikrobiální procesy, hydrolyza, acidogeneze, acetogeneze a metanogeneze, ve stejném čase a na stejném místě. Jedná se o běžný typ fermentoru, ve kterém je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento způsob fermentace je často využíván pro zpracování kalů, potravinářských odpadů, zemědělských odpadů apod.

Alternativou k jednostupňovému procesu je **proces dvoustupňový**. Při dvoustupňové fermentaci probíhá odděleně v jedné nádrži hydrolyza a acidogeneze a ve druhé nádrži acetogeneze a metanogeneze (Pohland a Gosh, 1971). I u dvoustupňové fermentace jsou použity běžné typy fermentorů, ve kterých je zpracovávaný materiál míchán různými druhy míchadel. Tento typ procesu může být výhodný, pokud vstupní substrát obsahuje snadno rozložitelné látky (energetické plodiny, rostlinné zbytky). Schematicky jsou zobrazeny možnosti provedení na obrázku 4.



Obrázek 4: Jednostupňová (A) a dvoustupňová (B) bioplynová stanice.

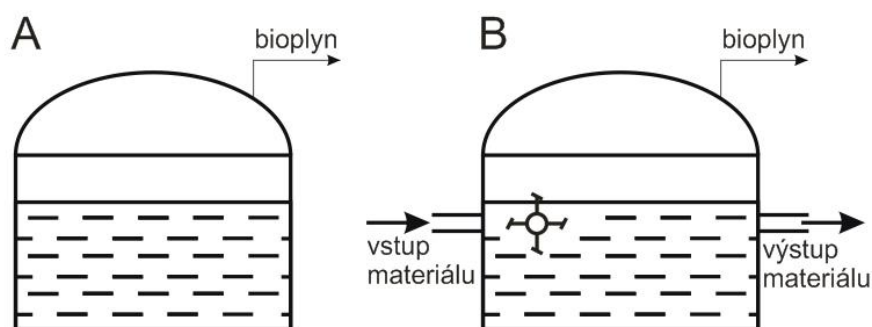
(zdroj: autoři)

4.5 Dělení podle způsobu dávkování vstupního materiálu do fermentoru

Bioplynová stanice, respektive fermentor bioplynové stanice, může být provozován s ohledem na dávkování vstupního materiálu, buď jako kontinuální nebo jako diskontinuální. Způsob provozování závisí na použitém vstupním materiálu (Lettinga, 2005; Sakar et al., 2009). U kontinuálně provozovaných systémů je čerstvý materiál nepřetržitě dávkován do fermentoru, čímž je dosaženo kontinuálního dávkování vstupního materiálu a kontinuální produkce bioplynu v optimálním množství a kvalitě po celou dobu procesu. Tento způsob je využíván u bioplynových stanic pracujících s nižším obsahem sušiny ve fermentoru, do 15 %. Tehdy je možno materiál dávkovat v pravidelných intervalech, v nižších dávkách, v průběhu celého dne.

Naopak u diskontinuálně provozovaných bioplynových stanic je veškerý materiál do fermentoru dávkován najednou, přičemž materiál zůstává ve fermentoru po celou dobu trvání procesu fermentace a je sprchován procesní tekutinou, perkolátem, který zastává funkci inokula. Žádný čerstvý ani již zfermentovaný materiál není možno v průběhu procesu dávkovat, respektive odstranit. Produkce bioplynu je obecně nejvyšší na začátku procesu a pozvolně klesá. Po skončení je fermentor vyprázdněn a znovu naskladněn čerstvým materiálem. Tento způsob je využíván u bioplynových stanic pracujících s vyšší sušinou ve fermentoru, nad 30 %.

Schematicky jsou oba systémy znázorněny na obrázku 5. V České republice je většina bioplynových stanic provozována v kontinuálním režimu dávkování čerstvého materiálu do fermentoru. Výjimku tvoří některé bioplynové stanice zpracovávající zemědělské odpady s vysokou sušinou a biologicky rozložitelný komunální odpad.



Obrázek 5: Schematické znázornění diskontinuální (A) a kontinuální (B) fermentace.

5. Parametry ovlivňující anaerobní fermentaci a výslednou kvalitu fermentačního zbytku

Proces anaerobní fermentace ovlivňuje celá řada faktorů, mezi které patří potenciál produkce bioplynu vstupního materiálu, velikost částic vstupního materiálu, konstrukce fermentoru, použité inokulum, původ vstupních materiálů, pH, teplota, látkové zatížení fermentoru, hydraulická doba zdržení materiálu ve fermentoru, poměr C:N, sušina vstupního materiálu, koncentrace nižších mastných kyselin, způsob míchání ve fermentoru, obsah inhibitorů anaerobního procesu ve vstupním materiálu a obsah stopových prvků (Gollakota a Meher, 1988). Základní požadavky na prostředí ve fermentoru v průběhu anaerobní fermentace jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Požadavky na prostředí v průběhu anaerobní fermentace.

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

(podle Gollakota a Meher, 1988)

5.1 Koncentrace mikroorganismů

Různé druhy mikroorganismů mají různě dlouhou generační dobu (tabulka 2). Nejdelší generační dobu mají metanogenní archea. Ve srovnání s nimi je generační doba hydrolytických a acidogenních mikroorganismů signifikantně kratší, riziko odvodu těchto mikroorganismů s již zfermentovaným materiálem je proto minimální. Proto, aby nedocházelo k odvodu zejména metanogenních archea z fermentoru, bývá hydraulická doba zdržení materiálu ve fermentoru navrhovaná v rozmezí 10–15 dnů.

Tabulka 2: Generační doby anaerobních mikroorganismů.

Anaerobní mikroorganismus	Generační doba
Acidogenní bakterie	
<i>Bacteroides</i>	< 24 hodin
<i>Clostridia</i>	24 –36 hodin
Acetogenní bakterie	80–90 hodin
Metanogenní archea	
<i>Methanosarcinabarkeri</i>	5–16 dnů
<i>Methanococcus</i>	10 dnů

(poodle Schink, 1997)

5.2 Vstupní materiál

Biologická rozložitelnost a tím i produkce bioplynu závisí na složení vstupního materiálu, na obsahu tuků, proteinů, polysacharidů, monosacharidů a na poměru jednotlivých komponent. Vzhledem k tomu, že poměr těchto komponent je v různých druzích vstupních materiálů různý, je odlišná i jejich rozložitelnost a produkce bioplynu. V tabulce 3 je uvedena kvalita a teoretická produkce bioplynu vztažená na 1 kg organické sušiny vybraných komponentů vstupních materiálů.

Tabulka 3: Teoretická produkce bioplynu.

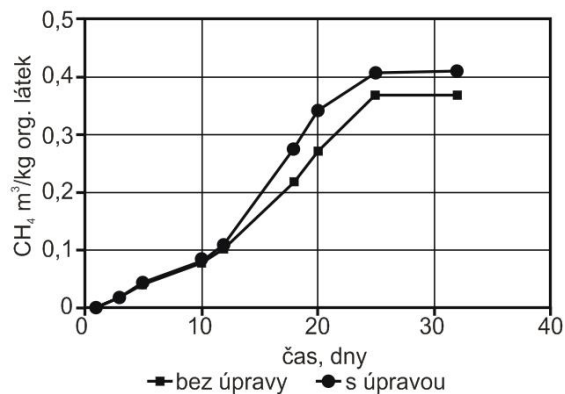
Látka	produkce bioplynu [m ³] vztažená na kg organické sušiny	složení bioplynu [%obj.] CH ₄ :CO ₂
Tuky	1,10–1,60	80:20
Polysacharidy a monosacharidy	0,75–0,90	54:46
Proteiny	0,60–0,80	60:40

(upraveno podle Hobson et al., 1981)

5.3 Velikost částic

Výroba bioplynu je také ovlivněna velikostí částic vstupního materiálu. Částice vstupního materiálu větší než 20 mm jsou pro mikroorganismy hůře zpracovatelné a povrch, který je ve styku s mikroorganismy, je mnohem nižší než u částic menších než 8 mm. Předúprava vstupního materiálu, resp. velikosti částic vstupního materiálu, tak významně ovlivňuje produkci bioplynu, resp. metanu (Yadvika et al., 2004; Bruni et al., 2010). Rozdíl

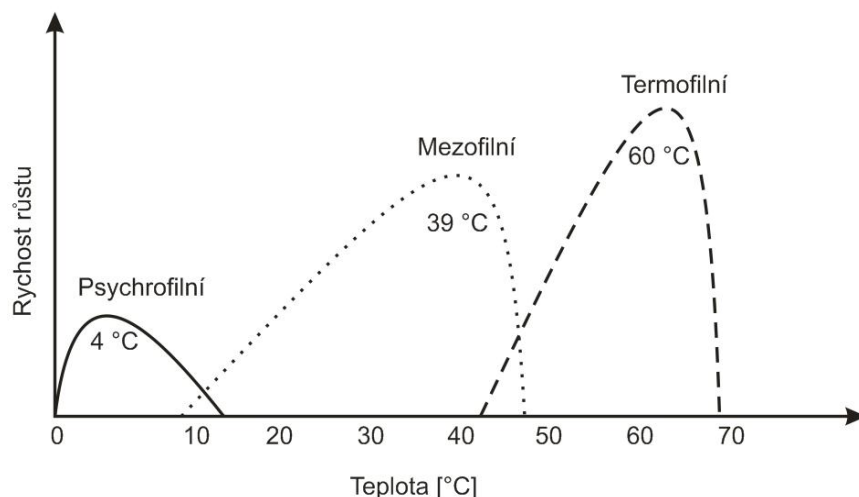
v produkci metanu z velikostně upravených a neupravených částic vstupního materiálu, kukuřičné siláže, je možno vidět na obrázku 6 (Bruni et al., 2010).



Obrázek 6: Produkce metanu z velikostně upravených a velikostně neupravených částic kukuřičné siláže.

5.4 Teplota

Optimální teplota, tj. teplota, při které mikroorganismus roste nejrychleji a energeticky nejefektivněji, je různá pro různé druhy mikroorganismů, obrázek 7.



Obrázek 7: Rychlost růstu mikroorganismů v různých teplotních režimech.

(upraveno podle Madigan et al., 2009)

Mikroorganismy můžeme dělit do různých skupin, v závislosti na teplotě, která je pro jejich život nejpříznivější. Jedná se v zásadě o tři teplotní režimy.

- psychrofilní, v rozpětí teplot od 5 °C do 25 °C,
- mezofilní, v rozpětí teplot od 30 °C do 45 °C,
- termofilní, v rozpětí teplot od 50 °C do 60 °C.

Dnes provozované bioplynové stanice pracují obvykle při teplotách v rozmezí 30–45 °C nebo 50–60 °C (Cavinato et al., 2013). Výroba bioplynu je možná i v psychrofilním teplotním režimu, produkce a kinetika tvorby bioplynu bude však mnohem nižší a ekonomicky nezajímavá (Collins et al., 2006). V případě vysokých teplot jsou známy příklady metanogenních archea, které jsou schopny pracovat i při teplotách 110 °C (Chaban et al., 2006). Stabilní bioplynové technologie provozované v praxi však nepřesahují teplotní hranici 60–70 °C (Scherer et al., 2000). Při teplotách nad 60 °C je činnost metanogenních archea snížena natolik, že nejsou schopny zpracovávat produkty

předchozích stupňů, což má za následek hromadění mastných kyselin ve fermentoru a kolaps procesu (Nozhevnikova et al., 1999; Scherer et al., 2000).

Vůbec nejběžněji používaným teplotním režimem v bioplynových stanicích u nás i v zahraničí je mezofilní teplotní režim. Pro bezproblémový provoz bioplynové stanice je nutné udržovat stálou teplotu ve fermentoru. Jakýkoli výrazný výkyv v teplotě ve fermentoru může způsobit kolaps systému. Bioplynové stanice provozované v termofilním režimu jsou na změny teplot náchylnější než bioplynové stanice provozované v mezofilním teplotním režimu (Nozhevnikova et al., 1999).

5.5 Hodnota pH

Po produkci bioplynu je hodnota pH zpracovávaného materiálu nejlepším indikátorem stability procesu. Různé fáze procesu výroby bioplynu požadují různé optimální hodnoty pH. Velmi významně jsou na pH citlivé metanogenní archea. Prostředí s nižší hodnotou pH působí na metanogenní archea inhibičně, čímž dojde k negativnímu ovlivnění produkce bioplynu.

Vznik organických kyselin během acidogeneze může způsobit snížení pH pod hodnotu 5, což je limitní koncentrace pro přežití metanogenních archea a způsobit tak pokles počtu metanogenních archea. Na druhé straně nadměrný nárůst počtu metanogenních archea může vést k vyšší koncentraci amoniaku a tím zvýšení pH nad 8, což je naopak inhibiční pro acidogenezi (Lusk, 1999).

Bylo prokázáno, že optimální rozpětí pH při procesu anaerobní fermentace se pohybuje v rozmezí od 6,5 do 7,5. Tento rozsah je poměrně široký, optimální hodnota pH vždy závisí na zpracovávaném materiálu a použité technologii (Liu et al., 2007; Price a Cheremisinoff, 1981). Hodnota pH je funkcí koncentrace těkavých mastných kyselin, hydrogenuhličitanů a alkality systému. Aby bylo možné udržet konstantní hodnoty pH, je důležité upravit vztah mezi koncentrací těkavých mastných kyselin a hydrogenuhličitanů (Liu et al., 2007).

5.6 Zatížení fermentoru organickými látkami

Zatížení fermentoru organickými látkami popisuje množství organického materiálu (vyjádřeno jako chemická spotřeba kyslíku nebo ztráta žíháním), které je denně přivedeno na jednotku užitečného objemu fermentoru.

Obvyklé zatížení fermentoru, který je provozován v mezofilním teplotním režimu, se pohybuje od 0,5 kg do 3 kg organické sušiny vstupního materiálu na m³ objemu fermentoru a den (Gerardi, 2003; Rico et al., 2011). Maximální hranice zatížení fermentoru organickými látkami je uváděna 5 kg organické sušiny vstupního materiálu na m³ objemu fermentoru a den (Menardo et al., 2011). Vysoké zatížení fermentoru organickými látkami způsobuje zvyšování koncentrace mastných kyselin, což v dlouhodobém provozu působí inhibičně na metanogenní archea. Aby nedošlo k nadměrnému zatěžování fermentoru, je třeba zajistit rovnoměrný přísun vstupního materiálu během dne (Gerardi, 2003).

5.7 Doba zdržení

Doba zdržení nám udává čas, po který je elementární částice zpracovávaného materiálu v kontaktu se substrátem ve fermentoru. Dobu zdržení lze vypočítat podle následující rovnice:

$$\tau = \frac{V}{Q} [s] \quad (1)$$

kde:

τ - doba zdržení [s]

V - objem reaktoru [m³]

Q - průtok fermentorem [m³·s⁻¹]

Rovnice je odvozená z průměrné doby potřebné k rozkladu organického materiálu, vyjádřená jako chemická spotřeba kyslíku (CHSK) a biochemická spotřeba kyslíku (BSK) na vstupu a výstupu materiálu do fermentoru. Obecně lze konstatovat, že delší doba zdržení materiálu ve fermentoru znamená jeho účinnější rozklad. Na druhé straně je třeba konstatovat, že množství vznikajícího bioplynu klesá s delší dobou zdržení. Optimální

doba zdržení vychází z ekonomicko provozních propočtů. Doba zdržení je závislá na druhu zpracovávaného materiálu a zamýšleném použití zpracovaného materiálu po fermentaci (Price a Cheremisinoff, 1981). Dále doba zdržení materiálu v anaerobním fermentoru závisí na provozní teplotě ve fermentoru a sušině zpracovávaného materiálu. Obecně platí, že fermentory provozované v mezofilním režimu mají delší dobu zdržení, stejně tak jako fermentory zpracovávající materiály s vysokým obsahem sušiny. Ke zkrácení doby zdržení materiálu ve fermentoru je využíváno míchání zpracovávaných materiálů. Doba zdržení také ovlivňuje skladbu mikrobiálních společenstev ve fermentoru (Weiland, 2010).

5.8 Míchání obsahu fermentoru

Míchání materiálu ve fermentoru významně ovlivňuje proces anaerobní fermentace a to zejména díky rovnoměrné distribuci živin a mikroorganismů ve zpracovávaném materiálu a teplotní homogenitě v celém objemu fermentoru (Gerardi, 2003). Mezi jednoznačné výhody míchání patří eliminace tvorby sedimentu ve fermentoru, eliminace teplotní stratifikace ve fermentoru, udržování chemického fyzikální jednotnosti ve fermentoru, rychlé rozptýlení metabolických meziproduktů vznikajících během rozkladu vstupních materiálů, rychlé rozptýlení všech toxických látek ve fermentoru (minimalizace toxicity).

Metanogenní archea rostou v symbióze s acetogenními a hydrogenními mikroorganismy (Madigan et al., 2008), což vyžaduje přímý kontakt mezi oběma druhy, který zabezpečuje míchání. Hydrolytické a acidogenní mikroorganismy rozkládají organický materiál efektivněji díky většímu povrchu, který mají k dispozici v suspenzi, která se vytvoří v průběhu míchání materiálu ve fermentoru (Gerardi, 2003).

5.9 Poměr C:N

Uhlík a dusík jsou základními živinami anaerobních mikroorganismů. Pro efektivní provoz bioplynové stanice by se měl poměr C:N pohybovat v optimálním rozsahu 25–30 : 1, neboť významně ovlivňuje růst a činnost mikroorganismů (Nijaguna, 2002). Každý

jednotlivý vstupní materiál tedy může být omezující vzhledem k jeho obsahu živin. Z tohoto pohledu se jeví jako optimální kofermentace různých vstupních materiálů, kdy je možno smíchat vstupní materiály s různými obsahy C a N za účelem dosažení požadovaného poměru C:N (Nijaguna, 2002; Yadvika et al., 2004).

5.10 Obsah stopových prvků

Zemědělské bioplynové stanice pracující s energetickými plodinami mohou za jistých podmínek čelit poklesu produkce bioplynu bez jakéhokoli zjevného důvodu. Základním vodítkem by měla být koncentrace nižších mastných kyselin. Pokud se pohybuje na úrovni $3 - 5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, může to indikovat nedostatek nebo nedostupnost stopových prvků. Optimální provoz bioplynové stanice, respektive anaerobního procesu ve fermentoru bioplynové stanice, je závislý na dostupnosti a optimálním přísunu organické hmoty (Bryant, 1979). Dalším důležitým faktorem je obsah stopových prvků, který může velmi významně ovlivňovat proces anaerobní fermentace (Callander a Barford, 1983).

Potřeba železa (Fe), niklu (Ni), kobaltu (Co), molybdenu (Mo), selenu (Se) a wolframu (W) pro různé metanogenní archea (*Methanosarcinabarkeri*, *Methanospirillumhungatii*, *Methanocorpusculumparvum*, *Methanobacteriumthermoautotrophicum*, *Methanobacteriumwolfei*, *Methanococcusvoltae*, *Methanococcusvanniellia*, *Methanococcusdesmethylylatus*) byla již potvrzena mnoha autory (Patel et al., 1978; Scherer et al., 1983; Scherer a Sahn, 1983). Dále byly mnoha autory potvrzeny účinky stopových prvků Fe, Ni, Co, Zn, Mo a Cu na průběh anaerobní fermentace různých typů odpadů z průmyslových výroby (Kida et al., 1991; Kida a Sonoda, 1993; Espinosa et al., 1995; Ivanov et al., 2002).

V případě anaerobní fermentace energetických plodin existuje jen málo studií posuzujících vliv stopových prvků na proces anaerobní fermentace. Byl studován vliv přídatku Ni a Co na produkci metanu v bioplynové stanici pracující v mezofilním teplotním režimu a zpracovávající kukuřičnou siláž jako vstupní materiál (Pobeheim et al., 2011). Autoři dospěli k závěru, že omezená dostupnost jak niklu, tak kobaltu ovlivňuje nepříznivě stabilitu procesu i produkci bioplynu. Pobeheim et al. (2010) potvrdili stimulační účinek niklu při anaerobní fermentaci kukuřičné siláže, tento se projevil zvýšenou produkcí

bioplynu. Naopak přidání molybdenu společně s niklema kobaltem do anaerobních fermentorů zpracovávajících kukuřičnou siláž v mezofilním teplotním režimu neměla významný vliv na produkci metanu (Pobeheim et al., 2010). Zatímco přidání kobaltu je stimulační, vynechání niklu z roztoku stopových prvků vedlo ke snížení stability procesu a nižší tvorbě metanu. Minimální požadavky na železo, kobalt a nikl pro fermentaci acetátů na metan jsou udávány v následujících množstvích, pro železo $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a den, pro kobalt $100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a den, pro nikl $200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ a den, v závislosti na aktivním objemu fermentoru (Takashima a Speece, 1989).

Při aplikaci stopových prvků do fermentoru je velmi důležité určit odpovídající množství stopových prvků, které bude dávkováno do fermentoru s ohledem na množství stopových prvků, které může být obsaženo ve vstupním materiálu. Při tom je však také nutné brát ohled na následné zpracování fermentačního zbytku s ohledem na potenciální toxické koncentrace jednotlivých prvků při aplikaci na zemědělskou půdu či jeho jiné využití (Ivanov et al., 2002; Takashima a Speece, 1989).

6. Inhibitory anaerobní fermentace

Některé sloučeniny, které jsou produkty látkové výměny v průběhu anaerobní fermentace, mohou být v závislosti na koncentraci toxické nebo inhibovat mikrobiální společenstvo obsažené ve fermentoru. Inhibice procesu závisí na koncentraci inhibitorů, složení vstupního materiálu a adaptaci mikroorganismů na inhibitor. Jako zásadní inhibitory procesu anaerobní fermentace bývají uváděny čpavek, mastné kyseliny, sulfidy, ionty alkalických kovů (Na, K, Mg, Ca a Al), těžké kovy, organické látky, desinfekční přípravky, antibiotika, insekticidy a herbicidy (Yang a Speece, 1986; Lin, 1993; Chen et al., 2008)

I přes často protichůdné závěry vědeckých prací na téma inhibitorů anaerobní fermentace je možné konstatovat, že anaerobní proces je adaptabilní a velmi rezistentní vůči inhibičním látkám, a to i ke koncentracím, které jsou toxické v jiných procesech (Tritt, 1992; Feijoo et al., 1995; Chen a Horan, 1998).

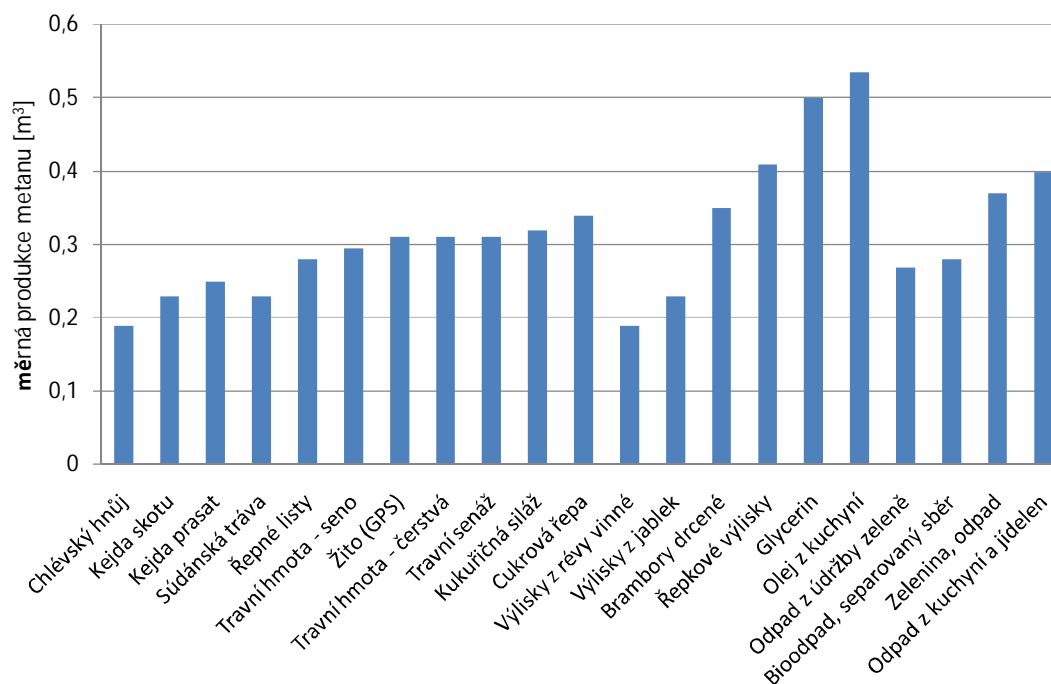
7. Vstupní materiály pro bioplynové stanice

V současnosti je v Evropě, tedy i v České republice, signifikantní nárůst produkce cíleně pěstované biomasy pro produkci bioplynu v bioplynových stanicích (Weiland, 2006). Bioplyn s vysokým procentem metanu je produkován z různých druhů substrátů, jako je chlévská mrva, biologicky rozložitelné odpady, ale zejména z cíleně pěstovaných energetických plodin. Výroba bioplynu z energetických plodin je jednou z nejvýznamnějších oblastí současného zemědělství. Kukuřice, čirok, žito, slunečnice travní hmota patří dnes mezi nejběžněji používané energetické plodiny (Yadvika et al., 2004; Cioabla et al., 2013). Využívání energetických plodin v bioplynových stanicích je možné zejména díky poznatkům, kterých bylo dosaženo historicky při produkci těchto plodin pro potravinářské a krmivářské účely. Bylo zjištěno, že energie vyrobená v bioplynových stanicích pochází ze vstupního materiálu, jehož obvyklé složení bývá 86 % cíleně pěstované plodiny pro energetické účely, 9 % chlévská mrva, 3 % biologicky rozložitelné odpady a 2 % ostatní biologicky rozložitelné materiály. Podíl kukuřičné siláže na celkovém zastoupení energetických plodin představoval 76 % hmotnostních, zbytek představovala travní senáž a siláž žita a čiroku (Yadvika et al., 2004; Weiland, 2006).

Počet bioplynových stanic zpracovávajících cíleně pěstované energetické plodiny roste, tím pádem roste i poptávka po kvalitním vstupním materiálu, případně alternativách k dnes běžně používaným vstupním materiálům. Pro zpracování technologií anaerobní fermentace mají největší hodnotu plodiny, které mají vysokou produkci zelené hmoty, nízké nároky na pěstování a dosahují vysoké produkce bioplynu s obsahem metanu 50–65 % (Amonet et al., 2002). Z tohoto hlediska jsou nejvhodnější druhy rostlin s vysokým obsahem snadno odbouratelných uhlohydrátů, jako jsou například glukóza, škrob, celulóza, proteiny a s nízkým obsahem hemicelulózy a ligninu, které vykazují nízkou biologickou rozložitelnost (Weiland, 2006; Amon et al., 2004). Kromě optimálního poměru výše uvedených látek v sušině plodiny musí být možné tyto plodiny snadno pěstovat, přičemž musí být zaručena také jejich rezistence vůči plevelům, škůdcům, chorobám a klimatickým podmínkám a musí být schopny růstu s nízkými vstupy živin (Scholz a Ellerbrock, 2002).

I přes skutečnost, že bylo publikováno mnoho prací zabývajících se problematikou produkce bioplynu z různých druhů vstupních materiálů v různých podmínkách, obrázek 8 (Badger et al., 1979; Hobson et al., 1981; Yadvika et al., 2004; Amon et al., 2004; Preissler

et al., 2007; Weiland, 2010), je zřejmé, že se v krátké době nepodaří zcela nahradit tradičně pěstované energetické plodiny plodinami novými s podobnými nebo lepšími vlastnostmi.



Obrázek 8: Produkce bioplynu z vybraných druhů vstupního materiálu.

(upraveno podle Preissler et al., 2007)

Za perspektivní plodiny mimo kukuřici, která dnes představuje 76 % vstupního materiálu bioplynových stanic (Yadvika et al., 2004; Weiland, 2006), jsou považovány čirok, žito a cukrová řepa (Preissler et al., 2007). V poslední době se mimo hledání alternativních plodin ubírá pozornost ke správnému načasování sklizně, která má zcela zásadní dopad na konečný obsah živin a strukturu plodin, tím pádem i na kvalitu siláže a měrnou produkci bioplynu (Amonet et al., 2002; Amon et al., 2007; Weiland, 2010; Witt et al., 2011; Hermuth et al., 2012). Průměrné kvalitativní parametry siláží kukuřic a čiroku jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Průměrné kvalitativní parametry siláží kukuřice a čiroku.

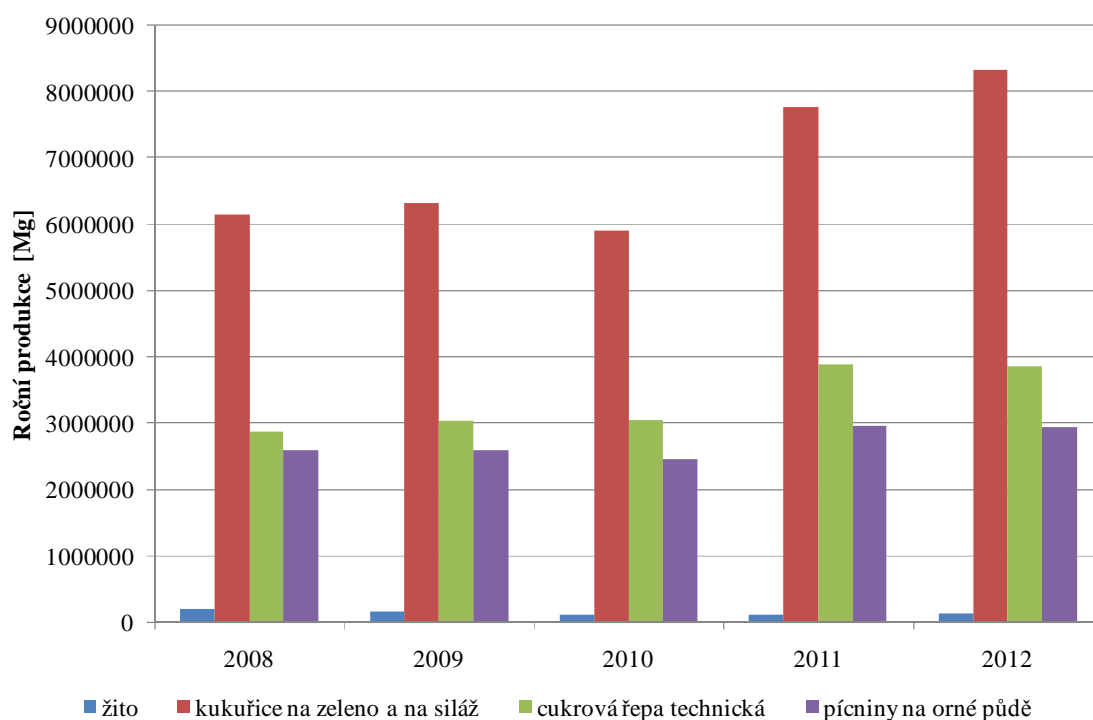
Parametr	Čirok	Kukuřice
Popel v sušině, [%]	6–12	4–8
Proteiny v sušině, [%]	5–9	6–9
Cukry celkem, [%]	8–18	8–18
Tuk v sušině, [%]	1–3	2–4
Hemicelulóza v sušině, [%]	12–18	20–35
Celulóza v sušině, [%]	21–28	19–36
Lignin v sušině, [%]	3–6	4–9
Ztráty sušiny při silážování, [%]	2–8	2–6
Produkce bioplyn, [m ³ ·kg ⁻¹ _{org.suš.}]	420–620	400–710
Koncentrace metanu, [% _{obj.}]	52–55	52–55

(podle Hermuth et al., 2012)

Je nutno podotknout, že vlastnosti energetických plodin při sklizni zásadně ovlivňují výslednou kvalitu siláže a tím i měrnou produkci bioplynu (Weiland, 2010; Hermuth et al., 2012; Witt et al., 2011). Snaha o maximalizaci produkce bioplynu logicky vede k různým strategiím při sklizni a pěstování energetických plodin využívaných v technologiích anaerobní fermentace, v porovnání s produkcí těchto plodin pro krmné účely. Je také zcela zřejmé, že pokud jsou dnes tradičně využívané energetické plodiny zpracovávány v bioplynových stanicích, jsou požadavky na kvalitu těchto plodin samozřejmě rozdílné, než když jsou zkrmovány hospodářskými zvířaty. To je způsobeno zejména tím, že doba zdržení materiálu ve fermentoru bioplynové stanice je mnohem delší, takže organické látky mohou být rozkládány déle než v trávicím traktu přežvýkavců. Mimo to je také prokázáno, že mikrobiální populace a aktivita ve fermentoru je odlišná od mikrobiální populace v batoru přežvýkavců (Gerardi, 2003; Wang et al., 2010). V bioplynové stanici je možno dosáhnout rozkladu celulózy přibližně z 80 % (Ress et al., 1998), zatímco v trávicím traktu přežvýkavců probíhá rozklad celulózy s účinností mezi 40 % až 59 % (Gray, 1947).

Energetické plodiny cíleně pěstované pro využití v bioplynových stanicích mají specifické nároky na sklizeň a technologii zpracování. Samozřejmostí je použití speciálně šlechtěných genotypů, které produkují biomasu v optimálním složení a množství tak, aby byla

využitelná v bioplynové stanici. Vezmeme-li v potaz informace autorů (Amon et al., 2004; Yadvika et al., 2004; Weiland, 2006) o procentuálním zastoupení energetické kukuřice ve vstupním materiálu bioplynových stanic a informaci Agrární komory o trendu vývoje v oblasti pěstování kukuřice v České republice, je zcela zřejmé, že nejvýznamnější plodinou pěstovanou pro energetické účely je kukuřice, obrázek 9.



Obrázek 9: Roční produkce zemědělských plodin využitelných v bioplynových stanicích v České republice.

(upraveno podle ČSÚ, 2013)

S ohledem na zvýšení biodiverzity pěstovaných zemědělských plodin a zamezení negativních vlivů této plodiny na životní prostředí, zejména při opakovaném pěstování na stejném místě, jsou zemědělským výzkumem a následně i praxí vyhledávány vhodné alternativy. Velmi vhodnou alternativou pro výrobu bioplynu se jeví čirok. Podobně jako kukuřice, čirok poskytuje vysokouměrnou produkci nadzemní biomasy vhodné pro silážování a následnou produkci bioplynu. Na rozdíl od kukuřice je čirok odolnější suchu, a proto je vhodnější pro pěstování na lehčích půdách a do suchých oblastí.

8. Bioplyn

Primárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je bioplyn. Bioplyn můžeme považovat za celosvětově uznávaný obnovitelný zdroj energie získaný z biologicky rozložitelných materiálů. Bioplyn je považován za jednu z nejlepších alternativ k fosilním palivům. Bioplyn je bezbarvý, hořlavý plyn, který vzniká biochemickými procesy při anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných materiálů (živočišného, rostlinného nebo průmyslového původu). Jeho majoritní složky tvoří metan 50–70 % objemových a oxid uhličitý 30–50 % objemových. Kromě majoritních složek obsahuje bioplyn také sirovodík, vodík, vodní páru, siloxany, aromatické a halogenové sloučeniny (tabulka 5). Obsah minoritních složek v bioplynu, z nichž některé můžeme považovat za rizikové, je významně ovlivněn druhem zpracovávaného vstupního materiálu. V plynu vznikajícím na skládkách odpadů byly například diagnostikovány aromatické heterocyklické sloučeniny, ketony alifatických sloučenin, terpeny, alkoholy, halogenované alifatické sloučeniny (Allen et al., 1997; Eklund et al., 1998; Shin et al., 2002). Odpad z domácností a průmyslu, který může obsahovat čisticí prostředky, pesticidy, farmaceutika, plasty, syntetické textilie, nátěrové hmoty apod., velmi negativně ovlivňuje koncentraci rizikových sloučenin v bioplynu. Naopak bioplyn vyráběný ze zemědělsky cíleně produkovaných plodin obsahuje nejmenší množství potenciálně rizikových sloučenin (Reinhart, 1993).

Tabulka 5: Složení bioplynu.

Sloučenina	Chemický vzorec	Koncentrace
Metan	CH ₄	55–70 [% obj.]
Oxid uhličitý	CO ₂	30–45 [% obj.]
Dusík	N ₂	0–5 [% obj.]
Kyslík	O ₂	<1 [% obj.]
Uhlovodíky	C _n H _{2n+2}	<1 [% obj.]
Sirovodík	H ₂ S	0–0,5 [% obj.]
Amoniak	NH ₃	0–0,05 [% obj.]
Vodní pára	H ₂ O	1–5 [% obj.]
Siloxany	C _n H _{2n+1} SiO	0–50 mg·m ⁻³

(upraveno podle Reinhart, 1993)

9. Fermentační zbytek

Sekundárním výstupním produktem anaerobního rozkladu biologicky rozložitelných materiálů je fermentační zbytek. Fermentační zbytek, pokud splňuje podmínky pro aplikaci na zemědělskou půdu, bývá velmi často aplikován na pozemky jako hnojivo. Pokud fermentační zbytek nesplňuje požadavky legislativy, může být používán dále jako vstupní materiál v kompostárnách, rekultivační materiál mimo zemědělskou a lesní půdu nebo po vysušení jako palivo.

Kvalita a nutriční obsah fermentačního zbytku jsou ovlivněny několika faktory, kromě druhu zpracovávaných vstupních materiálů se jedná o způsob předúpravy vstupních materiálů, procesní podmínky (provozní teplota ve fermentoru, doba zdržení, obsah sušiny, apod.), způsob a doba skladování. Kapalný fermentační zbytek obsahuje obvykle 5–12 % celkové sušiny, netekutý fermentační zbytek potom 33–40 % celkové sušiny (Marcato et al., 2008). Fermentační zbytek obsahuje vysoké koncentrace celkového dusíku, z čehož 60–80 % představuje dusík amoniakální, dále pak fosfor a draslík, což má bezesporu kladný vliv při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu (Tambone et al., 2009). Obsah organické hmoty a organického uhlíku ve fermentačním zbytku je snížen o podíl snadno odbouratelných sloučenin uhlíku, které jsou transformovány biochemickými procesy na bioplyn v průběhu anaerobní fermentace (Stinner et al., 2008). Hodnota pH fermentačního zbytku je obvykle uváděna v rozpětí 7,5–8,3 (Gómez et al., 2007). Obvyklá hodnota rozkladu organické hmoty v průběhu anaerobní fermentace se pohybuje mezi 12–53 % (Marcato et al., 2008; Menardo et al., 2001). Obsah snadno rozložitelných organických látek závisí zejména na způsobu provozu bioplynové stanice. Čím delší je doba zdržení substrátu v bioplynové stanici, tím méně snadno rozložitelných organických látek bude obsaženo ve fermentačním zbytku (Kirchmann a Bernal, 1997). Přítomnost stopových prvků a těžkých kovů může na druhé straně zamezit používání fermentačního zbytku jako hnojiva na zemědělské půdy. Jedná se zejména o případy, kdy jsou zpracovávány v bioplynových stanicích materiály s vysokými koncentracemi těchto prvků, případně o bioplynové stanice, které používají speciální směsi stopových prvků. Potom může být obsah stopových prvků a těžkých kovů vyšší ve srovnání s minerálními hnojivy (Pfundtner, 2002).

9.1 Dělení fermentačních zbytků

9.1.1 Podle použitých vstupních surovin

Existuje celá řada materiálů, které mohou být použity jako vstupní surovina pro bioplynové stanice, např. hnůj, kejda, rostlinné suroviny, biomasa, kaly, biologicky rozložitelné odpady a vedlejší živočišné produkty. Podle druhu vstupních surovin je tedy nutné následně fermentační zbytek důsledně rozlišovat a vztahovat nejrůzné požadavky v rámci platné legislativy.

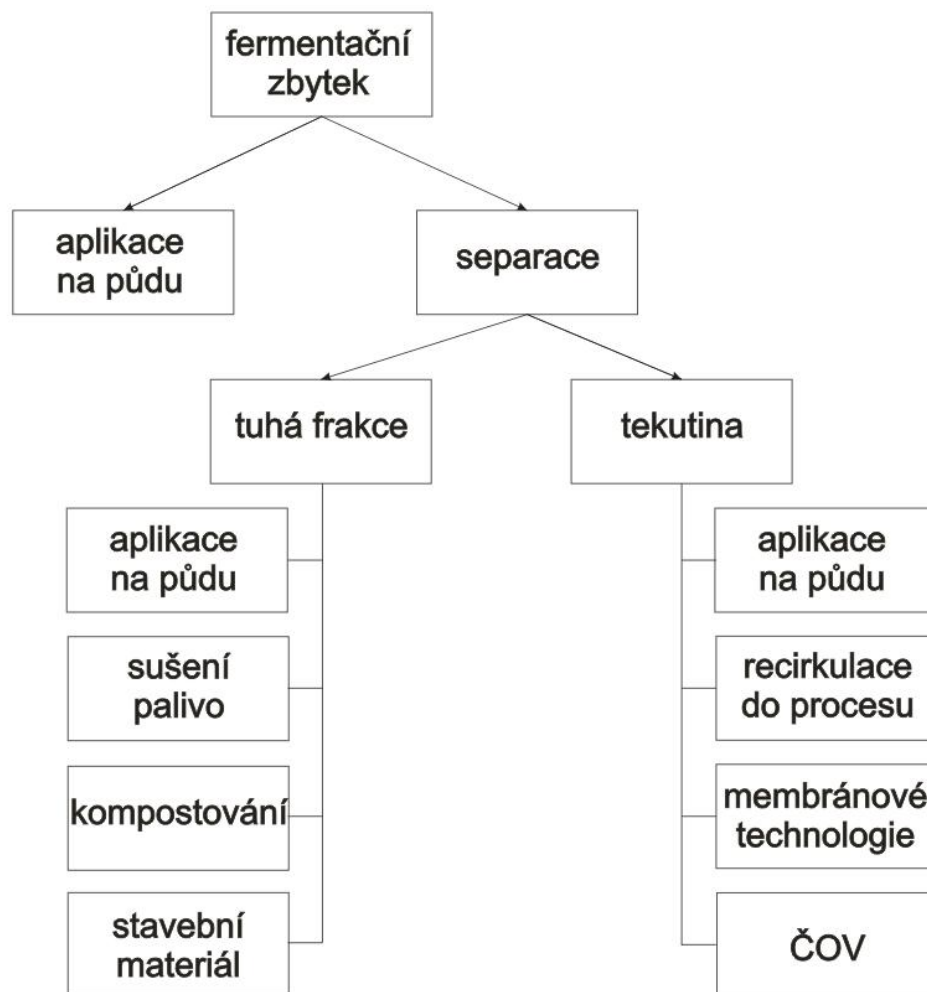
9.1.2 Rozdělení fermentačních zbytků dle použitých vstupních surovin

Existuje velká řada materiálů, které mohou být použity jako vstupní surovina do BPS, jako např. hnůj, kejda, rostlinné suroviny, biomasa, kaly, BRO a VŽP. Právě podle druhu vstupních surovin je zapotřebí BPS a fermentační zbytky důsledně rozlišovat a stanovovat na ně i různé požadavky v rámci povolovacího procesu. MŽP vydalo metodický pokyn k podmínkám schvalování bioplynových stanic předvedením do provozu, který má za úkol zavázat příslušné orgány státní správy v oblasti ŽP k jednotnému postupu při povolování a schvalování BPS a optimalizovat podmínky jejich provozu z hlediska ŽP.

V případě, že bioplynová stanice jako vstupní suroviny využívá bioodpady, musí provozovatel postupovat v souladu s vyhláškou č. 341/2008 Sb., o podrobnostech nakládání s biologicky rozložitelnými odpady. Seznam bioodpadů využitelných v zařízení k využívání bioodpadů včetně seznamu bioodpadů využitelných v malém zařízení podle § 33b odst. 1 písm. a) zákona o odpadech a požadavky na kvalitu odpadů vstupujících do technologie jejich materiálového využívání uvádí výše citovaná vyhláška, včetně požadavků na fermentační zbytek vystupující z této technologie. Pokud je fermentační zbytek produkován na BPS, kde jsou zpracovávány vedlejší živočišné produkty, spadají tyto BPS pod působnost Nařízení ES č. 1069/2009 a musí plnit podmínky tohoto nařízení. Tyto BPS musí být schválené příslušnou Krajskou veterinární správou.

10. Možnosti použití fermentačního zbytku

Způsob nakládání s fermentačním zbytkem je ovlivněn zejména jeho výslednou kvalitou, tedy vstupy do bioplynové stanice a konkrétní situaci každá bioplynová stanice, respektive provozovatele. Možné způsoby nakládání s fermentačním zbytkem jsou uvedeny na obrázku 10.



Obrázek 10: Způsoby nakládání s fermentačním zbytkem.

Při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu, což je v současnosti nejobvyklejší způsob nakládání s fermentačním zbytkem, je nutno postupovat v souladu se zákonem č. 156/1998 Sb., o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocných rostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd o a s vyhláškou

Ministerstva zemědělství 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů.

V příloze č. 3 vyhlášky č. 474/2000 Sb., o stanovení požadavků na hnojiva, ve znění pozdějších předpisů, je fermentační zbytek označen ve skupině organická a organominerální hnojiva a to jako typ 18.1 e (tabulka 6).

Tabulka 6: Požadavky na fermentační zbytek podle přílohy č. 3 vyhlášky 474/200 Sb.

Typ	Označení typu	Minimální obsah živin	Součásti označující typ formy a rozpustnost živin	Hodnocené součásti a další požadavky	Složení, způsob výroby	Zvláštní ustanovení
18.1	organické hnojivo	25 % spalitelných látek	spalitelné látky	spalitelné látky v sušině hodnocené jako ztráta žíháním	výhradně zstatkových krmiv a objemných krmiv anaerobní fermentací	digestát (organické hnojivo vzniklé anaerobní fermentací při výrobě bioplynu)
		0,6 % N	celkový dusík	dusík hodnocený jako celkový dusík v sušině		

Zároveň musí být splněny limitní obsahy rizikových prvků ve fermentačním zbytku uvedených v příloze č. 1, tabulka č. 2 vyhlášky 474/2000 Sb., a to v závislosti na obsahu sušiny, tabulka 7.

Tabulka 7: Limitní obsahy rizikových prvků ve fermentačním zbytku podle přílohy č. 1 vyhlášky 474/2000 Sb.

	Cd	Pb	Hg	As	Cr	Cu	Mo	Ni	Zn
sušina > 13 %	2	100	1	20	100	150	20	50	600
sušina < 13 %	2	100	1	20	100	250	20	50	1200

Poznámka: Maximální aplikační dávka 20 tun sušiny na ha v průběhu 3 let.

11. Minerální složení fermentačních zbytků

11.1 Původ minerálních složek fermentačních zbytků

Minerální látky obsažené ve fermentačních zbytcích mohou být dvojího původu, autochtonní a alochtonní. **Alogenní (původní) minerální fáze** jsou vnášeny jako součást substrátu již do vsázky bioplynových reaktorů a následně přecházejí s menšími či většími změnami do fermentačního zbytku. Jedná se o nerozpustné anorganické látky, které nacházíme především v oporných a ochranných strukturách živočišných i rostlinných organismů. Schránky bezobratlých živočichů jsou tvořeny hlavně uhličitánem vápenatým (měkkýši, koryši), kostry obratlovců fosforečnanem vápenatým. Hydratovaný oxid křemičitý tvoří schránky mřížovců (*Radiolaria*) a rozsivek (*Bacillariophyceae*) a často inkrustuje buněčné stěny u rostlin (Rosypal a kol., 1994). Ostatní vnesené minerální fáze se do systému dostávají v podstatě nechtěně jako kontaminace na kolech a součástech manipulační techniky, nečistoty v rostlinných produktech v podobě nedostatečně odstraněné půdy nebo jako výsledek špatně vytříděné suroviny ze sběru biologicky rozložitelného komunálního odpadu.

Autogenní (novotvořené) minerální fáze vznikají z prvků obsažených v substrátu po jeho rozkladu ve fermentoru. K utváření minerálních fází dochází při změně okolních podmínek prostředí, především teploty, tlaku, pH a Eh, změnou parciálního tlaku plynů, především H₂S a O₂ nebo spolupůsobením živých organismů.

Rozdělení minerálních fází fermentačních zbytků podle původu:

- **Alogenní (původní)**
 - oporných a ochranných struktury organismů

- nečistota na technice nebo v substrátu
- **Autogenní (novotvořené)**
 - krystalizace z fluid

11.2 Význam minerálních fází ve fermentačním zbytku

Inokulace a krystalizace minerálních fází z plynokapalných fluid je přirozeným procesem, který nastává za příhodných podmínek. Prvky obsažené v systému bioplynové technologie v plynokapalných fluidech, tedy v kapalinách, plynech a aerosolech mohou za určitých podmínek vytvářet minerální fáze, a to buď amorfni, nebo krystalické. Tento jev nastává při změně podmínek, především teploty, tlaku, pH a Eh, změnou parciálního tlaku plynů, především H₂S a O₂ nebo spolupůsobením živých organismů. Pevné minerální fáze tedy mohou vznikat tam, kde se tyto podmínky mění. V praxi se jedná o technologické prvky, kde je např. přivedeno větší množství kyslíku, snížena teplota, snížen tlak, jsou přítomny vhodné organizmy. Nejlépe pozorovatelnými jsou vznik minerální síry S⁰ při mikrobiálním odsiřování bioplynu nebo zarůstání potrubního vedení minerály, nejčastěji kalcitem, mg-kalcitem a struvitem.

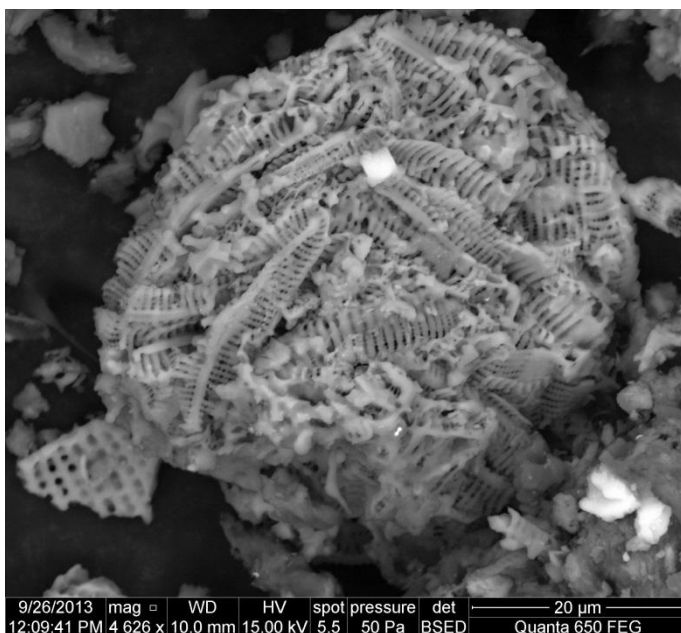
Vznik minerálních fází je možno z pohledu provozovatele bioplynové stanice chápat i negativně i pozitivně. **Negativními projevy** jsou zarůstání potrubního vedení a nádrží nebo sběrných kanálů u suché fermentace inkrustacemi. Tyto inkrustace brání průtoku fluid v plánovaném množství, způsobují poruchovost armatur a dalších pohyblivých prvků. Pokud se do bioplynové stanice dostávají nečistoty již společně se substrátem, a to v podobě zbytků půd je jejich vliv na technologické prvky především mechanický. Přítomnost minerálních zrn způsobuje abrazi povrchů, zhoršuje efektivitu míchání a zhoršuje čerpatelnost.

Pozitivními projevy jsou vazby prvků vhodných pro výživu rostlin (především P, K, Mg a stopové prvky) do minerálních fází, tím dochází ke stabilizaci a při aplikaci fermentačního zbytku do půdy k pozvolnému uvolňování. Tím je současně zabráněno rychlému odplavení prvků zálivkovou vodou.

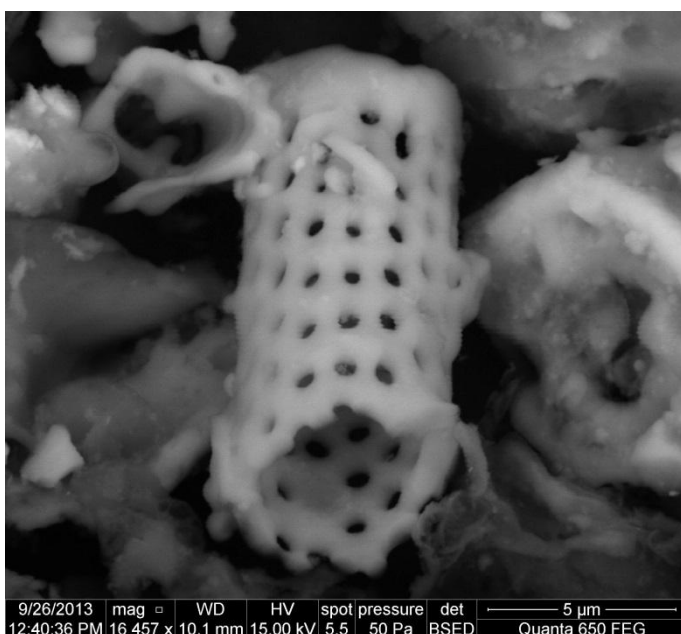
11.3 Praktický výzkum minerálních fází ve fermentačním zbytku

11.3.1 Elektronová mikroskopie s elektronovou mikrosondou

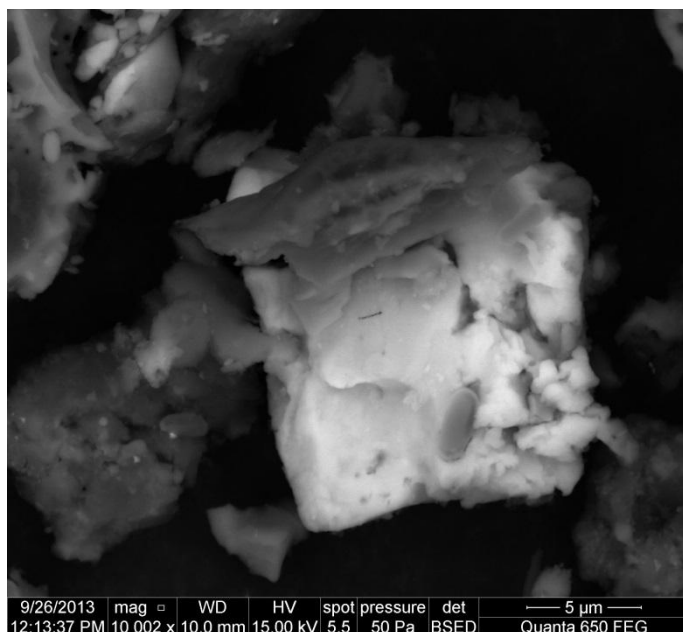
Ke studiu složení fermentačních zbytků lze úspěšně použít elektronovou mikroskopii s elektronovou mikrosondou. Obrazové znázornění minerálních fází ve fermentačních zbytcích je ukázáno na obr. 11-13.



Obrázek 11: Akumulace rozsivek (SiO₂) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 4626x.



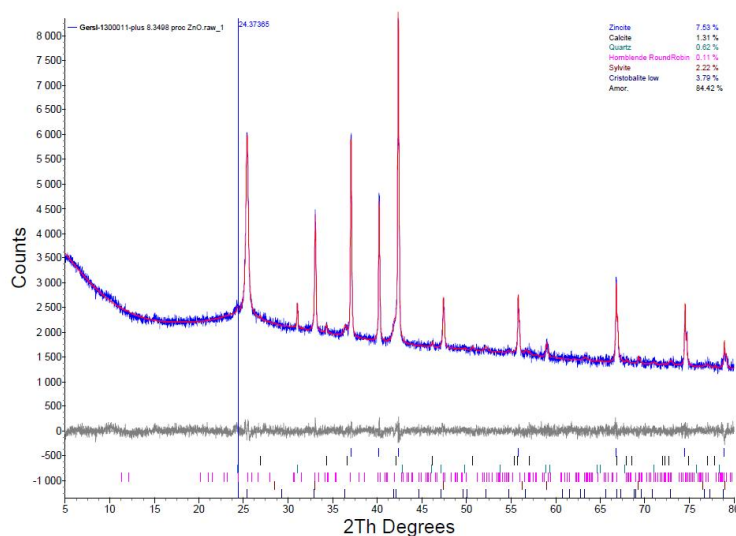
Obrázek 12: Fytolit (SiO₂) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 16457x.



Obrázek 13: Sylvín (KCl) ve fermentačním zbytku z pokusného reaktoru Mendelovy univerzity, ÚZPET na pracovišti autorů. Vsázka kukuřičná siláž a kejda. Elektronová mikroskopie, BSE, zvětšení 10002x.

11.3.2 Rentgenová difrakce

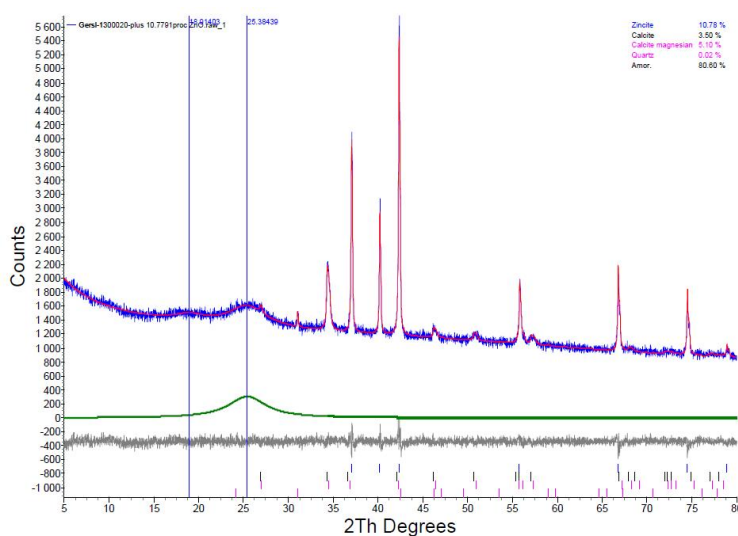
Minerální složení fermentačních zbytků lze stanovit rentgenovou difrakcí. Příklady rtdifraktogramů jsou uvedeny na obr. 14-16 a kvantitativní složení jednotlivých vzorků v tab. 8-10.



Minerál	Obsah
Amorfní podíl	91,29 %
Kalcit	1,42 %
Křemen	0,668 %
Hornblendit	0,123 %
Sylvín	2,398 %
Cristobalit	4,10 %

Obrázek 14: Rentgenogram FZ-K-11.

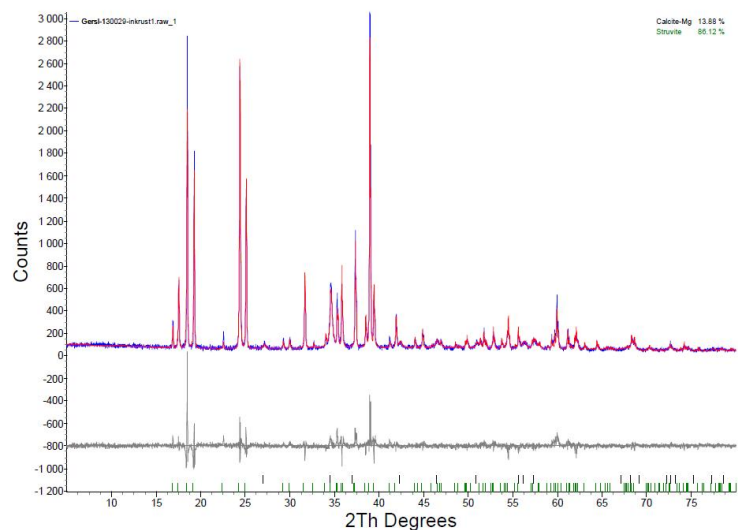
Tabulka 8: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-K-11.



Minerál	Obsah
Amorfní podíl	90,34 %
Kalcit	3,92 %
Mg-kalcit	5,72 %
Křemen	0,02 %

Obrázek 15: Rentgenogram FZ-K-20.

Tabulka 9: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-K-20.



Minerál	Obsah
Mg-kalcit	13,88 %
Struvit	86,12 %

Obrázek 16: Rentgenogram FZ-ST-29.

Tabulka 10: Obsah minerálních fází ve vzorku FZ-ST-29.

12. Zpracování a aplikace fermentačního zbytku do půdy

Fermentační zbytek z provozu BPS lze strojově rozdělit na tuhou část (separát) a tekutou část (fugát). Jako nejvýhodnější způsob využití fermentačního zbytku se jeví jeho aplikace do zemědělské půdy. Takto lze využít především zbytky z procesů, kde vstupní surovinou jsou statková hnojiva a materiály rostlinného charakteru (např., kukuřičná siláž, obilniny, sláma všech obilovin i olejnin, bramborová nať atd.).

12.1 Zacházení s fermentačním zbytkem z pohledu legislativy

Z hlediska legislativy jsou na fermentační zbytek z technologií, kde vstupním materiálem jsou statková hnojiva a materiály rostlinného charakteru kladeny hygienické požadavky. Jedná se zejména o splnění limitních hodnot rizikových prvků a procesních hygienizačních parametrů. Pro tento fermentační zbytek není možné použít jako vstupní surovinu odpady podle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon o odpadech“), ani VŽP, které spadají pod Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1069/2009 o hygienických pravidlech pro vedlejší produkty živočišného původu a získané produkty, které nejsou určeny k lidské spotřebě.

12.2 Aplikace fermentačního zbytku na zemědělskou půdu

Má-li být aplikován fermentační zbytek na zemědělskou půdu za účelem hnojení je nutné postupovat v souladu se zákonem č. 156 Sb. o hnojivech, pomocných půdních látkách, pomocnýchrostlinných přípravcích a substrátech a o agrochemickém zkoušení zemědělských půd, ve znění pozdějších předpisů (dále jen „zákon o hnojivech“).

Je-li fermentační zbytek dále zpracováván jako organické hnojivo a následně aplikováno na zemědělskou půdu, nejedná se v tomto případě o odpad, ale o hnojivo a je třeba dále postupovat podle příslušných předpisů MZe. Podle vyhlášky MZe č. 474/2000 sb., o stanovení požadavků na hnojiva ve znění pozdějších předpisů se fermentační zbytek zařazuje výstup z BPS do organického hnojiva (typ 18.1 e) a musí splňovat limitní hodnoty rizikových prvků uvedených v tabulce 6. Při hnojení je nutné používat pouze stabilizované fermentační zbytky, produkované při dosažení správného technologického postupu a přiměřeného zatížení fermentorů. Nebezpečím jsou substráty s vysokými obsahy organicky vázaného dusíku. Důležité je tedy věnovat pozornost skladbě vstupních surovin a hlavně celkovému poměru C:N. Přičemž vsádka do fermentorů by měla mít minimální poměr 10, avšak v nejlepším případě 20. Optimálního podílu vstupních surovin lze docílit například kofermentací kejdly s rostlinnými materiály.

12.3 Vlastnosti fermentačního zbytku jako organického hnojiva

Ve srovnání s klasickými statkovými hnojivy má fermentační zbytek vzhledem k použitým surovinám poměrně vysoký celkový obsah dusíku, nižší obsah uhlíku, obsah sušiny v rozmezí (2,7–9,3 %) a vyšší pH (7,6–8,8). Obsah těkavých látek ve fermentačním zbytku je ekvivalentní k obsahu organických látek, který se obvykle pohybuje mezi (68,3–73,2 %), což znamená, že fermentační zbytek je zdrojem organických látek, jejichž největší výhodou je vliv na strukturní vlastnosti půdy. Další parametry fermentačního zbytku jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Základní parametry fermentačního zbytku.

pH	sušina	Těkavé látky	Vodivost	BSK	CHSK
[-]	[%]	[%]	[$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$]	[$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]	[$\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$]
7,6–8,8	2,7–9,3	68,3–73,2	5477–82040	1880–23600	34000–170000

Zjištěný obsah dusíku ve fermentačním zbytku se pohyboval v rozpětí 15–16 %. Většina dusíku ve fermentačním zbytku je obsažena v minerální formě (62–65 %), což znamená, že

velká část dusíku je okamžitě dostupná rostlinám. Poměr C: N se pohybuje v rozpětí 3,5–4:1. Celkový obsah fosforu ve fermentačním zbytku je nízký a pohyboval se v rozpětí (0,7–0,9 %), přičemž pouze malá část tohoto fosforu byla ve vodě rozpustná (0,1–0,3 %). Celkový obsah draslíku se pohyboval v rozpětí 3,2–4,7 %, přičemž ve vodě rozpustný je vyšší (1,9–3,3 %). Obsah síry se pohyboval v rozpětí 0,3–0,9 %, vápníku 0,3–2,6 % a hořčíku 0,2–0,3 %. Obsah těžkých kovů byly nižší než legislativou stanovené limitní koncentrace.

Obsah NPK ve fermentačním zbytku je závislý na použité metodě separace, výsledky jsou uvedeny v tabulce 12. Nicméně, nejsou k dispozici údaje o dostupnost živin v tekuté a tuhé formě fermentačního zbytku. Lze tedy očekávat, že více rozpustné formy nutrietů jsou obsaženy v tekuté části fermentačního zbytku, naopak hůře rozpustné formy nutrietů jsou obsaženy v tuhém podílu fermentačního zbytku. V tomto směru je nezbytné provést podrobnější výzkum.

Tabulka 12: Sušina a obsah NPK v tuhé a tekuté části fermentačního zbytku v závislosti na metodě odvodnění.

Metoda separace	Tuhá část fermentačního zbytku				Tekutá část fermentačního zbytku			
	Sušina	Celkový dusík v sušině	Celkový fosfor v sušině	Celkový draslík v sušině	Sušina	Celkový dusík v sušině	Celkový fosfor v sušině	Celkový draslík v sušině
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Pásový lis	9,5	9,6	0,4	1,6	3,0	7,7	1,3	2,0
Šnekový lis	14,0	9,9	0,4	0,9	3,3	6,3	1,1	0,7
Odstředivka	24,3	19,1	1,1	0,7	2,6	3,4	0,5	0,7

Složení fermentačního zbytku představuje riziko významné ztrát dusíku v plynné formě, proto se fermentační zbytek – fugát doporučuje aplikovat hadicovými aplikátory (obr. 17).



Obrázek 17: Aplikace fermentačního zbytku hadicovými aplikátory.

Kvalitní fermentační zbytek je hnojivo, které obsahuje hodnotné organické látky a minerální živiny. Zpravidla nezapáchá, nebo vykazuje jen malou míru zápachu. Toho je dosaženo vhodnou skladbou vstupních surovin a dostatečnou dobou zdržení ve fermentoru. Tuhá i tekutá část fermentačního zbytku o sušině vyšší než 2 % jsou vhodnými prostředky pro udržení úrodnosti a zabezpečení výživy rostlin. Ke zvýšení hnojivé účinnosti a omezení emisí je někdy zapotřebí provést následující opatření.

- Používat zakryté uskladňovací nádrže
- Nerozrušovat přirozené plovoucí vrstvy ve skladovacích nádržích
- Vlévat fermentační zbytek do skladovacích jímek pod hladinu tekutiny
- Při aplikaci fugátu se doporučuje využívání hadicových aplikátorů s dosahem až k zemi, neboť tento způsob aplikace zaručuje lepší a rychlejší vsakování fermentačních zbytků do půdy a tím výrazně snižuje emise dusíku a případného zápachu do ovzduší

Samotné dávkování fugátu jako hnojiva se do značné míry podobá použití a dávkování kejdy. Musí se vždy přihlídnout k obsahu živin a potřebám pěstovaných rostlin. Pro určení množství se vychází:

- Z pěstitelských podmínek ovlivňujících přístup živin (předplodina, zpracování půdy, závlaha)
- Z potřeby živin porostu pro předpokládaný výnos a jeho kvalitu
- Z půdní reakce (pH), poměru důležitých kationtů (vápníku, draslíku a hořčíku) a množství půdní organické hmoty

12.4 Omezení při aplikaci fermentačního zbytku na zemědělskou půdu

Fermentační zbytek je jako organické hnojivo zařazeno podle zákona č. 254/2001 Sb. o vodách ve znění pozdějších předpisů mezi "závadné látky".

Povinnosti osob zacházejících s tímto materiálem je zamezit vniku do podzemních a povrchových vod:

- To představuje dodržování aplikace fermentačního zbytku pouze na pozemky, kde není provedena meliorace.
- Fermentační zbytek je rovněž zakázáno aplikovat na zamokřenou půdu, půdu pokrytou sněhem nebo promrzlou půdu.
- Při hnojení na svažných pozemcích je se sklonem k vodnímu toku je důležité zachovávat ochranný pás, kde nebude fermentační zbytek aplikován.

Podle zákona o vodách a na základě Směrnice Rady 91/676/EHS o ochraně vod před znečištěním dusičnany ze zemědělských zdrojů bylo vydáno Nařízení vlády č. 103/2003 Sb. Podle tohoto nařízení se fermentační zbytek řadí do dusíkatých hnojivých látek. Může být dále zařazeno hnojiv s rychle uvolnitelným dusíkem, v nichž je poměr uhlíku k dusíku nižší než 10 a do hnojivů pomalu uvolnitelným dusíkem, v nichž je poměr uhlíku k dusíku roven nebo je vyšší než 10.

Zemědělský pozemek s jednoletou plodinou na orné půdě nebo připravený pro založení porostu jednoleté plodiny nesmí být hnojen fermentačním zbytkem s poměrem C:N > 10 v období od 1. 6. do 31. 7. (výjimkou může být pouze následné pěstování ozimých plodin a meziplodin).

V případě hnojení pozemku s pěstovanou jednoletou plodinou nebo pozemku připraveného k založení jednoleté plodiny nesmí být hnojení fermentačním zbytkem s C:N < 10 v období 15. 11. až 31. 1. Travní a jetelotravní porosty na orné půdě, louky a pastviny nesmí být hnojeny s C:N < 10 v období 15. 11. až 31. 1., kdežto aplikace s C:N > 10 není časově omezena. U trvalých travních porostů se sklonností nad 7° je při hnojení omezena dávka na 80 kg celkového N na hektar. Na půdách bez rostlinného pokryvu se sklonností nad 12° je aplikace fugátu nevhodná. U porostů se sklonností nad 7° se při aplikaci fugátu vyžaduje vyloučení hnojení v pásu nejméně 25 m od břehové čáry.

12.5 Skladování Fermentačních zbytku BPS

Mimo vegetační období platí omezení pro použití fermentačního zbytku na půdu. Je nutné vyřešit jeho skladování. Skladování hnojiv musí být v souladu s vyhláškou č.274/ 1998 Sb. o skladování a způsobu používání hnojiv, ve znění pozdějších předpisů. Podle vyhlášky se musí fermentační zbytek (fugát) skladovat v nepropustných nadzemních, případně částečně zapuštěných nádržích. Separát se musí skladovat ve stavbách stejně zabezpečených stejným způsobem, jako stavby pro skladování tuhých statkových hnojiv s vyloučením přítoku povrchových nebo srážkových vod. Součástí skladu na tuhý fermentační zbytek je sběrná jámka na srážkové vody. Separát připravený pro vlastní účely ze statkových hnojiv může být před jeho použitím uložen na zemědělské půdě nejdéle po dobu 24 měsíců. Kapacita skladovacích prostor pro fermentační zbytek musí odpovídat skutečné produkci.

13.Literatura

- Allen, M. R., Braithwaite, A. & Hills, C. C. (1997): Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites. – *Environ. Sci. Technol.* 31. 1054-1061, ISSN: 0013-936X.
- Amon, T., Kryvoruchko, V., Hopfner-Sixt, K., Amon, B., Ramusch, M., Milovanovic, D., Bodiroza, V., Sapik, R., Zima, J., Machmuller, A., Zollitsch, W., Knaus, W., Friedel, J., Hrbek, R., Potsch, E., Gruber, L., Steinwidder, A., Pfundtner, E., Wagentristl, H. (2006): Optimierung der Methanerzeugung aus Energiepflanzen mit dem Methanenergiesystem. – Project Final report. Within Programlinie. Energiesysteme der Zukunft of the Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Cavenati, S., Grande, C.A., Rodrigues, A.E., (2005): Upgrade of methane from landfill gas by pressure swing adsorption. *Energy & Fuels*, 19, 2545-2555.
- Cioabla, A. E., Ionel, I., Trif-Tordai, G., Irimescu, A., Vetres, I. (2013): Study on the quality of biogas obtained from agricultural residues during anaerobic fermentation. – *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 14(1), 247–255, ISSN: 1311-5065.
- de Hullu, J., Maassen, J.I.W., van Meel, P.A., Shazad, S., Vaessen, J.M.P. (2008): Comparing different biogas upgrading techniques. – Eindhoven University of Technology, The Netherlands.
- Duan, H.Q., Koe, L.C.C., Yan, R., Chen, X.G., (2006): Biological treatment of H₂S using pellet activated carbon as a carrier of microorganisms in a biofilter. – *Water Research*, 40, 2629-2636
- Eklund, B., Anderson, E. P., Walker, B. L., Burrows, D. B. (1998). Characterization of landfill gas composition at the freshkills municipal solid-waste landfill. – *Environ. Sci. Technol.* 32. 2233-2237, ISSN: 0013-936X.
- Harasimowicz, M., Orluk, P., Zakrzewska-Trznadel, G., Chmielewska, A.G. (2007): Application of polyimide membranes for biogas purification and enrichment. – *Journal of Hazardous Materials*, 144, 698-702
- Hattori, S., Luo, H., Shoun, H., Kamagata, Z. (2001): Involvement of formate as an interspecies electron carrier in a syntrophic acetate-oxidizing anaerobic microorganism

- in coculture with methanogens. – *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 91(3), 294-298, ISSN: 1389-1723.
- Hobson, P.N., Bousfield, S., Summers, R. (1981): *Methane Production from Agricultural and Domestic Wastes*. – Springer Netherlands, 270 s., ISBN. 978-94-009-8104-1.
- Jeníček, P., Zábranská, J., Dohányos, M., Straka, F. (2007): *Síra v bioplynu – zdroje a příčiny problémů*. – Mezinárodní konference Bioplyn, České Budějovice.
- Khun, M., Ďurža, O., Milička, J., Dlapa, P. (2008): *Environmentálna geochémia*. – Geografika, 278 str. Bratislava.
- Krajča, J. (1977): *Plyny v podzemních vodách. Jejich vlastnosti, průzkum a využití*. – SNTL, 424 str. Praha.
- Lee, C., Kim, J., Hwang, K., O'Flaherty, V., Hwang, S. (2009): *Quantitative analysis of methanogenic community dynamics in three anaerobic batch digesters treating different wastewaters*. – *Water Research*, 43 (1), 157–165, ISSN: 0043-1354.
- Mičola, T. (2013): *Porovnání provozních parametrů vybraných bioplynových stanic*. – MS, Agronomická fak. Mendelova univerzita, 57 str. Brno.
- Pinto, M.L., Pires, J., Rocha, J., (2008): *Porous material prepared from clays for the upgrade of landfill gas*. – *Journal of Physical Chemistry C*, 112, 14394-14402.
- Pohland, F.G., Gosh, S. (1971): *Developments in anaerobic stabilization of organic wastes – the two-phase concept*. *Environmental Letters*, 1, 255-266, ISSN: 1748-9326.
- Reinhart, D. R. (1993): *A review of recent studies on the sources of hazardous compounds emitted from solid waste landfills. A U.S. experience*. – *Waste Management and Research*, 11, 257-268, ISSN: 1096-3669.
- Rosypal, S., Beneš, J., Beneš, K., Buchar, J., Heráň, I., Homola, J., Hůrka, K., Kubišta, V., Kvaček, Z., Linc, R., Losos, B., Mladá, J., Mladý, F., Novotný, I., Pavlová, L., Pikálek, P., Romanovský, A., Slavíková, Z., Slavíková, J., Šašek, V., Šebánek, J., Šmarda, J., Štys, P., Urban, Z. (1994): *Přehled biologie*. – Scientia spol. s r. o., 635 str. Praha.
- Shin, H-C., Park, J-W., Park, K. & Song, H-C. (2002): *Removal characteristics of trace compounds of landfill gas by activated carbon adsorption*. – *Environ. Pollut.*, 119, 227-236, ISSN: 0269-7491.

Stams, A. J. M., Oude Elferink, S. J. W. H., Westerman, P.

(2003): Metabolic interactions between methanogenic consortia and anaerobic respiring bacteria. – *Advances in Biochemical Engineering / Biotechnology* 81, 31–56, ISSN: 0724-6145.

Stieb, M., Schink, B. (1987): Cultivation of syntrophic anaerobic bacteria in membrane-separated culture devices. – *FEMS Microbiology Letters*, 45(2), 71-76, ISSN: 0378-1097.

Straka, F. et al. (2006): *Bioplyn*. – 2. rozšířené vydání, Gas, s. r.o., 706 str. Praha.

Škollová, Z. (1974): Problematika koroze podzemních a nadzemních zařízení podzemních zásobníků plynu. – MS, Úst. geol. inž. Brno.

van der Zee, F.P., Villaverde, S., Garcia, P.A., Fdz-Polanco, F. (2007): Sulfide removal by moderate oxygenation of anaerobic sludge environments. – *Bioresource Technology*, 98, 518-524.