



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADU ZE SUCHÉ A MOKRÉ FERMENTACE

ENERGY UTILIZATION OF RESIDUAL MATERIAL FROM FERMENTATION PROCESS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ BORKOVEC

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

ING. MARTIN LISÝ, PH.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Ondřej Borkovec

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Energetické využití odpadu ze suché a mokré fermentace

v anglickém jazyce:

Energy Utilization of Residual Material from Fermentation Process

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte rešerži energetického zpracování zbytkového materiálu z technologií mokré a suché fermentace pomocí spalování nebo zplyňování.

Cíle bakalářské práce:

1. rešerže a popis technologií suché a mokré fermentace
2. charakteristika zbytkového materiálu
3. rešerže a porovnání možných způsobů energetického využití zbytkového materiálu

Seznam odborné literatury:
Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se skládá ze tří hlavních částí. První část se zabývá popisem technologií suché a mokré fermentace a porovnáním těchto metod. Ve druhé části je rozebráno složení a charakteristiky zbytkového materiálu po suché a mokré fermentaci. Ve třetí části jsou popsány různé metody spalování zbytkového materiálu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Suchá fermentace, mokrá fermentace, anaerobní fermentace, digestát, separát, zbytkový materiál, zplyňování, spalování

ABSTRACT

This Bachelor's work consists of three main parts. The first part deals with description of dry and wet fermentation process and comparison of these methods. The second part describes the composition of the residual material and its characteristics. The last part deals with different methods of combustion of residual material.

KEYWORDS

Dry fermentation, wet fermentation, anaerobic fermentation, digestate, separate, residual material, gasification, combustion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BORKOVEC, O. *Energetické využití odpadu ze suché a mokré fermentace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Lisý, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Martina Lisého, Ph.D. a použil pouze literaturu uvedenou v seznamu literatury.

V Brně dne 29.května 2015

Borkovec Ondřej

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu mé práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za odborné vedení a rady během zpracování daného tématu.

OBSAH

ÚVOD	10
1 POPIS TECHNOLOGIE FERMENTACE.....	11
1.1 Aerobní fermentace	11
1.2 Anaerobní fermentace	12
1.2.1 Bioplyn.....	13
1.2.1.1 Parametry materiálu vhodného pro anaerobní fermentaci .	13
1.2.2 Proces anaerobní fermentace.....	14
1.2.3. Metody výroby bioplynu	15
1.2.3.1 Druh dávkování.....	16
1.3 Mokrá anaerobní fermentace.....	17
1.4 Suchá anaerobní fermentace.....	19
1.5 Porovnání technologií suché a mokré fermentace	21
1.6 Příklady bioplynových stanic.....	22
2 CHARAKTERISTIKA ZBYTKOVÉHO MATERIÁLU.....	26
2.1 Rozdělení digestátů	26
2.1.1 Rozdělení podle použitých vstupních surovin	26
2.1.2 Rozdělení digestátů dle možnosti použití.....	27
2.2 Složení digestátu	27
2.2.1 Zbytek po mokré fermentaci	27
2.2.2 Zbytek po suché fermentaci	30
3 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ZBYTKOVÉHO MATERIÁLU PO ANAEROBNÍ FERMENTACI	32
3.1 Spalování fermentačního zbytku	32
3.1.1 Spolu-spalování kalů v teplárnách a elektrárnách	33
3.1.2 Spolu-spalování kalů ve spalovnách komunálního odpadu	34
3.1.3 Spalování ve speciálních spalovnách odvodněného kalu ...	36
3.1.4 Úprava zbytku do podoby standardizovaného paliva	38
3.2 Zplyňování fermentačního zbytku	42
3.2.1 Výhody zplyňování.....	43
3.2.2 Typy zplyňovacích generatorů	44
3.2.3 Příklady zplyňovacích stanic	46
ZÁVĚR.....	50
Seznam použité literatury	51
SEZNAM OBRÁZKŮ	54
SEZNAM TABULEK.....	54

ÚVOD

Bioplyn z bioplynových stanic se v posledních letech dostával stále častěji do povědomí lidí jako jeden z hlavních obnovitelných zdrojů energie.

Zbytek po anaerobní fermentaci však doposud sloužil převážně jako organické hnojivo v zemědělství a jeho energetický potenciál se v podstatě dále nevyužíval. Ne všichni odborníci však považují hnojivo z fermentačních zbytků jako velmi kvalitní, navíc v některých případech, kvůli svému složení, ani jako hnojivo nelze použít. V těchto případech čekalo fermentační zbytek například skládkování.

V současnosti se stále ve větším měřítku začíná uplatňovat termické zpracování fermentačního zbytku, díky němuž se energeticky využije velká část původní vsázky bioplynové stanice.

Tato bakalářská práce se zabývá právě touto možností zpracování fermentačního zbytku. S rostoucím zlepšováním potřebných technologií a růstu znalostí v této oblasti se dá totiž očekávat stále lepší energetické výnosy této metody a vzniku dalšího velkého zdroje obnovitelné energie.

S objemem biologicky rozložitelného odpadu zpracovatelného procesem anaerobní fermentace v řádu tun se v termickém zpracování fermentačních zbytků skrývá velký energetický potenciál.

1 POPIS TECHNOLOGIE FERMENTACE

Fermentace je jeden ze způsobů využití obnovitelných zdrojů energie (OZE). Stále častěji se prosazuje vedle známějších OZE jako je sluneční, vodní či větrná energie. Používá se především ke zpracování zbytkové biomasy ze zemědělské a jiné činnosti, biologicky rozložitelných komunálních odpadů, kejdy a další. Využívá se v bioplynových stanicích, kde pomocí ní vzniká bioplyn a zbytkový materiál. Dále převážně v čistírnách odpadních vod, kde se pomocí ní zpracovává odpadní voda.

Fermentaci dělíme na aerobní a anaerobní, která se dále dělí na suchou a mokrou.

1.1 Aerobní fermentace

Aerobní fermentace je proces zpracování organického materiálu za přístupu vzduchu.

Mezi hlavní způsoby použití aerobní fermentace patří kompostování. Při něm se za přístupu vzduchu činností mikroorganismů přeměňuje biologicky rozložitelný odpad na kompost. Tento způsob nakládání s biomasou je známý například ze zahrádek běžných obyvatel, ale existují také velké kompostárny s masovou výrobou kompostu.

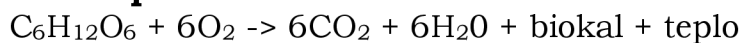
Vzniklý kompost se používá jako hnojivo, nahrazující hnojiva umělá, jejichž výroba není šetrná k životnímu prostředí. Dále může kompost sloužit jako náhrada rašeliny či pro rekultivaci a zúrodnování půdy. Dalším produktem aerobní fermentace je oxid uhličitý a vodní pára.

Kromě použití v zemědělství je aerobní fermentace používána zejména v čistírnách odpadních vod. Aktivovaný kal (odpadní voda s mikroorganismy) zde čistí vodu přeměňováním organických sloučenin ve vodě.

Rozlišujeme kontinuální systém kompostování a diskontinuální. U kontinuálního způsobu dochází k míchání a provzdušňování materiálu s materiálem na volné ploše (například u čističek odpadních vod probíhá každý proces v jiné části systému ČOV). U diskontinuálního procesu probíhají všechny procesy v jedné nádrži postupně.

Jistou výhodou oproti anaerobní fermentaci má aerobní fermentace v nižších investičních nákladech a náročnosti. Kromě tepla a vody již ke kompostu nevznikají další odpadní látky. Skutečnost vzniku bioplynu při anaerobní fermentaci však všechny tyto drobné výhody více než vyrovnává.

Rozdíl mezi anaerobním a aerobním procesem při rozkladu glukózy:

Aerobní proces:

$$1 \text{ kg} + 0,53 \text{ kg} \rightarrow 0,72 \text{ kg} + 0,4 \text{ kg} + 0,41 \text{ kg} + 6300 \text{ kJ}$$

Anaerobní proces

$$1 \text{ kg} \rightarrow 0,25 \text{ kg} + 0,69 \text{ kg} + 0,06 \text{ kg} + 0,38 \text{ kJ} \quad [1].$$

Všechny následující části práce se již zabývají pouze anaerobní fermentací a produkty z ní získané.

1.2 Anaerobní fermentace

Metanogenní kvašení neboli anaerobní fermentace (digesce) je mikrobiální rozklad organických látek bez přítomnosti kyslíku pomocí směsi mikroorganismů za současného vzniku bioplynu a fermentačního zbytku – digestátu (stabilizovaný substrát s vysokým hnojivým účinkem). Proces probíhá při teplotách od 0 °C do 70 °C.

Tento proces, který za určitých podmínek může probíhat v přírodě samovolně, se za optimálně řízených podmínek (např. obsah sušiny, reakční teplota aj.) odehrává v reaktorech bioplynových stanic (BPS).

Nejvýhodnějším zdrojem biomasy pro anaerobní fermentaci jsou biologické zbytky ze zemědělství, lesnictví, komunálního hospodářství a venkova, a to ze tří hlavních důvodů:

Produkce kvalitních organických hnojiv

Hlavní důvod především pro zemědělské podniky, díky možnosti zpracování vlastního organického materiálu na vyprodukování hnojiva a bioplynu pro vlastní potřebu.

Získání doplňkového zdroje energie

Opět zde pro většinu podniků vychází nejvýhodněji využití bioplynu pro své vlastní potřeby. Buď přímo pro ohřev teplé užitkové vody, či výrobu teplé užitkové vody a elektrické energie pomocí kogenerační jednotky. Další možností využití vyrobené energie je její odprodej do distribuční sítě. Zde si musí každý provozovatel rozhodnout sám, co je pro něj nejvýhodnější na základě výkupní ceny elektřiny z obnovitelných zdrojů. Ta se konkrétně pro spalování bioplynu v bioplynových stanicích uvedených do provozu mezi lety 2012 – 2013 pohybuje mezi 3,04 – 4,12 Kč / kWh a zelené bonusy v rozmezí 2,19 - 3,27 Kč / kWh [15]. (Zelený bonus je příplatek k tržní ceně elektřiny, kterou má právo obdržet výrobce elektřiny od provozovatele přenosové nebo regionální distribuční soustavy, prodá-li elektřinu za smlouvanou tržní cenu distributorovi el. energie nebo vyrobenou elektřinu sám spotřebuje.)

Zlepšení pracovního a životního prostředí

Energetické využití biomasy má příznivý vliv na omezení kumulace oxidu uhličitého v atmosféře. Oxid uhličitý je při produkci biomasy spotřebován při fotosyntéze a poté uvolněn při energetickém využití biomasy zpět do atmosféry. Tím se uzavře časově krátký koloběh oxidu uhličitého.

Tento faktor je stále více relevantní při rozhodování o výstavbě bioplynových stanic převážně díky tlaku „ekologické legislativy“ a zákonech s ní spojených, jako zákon o odpadech, integrované prevenci před znečištěním ovzduší a registraci znečišťovatelů aj. [1]

1.2.1 Bioplyn

Bioplynem se dají nazvat všechny plynné směsi, které vznikly biologickým rozkladem organických látek činností mikroorganismů.

Zahrnuje se tím vznik bioplynu jak v přírodě, tak v řízených anaerobních reaktorech apod.

Bioplyn se v ideálním případě skládá ze dvou složek, metanu (CH_4), kterého obsahuje kolem 55 – 70 %, a 30 – 45 % oxidu uhličitého (CO_2). V praxi je však surový bioplyn tvořen příměsí dalších minoritních plynů, protože jeho fyzikální a chemické vlastnosti ovlivňuje celá řada parametrů původní biomasy, například složení materiálu, podíl vlhkosti, kyselost materiálu a další. Podle těchto parametrů můžeme rozlišovat různé druhy anaerobní fermentace.

Vyrobený bioplyn se dále využívá k energetickým účelům. Způsoby energetického využití jsou:

- Přímé spalování (chlazení, topení, ohřev vody aj.)
- Kogenerace (současná výroba elektrické energie a ohřev teplotního média) či trigenerace (kogenerace při které se vyrábí i chlad)
- Pohon spalovacích motorů či turbín
- Jako zdroj H_2 – výroba palivových článků

1.2.1.1 Parametry materiálu vhodného pro anaerobní fermentaci

Vsázkový materiál do procesu anaerobní fermentace musí splňovat řadu požadavků. Převážně musí obsahovat málo anorganického podílu a naopak mít vysoký podíl biologicky rozložitelných látek. Dále se materiál rozlišuje podle čísla pH, podílu dusíkatých a uhlíkatých látek, obsahu sušiny a dalších parametrů.

Číslo pH

Významným faktorem ovlivňujícím fermentaci je číslo pH, které určuje kyselost nebo zásaditost materiálu. Optimální hodnota pH se mění během procesu. Při vstupu do procesu je optimální pH blízké neutrální hodnotě mezi 7 až 8 stupni pH. Na začátku procesu může pH poklesnout na hodnotu 4 až 6. Při hodnotách pH menších než 5 mohou na některé kmeny metanogenů působit inhibiční účinky (snižuje se aktivita enzymů a dochází k omezení správného průběhu reakce). Při správném průběhu procesu způsobí metanogeny svojí aktivitou opětovnou neutralizaci substrátu pH = 7.

Teplota fermentovaného materiálu

Metanogenní bakterie jsou velmi citlivé na prudké kolísání teplot. Proto je důležité vhodnou teplotu, vybranou na základě typu procesu fermentoru, přísně dodržovat.

Optimální teplotní pásma jsou vázána na různé kmeny bakterií:

- psychofilní 15 až 20 °C
- mezofilní 35 až 40 °C
- termofilní 55 °C

Při teplotě nad 60 °C se začínají objevovat inhibiční účinky.

Mezofilní teplotní režimy se se používají nejčastěji při zpracování zemědělské a komunální biomasy a psychofilní pro biomasu z velkých neregulovaných nádrží a lagun.

Poměr uhlíkatých a dusíkatých látek

Vysoký obsah dusíkatých látek má inhibiční charakter a může se projevit negativně na složení bioplynu, zejména kvůli minoritnímu obsahu plynů, jako například amoniaku či oxidu dusného. Za ideální se považuje poměr okolo 30:1.

Vliv inhibitorů a dalších příměsí

Inhibiční účinky na bakterie má kromě výše zmíněných bodů například kyslík a další nežádoucí příměsí. Například některé látky v krmných směsích zvířat či antibiotika sloužící jako jejich léčiva. Dále by se anaerobně neměly zpracovávat látky, které byly dlouho skladovány a proběhl u nich proces aerobní fermentace (kompostování), jsou již ve stádiu hnilobného rozkladu, či byly vystaveny fyzikálně-mechanickým účinkům, které mohly narušit kvalitu biomasy.



Obr. 1 Bioplynová stanice na mokrou fermentaci [23]

1.2.2 Proces anaerobní fermentace

Jedná se o velmi složitý biochemický proces, který se skládá z mnoha dílčích, na sebe navazujících fyzikálních, fyzikálně-chemických a

biologických procesů. Metanogeneze je pouze konečná fáze biochemické konverze biomasy v anaerobních podmínkách na bioplyn a zbytkový fermentovaný materiál.

I. Fáze: Hydrolýza

Začíná v době, kdy prostředí obsahuje vzdušný kyslík. Předpokladem pro její nastartování je mimo jiné dostatečný obsah vlhkosti – nad 50 % hmotnostního podílu. Hydrolytické mikroorganismy ještě striktně nevyžadují bezkyslíkaté prostředí. Enzymatický rozklad mění polymery (polysacharidy, proteiny, lipidy atd.) na jednodušší organické látky (monomery).

II. Fáze: Acidogeneze

Zpracovávaný materiál může obsahovat ještě zbytky vzdušného kyslíku, v této fázi však dojde definitivně k vytvoření anaerobního (bezkyslíkatého) prostředí. Zajistí to četné kmeny fakultativních anaerobních mikroorganismů, které se aktivují v obou prostředích.

Vznik CO_2 , H_2 a CH_3COOH umožňuje metanogenním bakteriím tvorbu metanu. Kromě toho vznikají jednodušší organické látky (vyšší organické kyseliny, alkoholy).

III. Fáze: Acetogeneze

Je někdy označována jako mezifáze. Acidogenní specializované kmeny bakterií transformují vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou (CH_3COOH), vodík (H_2) a oxid uhličitý (CO_2).

IV. Fáze: Metanogeneze

Metanogenní acetotrofní bakterie rozkládají především kyselinu octovou (CH_3COOH) na metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2), hydrogenotrofní bakterie produkují metan (CH_4) z vodíku (H_2) a oxidu uhličitého (CO_2). Určité kmeny metanogenních bakterií se chovají jako obojetné.

Pro stabilitu procesu anaerobní fermentace organických materiálů je velmi důležité optimální rovnováha v kinetice jednotlivých fází, probíhajících s odlišnou kinetickou rychlostí. Metanogenní fáze probíhá přibližně 5krát pomaleji než zbylé tři fáze. Tomu je potřeba přizpůsobit konstrukci bioplynových technologických systémů a dávkování surového materiálu, jinak hrozí přetížení fermentoru se všemi nepříznivými důsledky. [1]

1.2.3. Metody výroby bioplynu

Výroba bioplynu anaerobní fermentací je prováděna v různých variantách, na základě různých kritérií. Jedním z kritérií je například potřebná teplota (viz výše) či obsah sušiny (suchá/mokrý fermentace). Dalším možným kritériem je počet procesních stupňů. Používají se jednostupňové, dvoustupňové, popřípadě vícestupňové metody. Při jednostupňovém procesu nedochází k oddělování procesních fází fermentace, všechny probíhají v jedné nádrži. Tato metoda je nejčastěji využívána u zemědělských bioplynových stanic.

1.2.3.1 Druh dávkování

Podle dávkování surového materiálu rozlišujeme dávkování kontinuální, diskontinuální a semikontinuální.

Diskontinuální

Dávkování diskontinuální neboli s přerušovaným provozem, či cyklické se používá především u suché fermentace. Doba jednoho pracovního cyklu odpovídá době zdržení materiálu ve fermentoru.

Biofermentor je kompletně zaplněn substrátem a vzduchotěsně uzavřen. Bez jakékoliv další manipulace je držen až do konce zvolené doby prodlevy, po jejímž uplynutí je většina obsahu vyměněna čerstvým substrátem.

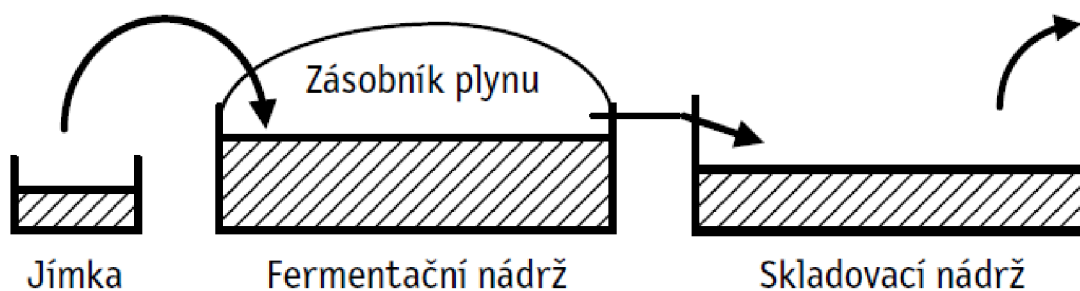
Semikontinuální

Do reaktoru jsou dodávány dávky substrátu několikrát denně (zhruba 4krát, ale i vícekrát za den) – doba mezi jednotlivými dávkami je kratší než doba zdržení materiálu ve fermentoru. Objem několika jednotlivých dávek tak dá dohromady denní vsázku. Proces dávkování není náročný na obsluhu a je často automatizován. Semikontinuální dávkování se dále dělí na průtokovou a zásobníkovou metodu.

Průtoková metoda

Tato metoda je u bioplynových stanic nejpoužívanější. Ze zásobníku nebo jímky je substrát pumpován několikrát denně do fermentační nádrže. Stejně množství, jaké je do fermentoru dodáno, je zároveň odstraněno a uskladněno v nádrži na fermentační zbytky.

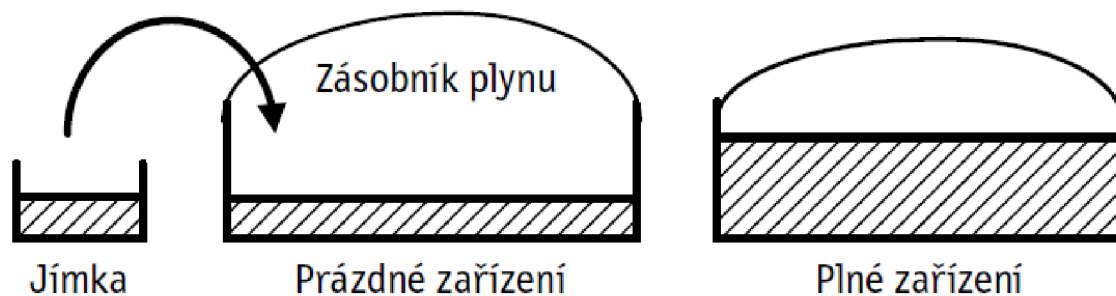
Fermentor takto pracuje neustále a vyprazdňuje se jen kvůli opravným pracím. Tato metoda se vyznačuje stejnou produkcí plynu a dobrým využitím prostoru pro hnití.



Obr. 2 Průtoková metoda [13]

Zásobníková metoda

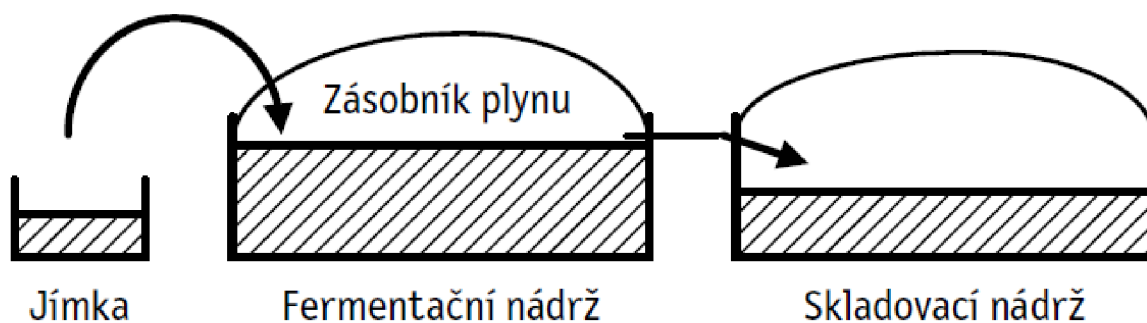
Fermentační zařízení slouží zároveň jako fermentor i uskladňovací nádrž. Zařízení se postupně plní substrátem až do plného objemu a poté je záraz vyprázdněna až na základní množství substrátu nutného pro zachování procesu. Poté se celý proces opakuje. Zásobníková metoda má méně rovnoměrnou výrobu plynu a není příliš využívána.



Obr. 3 Zásobníková metoda [13]

Kombinovaná průtokově – zásobníková metoda

Kombinovaná metoda používá průtokový fermentor, který dodává fermentační zbytek do uzavřené skladovací nádrže – po vzoru zásobníkové metody.



Obr. 4 Kombinovaná metoda [13]

Kontinuální

Pro fermentory, které zpracovávají tekuté organické odpady s velmi malým obsahem sušiny.

1.3 Mokrý anaerobní fermentace

Hlavní rozdíl mezi suchou a mokrou fermentací je obsah sušiny ve zpracovávané hmotě.

U mokré fermentace se obsah sušiny pohybuje mezi 8 – 14 % a v zemědělství zpracovává převážně kejdu a kukuřičnou siláž. V ČR i celosvětově má oproti suché fermentaci dominantní postavení. Suchá fermentace se používá při obsahu sušiny nad 20%.

Abychom u procesu dosáhli pozitivní energetické bilance (nemusel se proces udržovat na provozní teplotě jen díky dodávání energie z externího zdroje) musí být obsah sušiny větší než zhruba 4%. Horní hranicí je pak pro tekutý odpad mez čerpatelnosti materiálu. Absolutní mez pro existenci anaerobní fermentace je obsah sušiny 50%.

Mokrá anaerobní fermentace probíhá v uzavřených velkoobjemových nádobách – fermentorech. Tyto nádoby jsou zahřívány na vybranou provozní teplotu (většinou termofilní) a míchány.

Celý proces probíhá ve 4 základních technologických celcích: Příjmový systém biomasy, fermentační systém, využívání bioplynu a uskladnění/další využití fermentátu.

Biomasa je do fermentoru čerpána v tekutém stavu. V příjmové části systému se substrát připravuje na další proces. Může zde probíhat například úprava velikosti částic, míchání, homogenizace, předehřev materiálu, ředění vodou, separace hrubých příměsí apod.

Reaktorů se používají různé druhy, hlavní dva jsou:

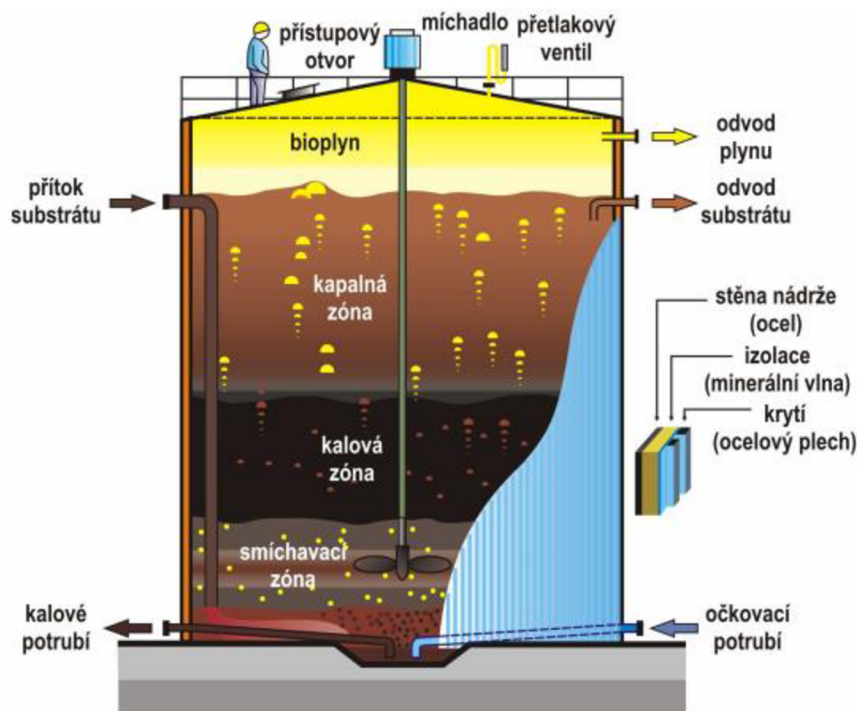
Reaktory s pístovým tokem

V reaktorech s pístovým tokem zůstává každá částice vstupního substrátu v reakční směsi konstantní dobu. V ležatých nebo stojících reaktorech s menším průměrem se využívá výtlačný efekt přiváděného čerstvého substrátu. Proměšování je většinou zajišťováno další konstrukcí.

Jsou vhodné pro substráty s vyšším obsahem sušiny (stále čerpatelné).

Reaktory směšovací

Tyto fermentory mají nejčastěji cylindrickou, stojatou formu a jsou plně míchané. Skládají se z nádrže s betonovým dnem a ocelovými zdmi a mohou být částečně zapuštěny v zemi či naopak zcela nad zemí. Dají se, po udělení odpovídajících přestaveb, postavit ze standardních skladů kejdy. Jsou vhodné pro čerpatelné substráty s malým obsahem sušiny. Mezi hlavní přednosti patří možnost proměnného provozu nebo možnost opravy dopravního i míchacího zařízení bez nutnosti vyprázdnit fermentor. Nejvhodnější jsou u nádrží s malým či středním průměrem, u velkopřůměrových nádrží je obtížné a nákladné jejich zastřešení.



Obr. 5 Směšovací reaktor

Další dělení reaktorů může být podle tvaru:

Laguna

Nejjednodušší zařízení s velmi malou intenzitou výroby metanu.

Reaktory pravoúhlé hranolovité

V podobě žlabu či zakryté jímky hranolovitého tvaru

Válcové reaktory

V závislosti na objemu se používají válcové reaktory s horizontální osou válce (do 150 m³) nebo vertikální osou válce. Válcový tvar je nejpoužívanější.

Kulové nebo polokulové reaktory

Polokulový tvar se často používá pro primitivní podzemní reaktory.

Po reaktoru následuje v systému takzvaná bioplynová koncovka, která obsahuje potrubí na dopravu bioplynu, bezpečnostní zařízení proti zpětnému zahoření plynu, dmychadlo, zásobník, zařízení na úpravu bioplynu a další. Nakonec je zde zařízení na konečné využití vytvořeného bioplynu.

Ukladňovací systém slouží k uchování fermentačního zbytku do doby jeho dalšího použití. Liší se v závislosti na obsahu sušiny ve fermentátu.

1.4 Suchá anaerobní fermentace

Stanice na suchou anaerobní fermentaci se od mokré bioplynové stanice liší především obsahem sušiny ve zpracovávané biomase (20 – 50 %) a způsobem manipulace. Bioplynových stanic na suchou fermentaci je v české republice minimum. První stanice tohoto typu byla vystavena

dokonce až v roce 2009. Suchá fermentace byla (a stále částečně je) dlouho ve stavu výzkumu z důvodu hledání nejvýhodnějšího způsobu jejího provozování.

Mezi biomasu zpracovatelnou suchou fermentací patří například kukuřičná siláž, senáž, travní zeleň, listí či odpady jako BRKO (biologicky rozložitelné komunální odpady), bioodpady, tuky a další.

Ve většině případů probíhá suchá fermentace za mezofilních teplot okolo 32 – 38 °C a vyšších a pH mezi 6,5 – 7,5. Výhodou je, že dodávaný substrát se nemusí předem nijak upravovat.

Bioplynová stanice je tvořena několika budovami. Hlavní budova je hala s několika fermentory. Dále manipulační hala s technologickou míchárnou, perkolátní nádrže, budova s velínem a kogenerační jednotkou a další místa závislé na každé stanici.

Na rozdíl od mokré fermentace, kde je biomasa do fermentoru čerpána, je substrát do fermentoru navážen v sypkém stavu nakladači (či jinou běžnou manipulační technikou).

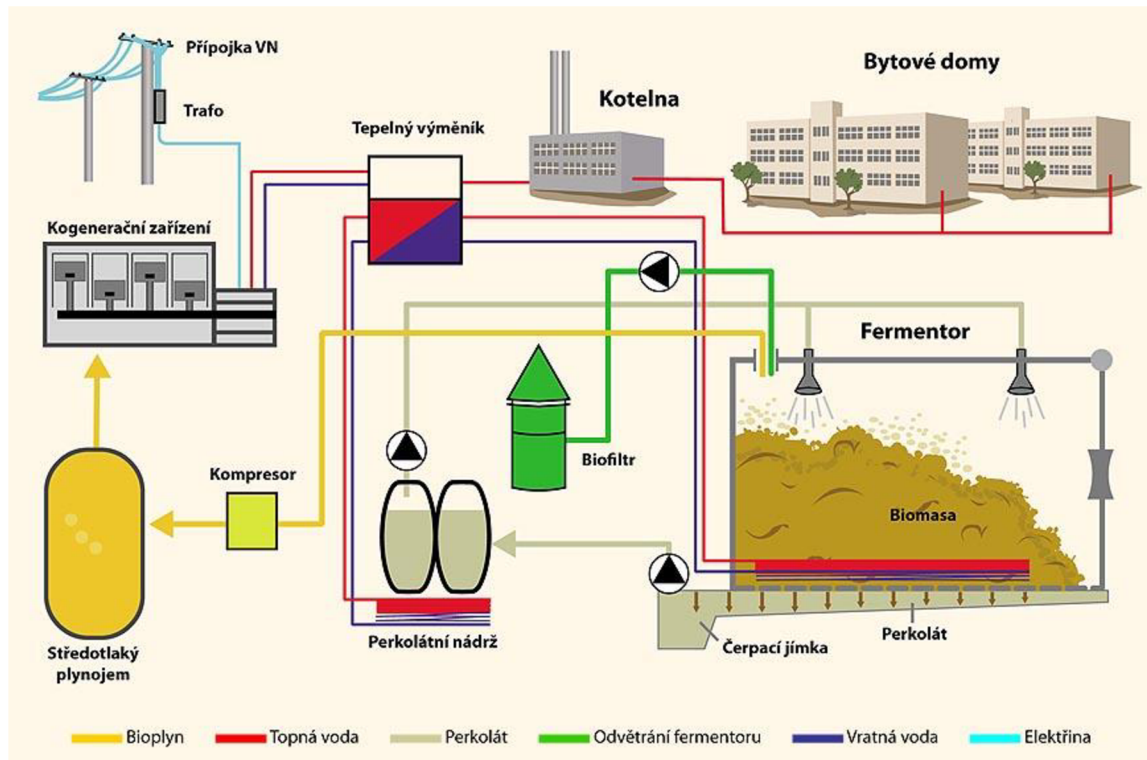
Po naplnění fermentoru jsou uzavřena plynotěsná vrata. Ihned poté se začíná uvolňovat bioplyn, který je odsáván do bioplynových vaků nad fermentory. Důležitou částí suché fermentace je používání takzvaného perkolátu. Perkolát je kapalina, která se z biomasy uvolňuje během fermentace a na podlaze fermentorů se chytá do kanálků, ze kterých je odváděna do speciální nádrže a následně se stříká tryskami ve stropech zpět na biomasu. Biomasa je vyhřívána podlahovým topením a postříkována právě perkolátem, který také obnovuje mikrobiální kulturu na povrchu biomasy. Ke stabilizování (vyprázdnění, znovunaplnění a start nové reakce) celého anaerobního procesu dojde do tří dnů. Proces suché fermentace je diskontinuální s délkou cyklu mezi 21 – 28 dny (v závislosti na firmě stavící stanici) po této době se celý fermentor vyprázdní a znovu naplní. Většina stanic pracuje s více fermentory, aby tím dosáhla kontinuity procesu.

Vzniklý bioplyn je ve většině případů ihned využit v kogenerační jednotce na výrobu elektrické energie a tepla. Všechno odpadní teplo je znovuvyužito během procesu. Konečný fermentát je po ukončení procesu uskladněn pro další použití. Část se používá jako hnojivo v zemědělství, nebo jako palivo, ovšem větší část najde opětovné užití ve fermentačním procesu. Tento díl částečně vyfermentované biomasy je použit znovu smícháním s čerstvou biomasou.

Přidávání části fermentačního zbytku a vstřikování perkolátu se říká inokulace neboli očkování.

Celý provoz je, kromě navážení biomasy, plně automatizován. Řídící jednotka monitoruje každou část procesu a umožňuje potřebné usměrňování procesu.

Podle druhu výstavby se biofermentory dělí na výstavbové (staví se nové od základů) a vestavbové, které se instalují do již postavených objektů jako kravíny, sklady apod., čímž se ušetří spousta nákladů.



Obr. 6 Schéma bioplynové stanice na suchou fermentaci [8]

1.5 Porovnání technologií suché a mokré fermentace

Jako shrnutí popisu dvou výše zmíněných technologií mohou sloužit společné a rozdílné rysy a dále výhody a nevýhody každé z technologií.

Společné rysy

Hlavní věc, kterou mají oba způsoby společné je princip samotné anaerobní fermentace, při které se biologicky rozložitelný substrát rozkládá pomocí mikroorganismů za nepřístupu vzduchu na bioplyn a fermentační zbytek.

Dalšími společnými prvky jsou způsoby nakládání s bioplynem a fermentačními zbytky a způsoby provádění samotné fermentace (zahřátí na určitou teplotu, důležitý stav pH a dalších údajů aj.)

Rozdílné rysy

Mokrá fermentace:

- Obsah sušiny kolem 12 %
- Plnění fermentoru čerpadly
- Semikontinuální nebo kontinuální proces
- Obvyklé míchání biomasy během procesu
- Mnohem rozšířenější způsob – tisíce stanic po celém světě a desítky v ČR a od toho se odvíjející zkušenosti s touto metodou

Suchá fermentace:

- Obsah sušiny od 20 do 50 %
- Navážení substrátu do fermentoru nakladači
- V principu diskontinuální proces
- Garážové či kontejnerové fermentory s vraty

Biomasa se v průběhu nemíchá

V ČR jsou zatím pouze dvě suché biostanice a celosvětově jich je jen několik desítek. S touto technologií ještě nejsou tak velké zkušenosti.

Výhody a nevýhody mokré fermentace

Historicky rozšířenější a prověřená metoda, z čehož vyplývá současné širší uplatnění.

Z dosavadních zkušeností se zdá, že na výrobu stejného objemu bioplynu jsou u suché fermentace potřebné větší reakční objemy.

Využívá bohatší příslušenství, jako míchadla, čerpadla, drtiče aj. což zvyšuje provozní náklady a četnosti poruch.

Výhody a nevýhody suché fermentace

Bioplynová stanice na suchou fermentaci má rychlý start (do tří dnů), nižší spotřebu el. energie i tepla, snazší systém výstavby, širší spektrum zpracované biomasy (možnost zpracování odpadu který v mokré zpracovat nejde, jako nedokonale vytríděné bioodpady či podestýlky na bázi pilin).

Suchý způsob byl původně navržen pro zpracování komunálních bioodpadů, ale mnohem větší využití si v ČR najde pravděpodobně v zemědělství. Doposud je to však málo využívaný způsob, u kterého chybí větší zkušenosti. Podle nově nabývaných informací ze současných provozů i výzkumu se však zdá, že má suchá fermentace veliký potenciál a skrývá se v ní budoucnost anaerobní fermentace.

1.6 Příklady bioplynových stanic

V této části jsou uvedeny parametry několika bioplynových stanic z ČR.

BPS na suchou fermentaci Žďár nad Sázavou:

Počet fermentorů:	7
Rozměry jednoho fermentoru:	7m x 30m x 5m
Objem fermentoru:	1050 m ³
Vsázka do fermentoru:	max. 800 m ³
Výron bioplynu za hodinu:	30-50m ³ /hod



*Obr. 7 Bioplynová stanice na zpracování biologicky rozložitelných odpadů
Žďár nad Sázavou [16]*



Obr. 8 Fermentační plynotěsné komory [16]



Obr. 9 Nakládání vsázky [16]

BPS na suchou fermentaci Šumperk – Temenice:

Počet fermentorů:	6
Objem jednoho fermentoru:	5,7m x 35m x 4,7m (938 m ³)
Roční spotřeba biomasy:	13 280 t
Instalovaný el. výkon:	526 kW
Instalovaný tepelný výkon:	548 kW



Obr. 10 Komunální bioplynová stanice Šumperk – Temenice [14]



Obr. 11 Fermentační komory [14]

BPS na mokrou fermentaci Stonava:

Instalovaný el. výkon:	500 kW
Počet fermentorů:	3
Rozměry jednoho fermentoru:	průměr 18 m; výška 7,3 m
Výron bioplynu za den:	74 m ³ /den



Obr. 12 Bioplynová stanice Stonava [17]

2 CHARAKTERISTIKA ZBYTKOVÉHO MATERIÁLU

2.1 Rozdělení digestátů

Zbytek po anaerobní fermentaci, neboli digestát, který můžeme dále rozložit na separát – oddělenou tuhou část a fugát – oddělenou kapalnou část z digestátu, se dá dělit dle různých hledisek.

Digestát můžeme dělit podle vstupních surovin, ze kterých vzniká, podle způsobu jeho použití nebo podle obsahu sušiny. Rozdělení podle obsahu sušiny ještě není zákonem stanoveno, připravuje se novela vyhlášky č. 474/2000 sb., o stanovení požadavků na hnojiva, kde by se mohlo objevit dělení digestátů podle obsahu sušiny s ohledem na limitní množství rizikových prvků ve fermentačním zbytku. I bez tohoto ustanovení však můžeme pro vlastní potřebu dělit digestát podle obsahu sušiny, jehož množství závisí na obsahu sušiny v původní zpracovávané biomase (viz předchozí kapitola).

2.1.1 Rozdělení podle použitých vstupních surovin

Bioplynové stanice (BPS) zpracovávají celou řadu různých vstupních materiálů, např. hnůj, kejdu, rostlinné suroviny, biomasu, kaly, BRO (biologicky rozložitelný odpad) a VŽP (vedlejší živočišné produkty). Rozdělování zbytkového materiálu právě podle vstupních surovin je proto hlavní způsob rozdělení. Ministerstvo životního prostředí klade specifické požadavky na nakládání s digestátem právě podle jeho složení. Podle vstupních surovin se digestát dělí na 3 hlavní skupiny:

Digestáty z BPS (bioplynových stanic), kde vstupními surovinami jsou statková hnojiva a materiály rostlinného charakteru

Do této kategorie patří BPS, které zpracovávají například kukuřičnou siláž, travní zeleň, senáž, bramborovou nať a další materiály rostlinného charakteru, nebo statková hnojiva. Nespádají sem žádné odpady ani vedlejší živočišné produkty.

Pro digestát z kofermentace materiálu rostlinného charakteru a hnoje jsou dále stanoveny hygienické požadavky v průběhu nebo ihned po zpracování. Patří sem převážně testování digestátu na škodlivé bakterie.

Digestáty, kde jednou ze vstupních surovin jsou odpady

Do této kategorie spadá digestát, který mohl mít za vstupní suroviny statková hnojiva a materiály rostlinného charakteru stejného typu jako digestát kategorie předchozí, ale může vznikat i z bioodpadů. Mezi tyto bioodpady se počítají například: různé druhy kalů, odpady rostlinných pletiv, odpady ze zemědělství, zahradnictví, lesnictví aj., zvířecí trus, moč a hnůj a další.

Bioplynové stanice zpracovávající tento druh vstupního materiálu musí mít ke svému provozu schválení Kraje. Do zvláštní kategorie dále patří BPS, zpracovávající odpad z čističek odpadních vod (ČOV), ve kterých vzniká stabilizovaný kal. V těchto BPS není možno zpracovávat jiný vstupní materiál.

Digestáty, kde jednou ze vstupních surovin jsou VŽP

Pro tyto digestáty platí podobná zákonitost, jako pro předchozí kategorii. Místo klasických odpadů však BPS, ve kterých vznikají tyto digestáty zpracovávají vedlejší živočišné produkty. Mezi věci, které může tato BPS zpracovávat, patří například: jateční odpady, zmetkové potraviny, mléko, mlezivo, masokostní moučka aj.

Tyto BPS musí mít speciální schválení od Krajské veterinární správy a splňovat zvláštní hygienické podmínky, například: být vybaveny pasterizačně/hygienickými jednotkami, mít prostory k čištění dopravních prostředků a přepravních nádob a být vybavena vlastní kontrolní laboratoří nebo využívat laboratoř externí. Dále zde platí hygienické podmínky podobné předchozím kategoriím, tj. hodnocení znečištění bakteriemi a další [18].

2.1.2 Rozdělení digestátů dle možnosti použití

Použití digestátu vzniklého anaerobní fermentací je různé. O tom jaké bude má většinou provozovatel BPS jasno ještě před zprovozněním samotné BPS. Mezi tradiční a nejvíce používané způsoby patří využití fermentačního zbytku jako organického hnojiva na zemědělskou půdu (některé zdroje ho uvádějí jako velmi dobré organické hnojivo, jiné jako slabší minerální hnojivo), rekultivačního materiálu (např. na skládkách odpadů) nebo jeho další zpracování v kompostárnách za účelem výroby kompostu. Pokud je digestát použit jako hnojivo, musí obsahovat minimálně 25% spalitelných látek a 0,6% dusíku. Tento digestát pochází převážně ze statkových hnojiv.

Mezi, v současné době, méně využívané způsoby patří další zpracování pro energetické účely pomocí spalování nebo zplyňování, kterým se zabývá další část této práce.

2.2 Složení digestátu

Složení digestátu je závislé na vstupním materiálu. Má oproti němu nižší množství živin a organických látek, nižší poměr C:N (10:1) a obsahuje větší množství účinného amoniaku (NH_4^+)

2.2.1 Zbytek po mokré fermentaci

Obecně se dá říct, že zbytek po mokré fermentaci je tekutý s obsahem sušiny mezi 6-10%. Odstředováním z něj lze dále získat kapalinu (fugát) s obsahem sušiny okolo 1% a tuhý separát s obsahem sušiny okolo 30%. Při tomto obsahu sušiny hoří separát velmi špatně a termické zpracování proto není možné (Obsah sušiny digestátu vhodného pro termické zpracování by měl být většinou nad 50%). Z tohoto důvodu se přistupuje ke spolu-spalování separátu s látkami s vyšším kalorickým obsahem, jako je

uhlí, komunální odpad a další, nebo k použití podpůrného paliva. Další možností je následné předsoušení, odvodňování či jiné zpracování.

Z důvodu nedostatku detailních informací o zbytku po anaerobní fermentaci z BPS, uvedu v následujícím textu rozbor kalu z čističky odpadních vod, který je v tomto ohledu se zbytkem z BPS velice podobný, protože zde také dochází ke zpracování mokrou anaerobní fermentací.

Během čistícího procesu v ČOV vzniká kal s převládajícím obsahem organických látek, tzv. hnilobný kal. Tento surový kal se dále zpracovává nejčastěji právě anaerobně za vzniku bioplynu a vyhnílého kalu (anaerobně stabilizovaného). Prostřednictvím odstředivek nebo pásových lisů se u kalu snižuje obsah vody na cca 70 – 80 %.

Vyhnilý kal obsahuje kolem 50% organických látek a asi o 40% méně sušiny než původní kal surový. Organická část kalu se skládá převážně z bílkovin, tuků, oleje a uhlovodanů. Může obsahovat i toxické látky a pesticidy. V anorganické části kalu jsou sloučeniny křemíku, železa, vápníku, hořčíku, aj. Dále kal může obsahovat patogenní organismy jako salmonelu či zárodky virových onemocnění, aj.

V následujících tabulkách je uveden příklad rozboru vysušeného vyhnílého kalu.

Popel [%]	Hořlavina [%]	Síra [%]	Spalné teplo [MJ/kg]	Výhřevnost [MJ/kg]	Prchavá hořlavina [%]	Neprchavý zbytek [%]
49,92	50,08	1,38	11,46	10,66	43,74	6,35

Tab. 1 Palivové vlastnosti vysušeného vyhnílého kalu [19]

H [%]	C [%]	S [%]	N [%]	O [%]
7,37	53,7	2,32	6,79	29,82

Tab. 2 Elementární rozbor hořlaviny [19]

Další rozbor pochází z Německa a kromě rozboru odpadního kalu jej porovnává s černým a hnědým uhlím.

	Kal	Černé uhlí	Hnědé uhlí
Prchavá hořlavina [%]	46	34,7	49,4
Popel [%]	47,2	8,3	5
Neprchavý zbytek [%]	6,8	57,1	45,9
Výhřevnost [MJ/kg]	11,3	30,2	25,6
C [%]	27,5	72,5	67
H [%]	3,8	5,6	4,9
N [%]	3,3	1,3	0,7
S [%]	1,4	0,9	0,4
Cl [%]	0,14	0,16	0,1
O [%]	16,8	11,2	21,9

Tab. 3 Porovnání rozboru kalu s černým a hnědým uhlím [28]

Podobné výsledky zaznamenal i rozbor z ČR. V následující tabulce také srovnává usušený kal s hnědým uhlím ze Severočeského hnědouhelného revíru.

	Vysušený kal z ČOV	Hnědé uhlí
Obsah vody [%]	2 – 10	11 – 15
Popel [%]	20 – 30	4
Těkavé látky [%]	20 – 50	42 – 44
Výhřevnost [MJ/kg]	8 - 12	21,2
C [%]	20 - 30	56 – 58,8
H [%]	1,5 – 5	4,2 – 4,3
O [%]	8 – 16	20 – 21
N [%]	1 – 5	0,6 – 0,7
S [%]	1 - 2	0,35

Tab. 4 Rozbor kalu a porovnáním s hnědým uhlím z ČR [29]

Z výše uvedených rozborů můžeme vidět, že kal je s hnědým uhlím relativně srovnatelný. Největší shoda je u elementárních prvků, zato největší rozdíl je v obsahu popela.

2.2.2 Zbytek po suché fermentaci

Všeobecně má zbytek po suché fermentaci větší obsah sušiny a k dalšímu tepelnému zpracování je tedy vhodnější než zbytek po mokré fermentaci. Zásady pro další zpracování, nedosahuje-li potřebného obsahu sušiny, platí stejně jako u mokré fermentace.

V následující části je v tabulkách uvedený detailní rozbor paliva (prvková analýza) vzniklého po anaerobní suché fermentaci. Rozbor byl proveden u původního vzorku, odvodněného vzorku a hořlaviny.



Obr. 13 Fotografie suchého paliva [27]

Popis vzorku	W_t^r [%]	A^r [%]	h^r [%]	V^r [%]	Q_s^r [MJ/kg]	Q_i^r [MJ/kg]
	Voda veškerá	Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Spalné teplo	Výhřevnost
	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)
zbytek po fermentaci	70,46	13,41	16,13	12,39	3,37	1,42
Popis vzorku	C^r [%]	H^r [%]	N^r [%]	O^r [%]	S^r [%]	
	Uhlík	Vodík	Dusík	Kyslík	Síra	
	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	(původní vzorek)	
zbytek po fermentaci	8,99	1,02	0,69	5,32	0,10	

Tab. 5 Složení původního vzorku [27]

Popis vzorku	A^d [%]	h^d [%]	V^d [%]	Q_s^d [MJ/kg]	Q_i^d [MJ/kg]
	Popel	Hořlavina	Prchavá hořlavina	Spalné teplo	Výhřevnost
	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)
zbytek po fermentaci	45,39	54,61	41,95	11,39	10,64
Popis vzorku	C^d [%]	H^d [%]	N^d [%]	O^d [%]	S^d [%]
	Uhlík	Vodík	Dusík	Kyslík	Síra
	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)	(bezvodý vzorek)
zbytek po fermentaci	30,44	3,45	2,35	18,02	0,35

Tab. 6 Složení odvodněného vzorku [27]

Popis vzorku	V^{daf} [%]	Q_s^{daf} [MJ/kg]	Q_i^{daf} [MJ/kg]	C^{daf} [%]
	Prchavá hořlavina	Spalné teplo	Výhřevnost	Uhlík
	(hořlavina)	(hořlavina)	(hořlavina)	(hořlavina)
zbytek po fermentaci	76,81	20,86	19,49	55,74
Popis vzorku	H^{daf} [%]	N^{daf} [%]	O^{daf} [%]	S^{daf} [%]
	Vodík	Dusík	Kyslík	Síra
	(hořlavina)	(hořlavina)	(hořlavina)	(hořlavina)
zbytek po fermentaci	6,33	4,31	32,99	0,63

Tab. 7 Složení hořlaviny [27]

3 ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ZBYTKOVÉHO MATERIÁLU PO ANAEROBNÍ FERMENTACI

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, výstupem po anaerobní fermentaci je, kromě bioplynu, také fermentační zbytek – digestát. Ten se doposud ponejvíce používal jako hnojivo v zemědělství. V posledních letech se však objevil nový způsob zpracování zbytkového materiálu, a tím je jeho termické zpracování. Tento, zatím méně používaný, způsob zpracování je částečně stále ve fázi výzkumu, kdy se zjišťuje ideální způsob energetického zpracování fermentačního zbytku, s co největším výnosem. V následující části popisují právě tento způsob zpracování fermentačního zbytku.

3.1 Spalování fermentačního zbytku

Fakt o malém poměru spalování nebo dalšího zpracování digestátu oproti přímé aplikaci v zemědělství nebo skládkování vypovídá následující tabulka zpracování kalů z ČOV. Můžeme však vidět, že využití spalování neustále stoupá a dá se předpokládat, že tento trend bude pokračovat. I přes to však využití této metody v roce 2009 nepřesahovalo ani 2%.

Rok	Celková produkce kalů [t]	Způsob využití a odstranění kalů [t]				
		Přímá aplikace a rekultivace	Kompostování	Skládkování	Spalování	Jiný zp.
2005	171 888	34 467	88 820	12 027	20	36 554
2006	175 471	48 304	89 932	13 979	27	23 229
2007	172 303	55 349	80 393	8 536	47	27 979
2008	175 708	46 776	78 289	11 986	712	37 945
2009	168 164	42 442	80 727	5 931	2 179	36 885

Tab. 8 Produkce kalů z ČOV a způsob jejich zneškodnění v [t] sušiny [24]

Hlavní rozdíl mezi fermentačním zbytkem ze suché a mokré fermentace je množství sušiny, které obsahuje. Digestát a následný separát vzniklý po suché fermentaci není tak náročný na sušení a další úpravu jako zbytek po fermentaci mokré. Po dosažení potřebné suchosti jsou již materiály obdobné.

Kromě bioplynových stanic používají mokrou fermentaci i ČOV a kal, který je zde výsledným zbytkem se také může zpracovávat termicky. Spalování kalu je popsáno v následujících částech.



Obr. 14 Graf kalorického obsahu vyhnilého kalu [19]

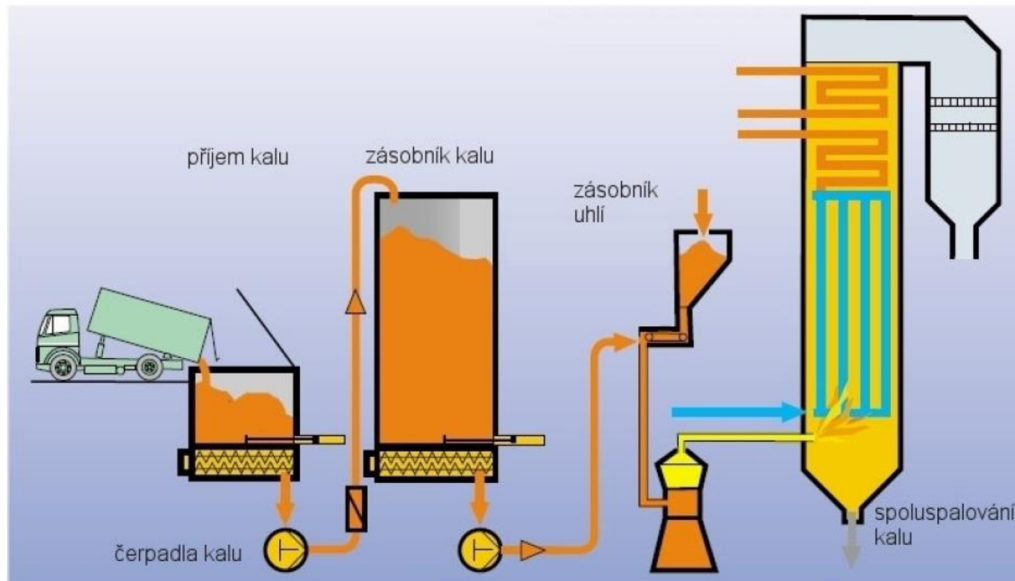
Způsoby termického zpracování odvodněného fermentačního zbytku můžeme dělit do tří hlavních skupin. Spalování (dále děleno například podle použitého typu pece), spolu-spalování (například s uhlím, odpady nebo jiným palivem) a alternativní procesy kam patří například pyrolýza nebo zplyňování.

3.1.1 Spolu-spalování kalů v teplárnách a elektrárnách

Z investičního hlediska nejvýhodnější metoda. Vyřešit se u ní musí jen přeprava, meziuložení apod.

Kal u této metody stačí odvodnit na cca 25% obsahu sušiny přímo v ČOV a v místě spalování již není potřeba budovat další zařízení pro sušení či granulování. Spolu-spalování je v těchto zařízeních prováděno s uhlím a kal se přidává v poměru 1 – 5% spotřeby uhlí. Používání takto malého množství nesnižuje teplotu hoření a neovlivňuje produkty spalování.

U tohoto typu spalování se musí hlídat především obsah rtuti, kvalita popílku a ostatní emisní limity.



Obr. 15 Schéma spolu-spalování kalů v elektrárnách [19]

3.1.2 Spolu-spalování kalů ve spalovnách komunálního odpadu

Princip spalování ve spalovnách komunálního odpadu je obdobný se spalováním v teplárnách a elektrárnách. Podobně jako u nich nejsou investiční náklady většinou vysoké. Rozdíl je převážně ve vysušenosti vstupního kalu. Kal o obsahu sušiny kolem 20% by zde narušoval proces hoření odpadu a čištění spalin a proto se většinou kal předsušuje na zhruba 60%, což je hodnota podobná obsahu sušiny odpadu. U zcela vysušeného kalu je důležité kvalitní míchání nebo jiné opatření, aby se zabránilo nebezpečí výbuchu. Pokud omezíme poměr kalu a odpadu do 1:4 je možné kal přivádět i v zahuštěném tekutém stavu. Ve fluidních spalovnách odpadu lze odvodněný kal spalovat až do obsahu 80% hmotnosti vsázky bez přídavného paliva.

Roštový kotel

Jedním z typických zástupců kotlů na tuhá paliva je roštový kotel. Ten se dá použít na spalování fermentačního zbytku, zvláště po jeho zpracování do podoby briket či pelet.

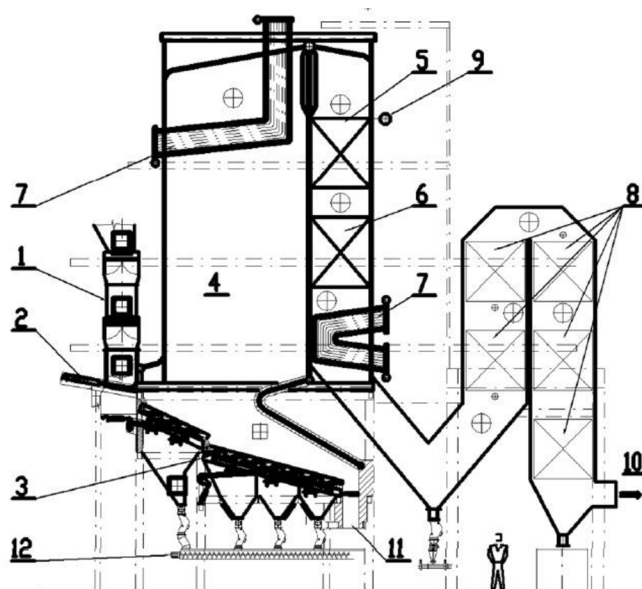
Roštové kotle se začaly používat pro spalování tradičních paliv jako je uhlí, v současné době se však staví zejména pro spalování biomasy a komunálních či průmyslových odpadů.

V roštovém kotli je palivo přiváděno na ohniště (rošt) ze zásobníku. Na ohništi probíhá spalování. Po spálení se z kotle odvádí přehřátá pára, spaliny a pevný zbytek (škvára).

Palivo prochází na roštu čtyřmi hlavními fázemi. Nejprve dojde k jeho sušení, při kterém se z něj vypuzuje povrchová voda. Poté se odplyňuje – uvolňuje se z něj prchavá hořlavina (asi při 250 °C). Následně začne prchavá hořlavina hořet a zapálí se tuhá část hořlaviny. V poslední fázi dohoří tuhá fáze. Část tepla, nazývaná se poměrné vzněcovací teplo, se musí vrátit zpátky do reakce, aby mohly všechny fáze znovu dokonale proběhnout.

Pro biomasu je typický větší obsah prchavé hořlaviny, pro nějž se používá typ kotle s dvěma ohnisky hoření. Maximální teploty se zde pohybují od 1000 – 1300 °C. Konstrukce se oproti konstrukci s jedním ohniskem liší větší výškou – ohniště je seškrčené, aby se lépe míchala prchavá hořlavina se vzduchem.

Podle způsobu přemísťování paliva v ohništi rozlišujeme 3 hlavní typy roštů: rošty s nehybnou vrstvou paliva (pevné rošty), rošty s občasným přemísťováním paliva (stupňové a přesuvné rošty) a rošty s trvalým posuvem paliva (pásové a řetězové). [30]



Obr. 16 Roštový kotel firmy Invelt; 1- vstup paliva, 2- podavač paliva, 3- rošt, 4- spalovací komora, 5 a 6- výstupní/ vstupní díl přehříváku páry, 7- šoty výparníku, 8- bloky ekonomizéru, 9- výstup přehřáté páry, 10- výstup spalin z kotle, 11- výstup škváry z kotle, 12- zařízení pro odvod popílku [31]

3.1.3 Spalování ve speciálních spalovnách odvodněného kalu

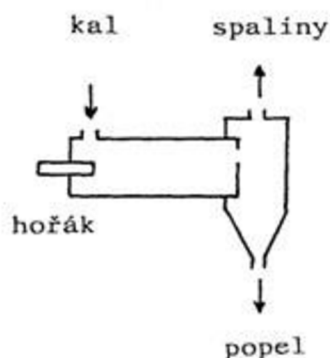
Při specializovaném spalování kalů z ČOV jsou v současnosti nejpoužívanější rotační, fluidní a etážové pece.

Rotační pec

Používají se hlavně při spalování průmyslových kalů. Pec je složená z vodorovného, žáruvzdorného, pomalu se otáčejícího bubnu z ocelového plechu a hořáku olejového nebo plynového topení, kterým se případně přivádí přídavné palivo. Z jedné (vstupní) strany bubnu je přiváděn kal a vzduch, z druhé (výstupní) jsou odváděny spaliny. Dále systém obsahuje zpravidla komoru dodatečného tepelného zpracování, kde zpracovávají nedokonale spálené zbytky a těkavé podíly kalů.

Výhodou těchto pecí je dobré mísení odpadů a prokysličení díky otáčení pece. Změnou otáček se dá celý proces regulovat podle potřeby určité vsázky.

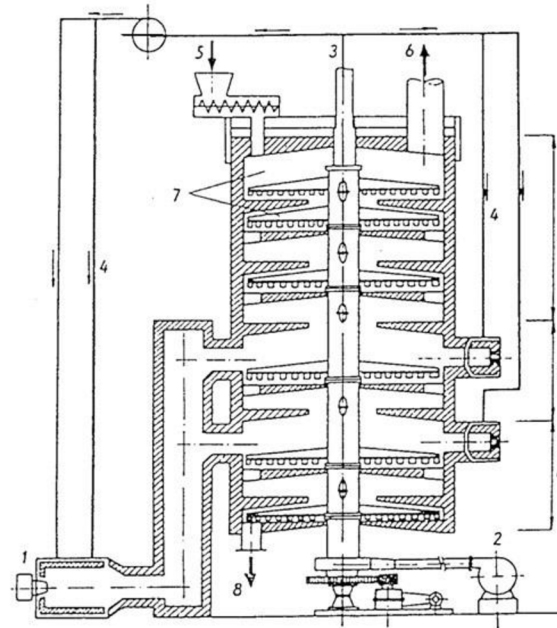
ROTAČNÍ TOPENIŠTĚ



Obr. 17 Schéma rotační pece [21]

Rotační etážová pec

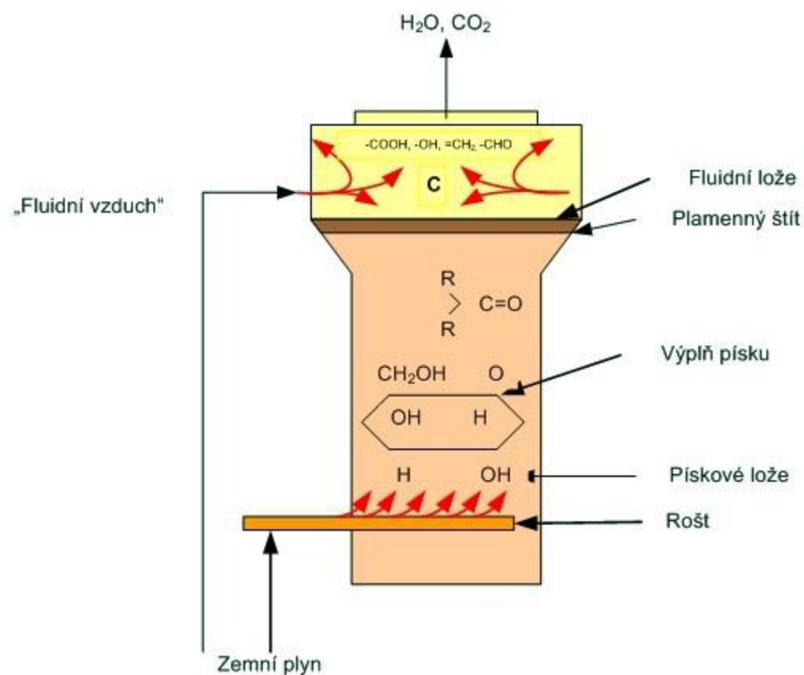
Podobný princip jako u klasické rotační pece. Jedná se o několik propojených válcových topenišť poskládaných nad sebou ve svislé poloze. Osou celého zařízení vede hřídel opatřená lopatkami, které vedou do jednotlivých etáží. Kal je přiváděn do pece shora a otáčením lopatek je shrnován otvory v jednotlivých etážích do nižších pater. Kal jednotlivými etážemi prochází spirálovitým způsobem od obvodu ke středu v jednom patře a od středu k obvodu v patře následujícím. Proudění vzduchu se může stavět jak po proudu toku tak protiproudě. Vzduch podporuje samotný proces spalování a také udržuje teplotu nad potřebnými 600°C. Součástí systému bývá i zde navazující komora pro dodatečné zpracování.



Obr. 18 Schéma rotační etážové pece [21]

Fluidní pec

Fluidní pec má obvykle tvar válce situovaného svisle. Ve spodu pece je, kromě hořáku pro případ dodávání přídatného paliva, umístěn tryskový nebo keramický rošt. Na něm je umístěno fluidní lože tvořeno vrstvou křemičitého písku. Přiváděný vzduch tento písek rozvíří v topeništi a ve vzniklém mraku probíhá spalování rozprašovaného kalu. Tento způsob vyžadují velmi dobré vysušení kalu, aby bylo možné jej dostatečně jemně rozprašovat. Kal je odvedený do horní části pece, která často funguje i jako komora pro dodatečné zpracování.



Obr. 19 Schéma fluidní pece [21]

Fluidní pec kombinovaná s etážovou sušárnou

V těchto pecích se používá kal odvodněný a následně zpracovaný na soudržnou pastovitou hmotu. Poté je z kalového zásobníku dávkován do etážové pece. Kal je rozdrobován na první patro etážové pece a shrnován do dalších částí a přitom je sušen procházejícími spalinami. Z poslední části padá vysušený kal do fluidní vrstvy, kde proběhne jeho spalování. Na konci systému je opět dohořivací komora.

Mezi hlavní přednosti fluidních pecí patří:

- Téměř dokonalé spalování díky dobrému promíchání kalu a písku, díky kterému vznikne velká povrchová plocha.
- Rychlé a plynulé najíždění a odstavování
- Stabilita spalovacího procesu
- Dohořivací komora může být součástí hlavní pece (část nad fluidním ložem)

Naopak k negativním aspektům provozu můžeme zařadit například potřebu vyššího obsahu sušiny v kalu a nutnost účinného systému čištění spalin, které obsahují nebezpečné látky.

Spolu-spalování kalu v cementárnách

Jedna z novějších technologií, která je považována za ekologicky nejvýhodnější. Při této metodě se kaly spalují v rotačních pecích cementáren, což s sebou nese určité výhody:

- V důsledku vysoké teploty (nad 1000 °C) dochází k úplnému odstranění toxických organických látek
- Těžké kovy jsou vázány do cementářského slínku a nemohou být vyluhovány
- Nedochozí ke vzniku dalších kalových odpadů
- Snížení emisí CO₂

Obdobně jako při spolu-spalování v teplárnách a elektrárnách nahrazuje kal jen asi 5% původní vsázky. Musí být vysušen na velmi vysoký obsah sušiny, asi 95%.

3.1.4 Úprava zbytku do podoby standardizovaného paliva

Kromě výše zmíněných způsobů spalování vysušeného fermentačního zbytku prověřeného hlavně u kalů z ČOV se v současnosti zkouší další úpravy zbytkového materiálu na úroveň vhodnou pro spalování.

Pro zbytek po anaerobní fermentaci v bioplynových stanicích, který se nespaluje stejně jako kal z ČOV, se začala zkoumat možnost lisování do formy standardizovaného paliva, jako jsou pelety a brikety. Výsledky dvou různých testování těchto možností jsou v následujících odstavcích.

Testování briket

Separát se, i při výrobě tuhých paliv, může kombinovat s dalšími druhy biomasy, jako dřevní odpad, seno, sláma, nebo jiné záměrně pěstované energetické plodiny.

Při této zkoušce se testovaly vzorky separátu z vepřové kejdy, dřevěné piliny a separát z BPS na kukuřici v Rakouském Utzenaichu. K dispozici byly také vzorky lučního sena a topolové štěpky, bohužel však v nedostatečném množství pro spalovací zkoušky.

Vzorky briket se nalisovaly ze separátu z vepřové kejdy a směsi separátu vepřové kejdy a dřevěných pilin. Jako etalon se slisovaly brikety ze samotných dřevěných pilin.

Pro všechny vzorky se stanovovala vlhkost vstupních komponent a výsledná vlhkost briket. Dále se měřila výhřevnost a chemické složení briket.

Při spalování se měřila koncentrace CO, CO₂, NO_x, SO₂, O₂ a přebytek vzduchu.



Obr. 20 Vylisované brikety; vzadu zleva: separát a dřevěné piliny 1:1, separát a dřevěné piliny 3:7, separát a seno 1:1, vpředu zleva: čistý separát a separát s topolovou štěpkou 1:1 [22]

Kromě složení se ověřovala i samotná lisovatelnost separátu. Z tohoto hlediska dopadla zkouška dobře a materiál vykazoval dobré vlastnosti pro tvorbu briket, či pelet.[22]

Výsledky spalovacích zkoušek jsou uvedeny v tabulce na následujícím obrázku:

Složení	Jednotka	Separát	Separát a piliny 3:7	Separát a piliny 1:1	Separát BPS Utzenaich
Hořlavina					
voda	% hm.	9,53	8,08	9,14	2,31
prchavá hořlavina	% hm.	67,1	73,03	70,79	63
nepřchavá hořlavina	% hm.	16,54	15,83	15,87	17,78
popel	% hm.	6,83	3,06	4,2	16,91
C	% hm.	38,45	45,25	43,78	41,73
H	% hm.	5,92	6,26	6,46	5,4
N	% hm.	1,58	< 0,1	0,77	2,45
S	% hm.	0,15	0,08	0,1	0,26
O	% hm.	37,37	37,14	35,42	30,4
Cl	% hm.	0,17	0,13	0,13	0,54
spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	16,53	17,51	17,25	17,53
vyhřevnost	MJ.kg ⁻¹	15,24	16,15	15,85	16,3
Popel					
bod měknutí	°C	1180	1180	1190	990
bod tání	°C	1190	1185	1195	1010
bod tečení	°C	1200	1190	1200	1030

Tab. 9 Rozbor briket [22]

Spalovací zkoušky dopadly dobře a emise CO i NO_x se u kombinovaných paliv pohybovaly dokonce na nižších hodnotách než u dřevěných briket. Ostatní emise se také vešly do limitu daného normou ČSN EN 13229. Testované vzorky si tedy nevedly špatně, což dalo této metodě do budoucna dobré vyhlídky.

Testování pelet

V jiném testování, prováděném v laboratořích VÚZT, v.v.i a Technické fakulty ČZU v Praze, byl zkoumán separát z bioplynové stanice Žihle, která zpracovává zvířecí exkrementy a rostlinnou biomasu.

Byly vylisovány dva druhy pelet, jeden ze samotného separátu a druhý ze směsi separátu a dřevěných pilin v poměru 1:1.

Nejprve byly pelety testovány na otěr podle Rakouské normy ÖNORM M7135. V testovacím přístroji jsou proudem vzduchu uváděny do pohybu a narážejí do sebe a stěny přístroje a tím dochází k otěru. Dle normy nesmí hodnota otěru přesáhnout 2,3% hm. Pelety ze samotného separátu v tomto testu uspěli s hodnotou otěru 1,82% hm. Naproti tomu směs separátu s pilinami přesáhla tuto hodnotu o více než 4%.

Po testu na otěr následoval rozbor pelet, ve kterém se zjišťoval obsah vody, hořlavin a chemické složení.

Na následujícím obrázku je tabulka s výsledky testů:

		Separát	Separát + piliny (1:1 hm.)	Dřevní štěpka
voda	% hm.	9,16	7,46	6,79
prchavá hořlavina	% hm.	58,46	62,16	75,55
nepřchavá hořlavina	% hm.	14,92	18,66	14,64
popel	% hm.	17,46	11,72	3,02
C	% hm.	41,79	42,33	47,37
H	% hm.	6,65	6,30	6,40
N	% hm.	1,57	1,20	0,19
S	% hm.	0,20	0,11	0,01
O	% hm.	22,91	30,60	38,58
Cl	% hm.	0,26	0,28	0,04
spalné teplo	MJ.kg ⁻¹	16,74	17,57	19,74
výhřevnost	MJ.kg ⁻¹	15,07	16,02	18,18
popel :				
bod měknutí	°C	1140	1080	1250
bod tání	°C	1190	1170	1260
bod tečení	°C	1240	1190	1270

Tab. 10 Rozbor pelet [20]

Hodnoty výsledků testů, jak pro separát, tak pro směs separátu a pilin, překročili normu ÖNORM M7135 téměř ve všech svých bodech. Zaostávají i v porovnání s peletami z dřevní štěpky. U měření emisí se hodnoty porovnávaly s normou ČSN EN 13229. Tu splňovaly emise CO, ale ne emise NO_x. Celkově tak z provedených testů vyplývá, že zvolené palivo nesplňuje přípustné hodnoty v některých sledovaných parametrech. Pracovníci, kteří testy prováděli, však předpokládají výrazné zlepšení monitorovaných vlastností při snížení podílu separátu v palivu, či přidání vhodné příměsi.[20]

V současné době a pohledu do budoucna se dá předpokládat, že při výběru vhodného složení pelet a briket ze separátu z bioplynových stanic a použití vhodného spalovacího zařízení tato metoda nejen splní potřebné požadavky, ale stane se vítaným způsobem nakládání se zbytkovým materiálem po anaerobní fermentaci a zdrojem energie z obnovitelných zdrojů.

3.2 Zplyňování fermentačního zbytku

Zplyňování je další způsob termického zpracování fermentačního zbytku. Provádí se u vysušeného separátu a dá se tak provozovat, jak s kaly, tak se zbytky z BPS.

Obecně se dá zplyňování rozdělit na čtyři dílčí části: sušení, pyrolýzu, redukci a oxidaci.

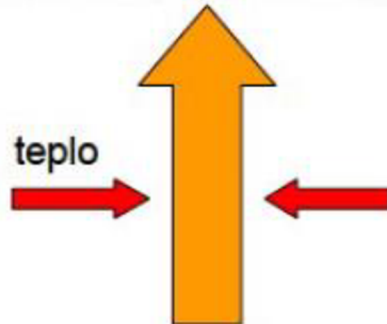
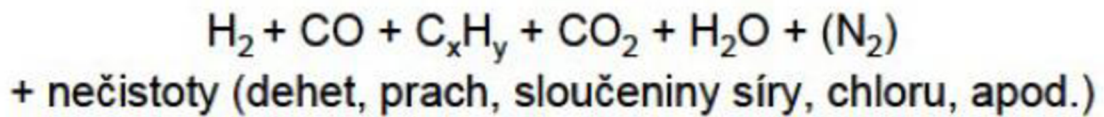
Popis principu zplyňování

Zplyňovat se dá separát/kal částečně vysušený na 50 – 70%. Výhodnější je však mít kal vysušený na 90 – 95%. Díky většímu vysušení je kal lehčí, což zlepšuje náklady na manipulaci a hlavně více výhřevný.

Pod samotným pojmem zplyňování je označována termochemická transformace pevných palivových látek obsahujících uhlík na plynné nositele energie s řízeným přidáním oxidačního prostředí (vzduch, kyslík, vodní pára). Zplyňování je tepelně – chemický proces, který využívá teplo k převedení paliva obsahujícího uhlík na nízkokalorický syntetický plyn, určený buď ke spalování v technologii kogenerování vzniklého vysokokalorického tepla (pára) v parní turbíně na sekundární nízkokalorické teplo, elektrickou energii, nebo k další přímé přeměně na nízkokalorické teplo a elektrickou energii ve speciálním kogeneračním zařízení. Tento plyn se běžně označuje jako „syntézní plyn“ nebo také „syngas“. Na rozdíl od spalování je využito jen cca 20-30% kyslíku potřebného k úplnému spálení paliva. Množství dodávaného vzduchu je pečlivě řízeno, aby jen malá část paliva hořela úplně a přitom vyvinula dostatečné množství tepla, potřebné pro pyrolytický rozklad paliva na „syntézní plyn“, strusku a popel [25].

Během procesu pyrolýzy se anaerobně odpady rozkládají na polokoks, pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn. Pyrolýza probíhá v rozmezí teplot 450 – 750 °C. Pyrolýzní plyn obsahuje plyny s nízkým počtem uhlíků a má velkou výhřevnost.

Zplyňování je řízený rozklad organických látek na syntézní plyn za řízené přítomnosti kyslíku. Produkuje syntetický plyn s nižší výhřevností cca. 1,5 kw/Nm³, který obsahuje především CO, N₂, CO₂, H₂, CH₄, apod. Proces zplyňování probíhá obvykle při teplotách 800 – 1300 °C. Při zplyňování a to včetně zplyňování vysokoteplotního odpadá vznik toxických dioxinů, furanů a polycyklických aromatických uhlovodíků. Rovněž se netvoří NO_x. Metoda zplyňování usušených kalů považována za velmi perspektivní z důvodu jednoduchého zpracování produktů zplyňování – syntézního plynu, strusky a popela [25].



Obr. 21 Princip zplyňování [26]

3.2.1 Výhody zplyňování

Podle [26] a [25] patří k výhodám zplyňování oproti spalování například:

- Větší konverze paliva na energii. Až na 68 % energetického potenciálu.
- Snížení produkce CO_2 , SO_2 , NO_x , apod. na jednotku výkonu
- Prakticky bezodpadová technologie
- Zmenšení technologického zařízení a provozních nákladů na jednotku výkonu
- Snadnější odstraňování hlavních škodlivin v plynné fázi

Energetická výnosnost

Energetická výnosnost a další výhody s ní spojené jsou podle [25]:

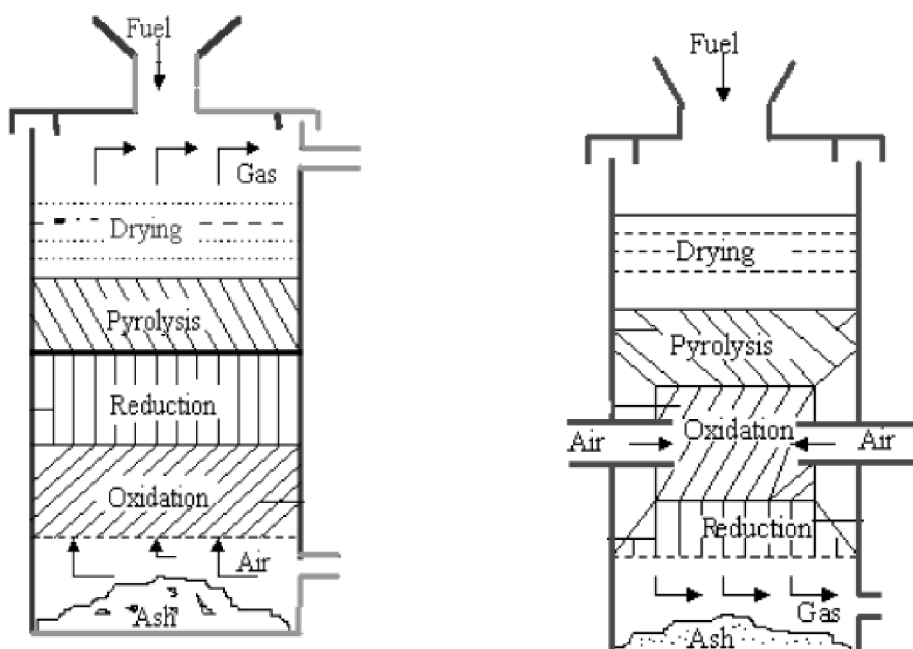
- Při předpokládané produkci „syntézního plynu“ 1,3 – 1,5 m_3/kg vyhnilého kalu (75 % sušiny) lze předpokládat specifickou produkci elektrické energie v rozmezí hodnot 460 - 900 kWh/t sušiny kalu. Průměrná hodnota při specifické produkce elektřiny při zplyňování kalu resp. biomasy je 850 kWh/t sušiny.
- Díky výhřevnosti plynu spalovaného při zplyňování 2,5 – 8 MJ/m^3 resp. 1,25 kWh/m^3 lze pokrýt veškerou spotřebu tepla potřebného pro sušení kalu a veškeré procesy při zplyňování.
- Díky zplyňování se významně sníží produkce CO_2 a NO_x na jednotku energetického výkonu proti spalování kalu, neboť spalování „Syngasu“ je účinnější než přímé spalování kalu.

3.2.2 Typy zplyňovacích generatorů

Zplyňovací generátory se většinou dělí podle způsobu vnosu vzduchu do zařízení na 4 základní typy:

Vertikální generátor s průtokem plynu nahoru (Protiproudý zplyňovač)

Vzduch je v něm přiváděn ze dna reaktoru v protiproudu k průtoku paliva. Jsou v něm rozděleny oblasti pro každou část procesu zplyňování. Přes tyto oblasti postupuje horký plyn, postupně se ochlazuje a z reaktoru odchází při nízké teplotě. Rozdílové teplo slouží k sušení a ohřevu paliva. Nevýhody jsou nadměrná produkce škodlivých látek a malé možnosti zatížení.



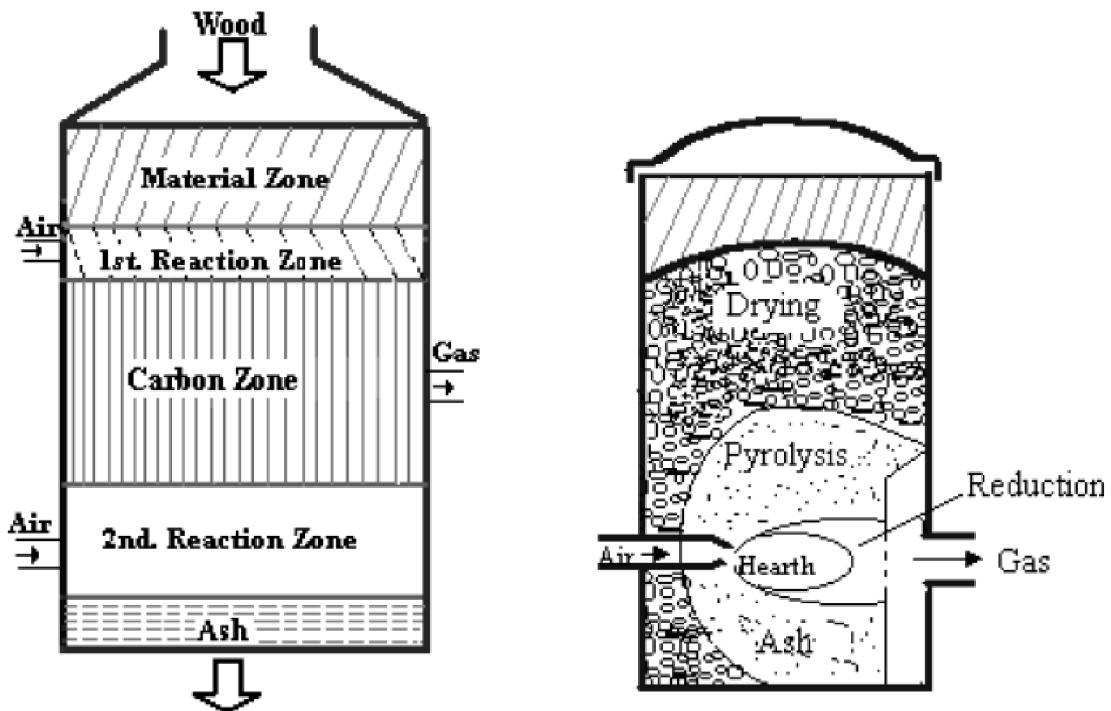
Obr. 22 Protiproudý zplyňovač (nalevo); Souproudý zplyňovač (napravo)
[29]

Vertikální generátor s průtokem plynu dolů (Souproudý zplyňovač)

Z názvu je vidět, že největší rozdíl je v opačném směru toku plynu. Díky tomu, že plyn neprochází cestou přes všechny fáze zplyňování, má při východu menší obsah škodlivých látek.

Dvojitý generátor (s Křížovým proudem)

Kombinuje souproudé a protiproudé proudění. Je složený ze dvou hlavních částí. V horní části dochází k sušení, karbonizaci a krakování (tepelný rozklad uhlovodíků) plynů. Ve spodní části probíhá zplyňování. Plyn produkovaný tímto procesem je relativně čistý.



Obr. 23 Dvojitý generátor (nalevo); Horizontální generátor (napravo)[29]

Horizontální generátor

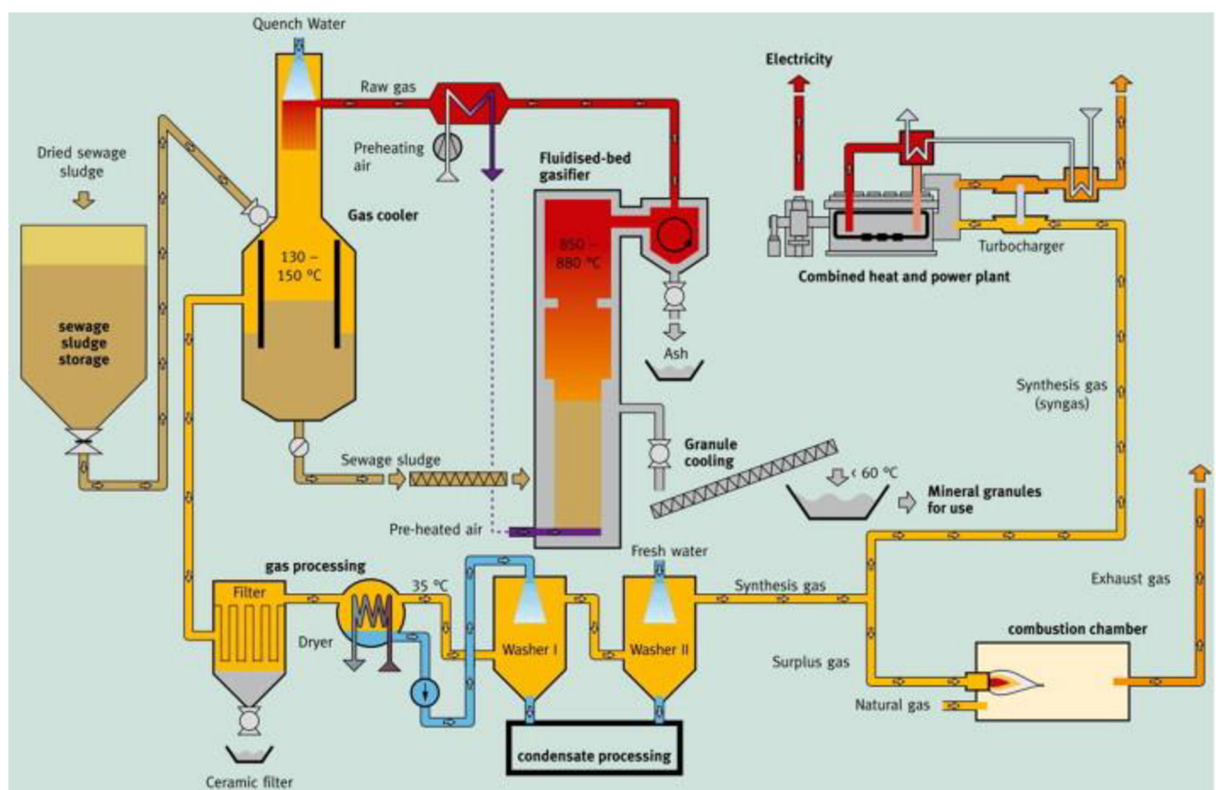
Kombinuje výhody vertikálního generátoru s průtokem plynů nahoru i dolů. Konstruktivní parametry reaktoru vyžadují palivo s nízkým obsahem popela, a proto se tento generátor nehodí na zplyňování vysušeného kalu, který vykazuje vysoký podíl popela. [29]

3.2.3 Příklady zplyňovacích stanic

Největší přínos v oblasti zplyňování fermentačních zbytků dalo světu Německo. To postavilo první ukázkové zařízení již v roce 2002 v Balingenu. V roce 2010 bylo značně vylepšeno a následně byla další instalace vystavěna v Mannheimu. Ta je nyní začleněna v běžném provozu místní čistírky odpadních vod.

Závod postavila firma Kopf SynGas GmbH & Co. KG a jeho jádrem je atmosférický zplyňovací generátor s bublajícím fluidním ložem, kde fluidačním médiem je vzduch a pára.

Schéma celého zařízení je na následujícím obrázku:



Obr. 24 Schéma zplyňovací stanice v Mannheimu [32]

Ukázková stanice v Balingenu

Demonstrační zplyňovač z roku 2002 byl postavený s výrobní kapacitou zplyňování 1100 tun vysušeného kalu za den. V následujících letech proběhlo několik úprav, během kterých se výrobní kapacita zvýšila na zhruba 1950 tun za den. Stanice sušila a zplyňovala kal ze šesti okolních čistírek odpadních vod. Díky tomu vykazoval výsledný plyn velmi rozdílné hodnoty výhřevnosti. Proto se začal vsázkový materiál míchat, aby měl produkovaný plyn více konstantní kvalitu.

V následující tabulce jsou uvedeny parametry stanice na začátku svého fungování a její nejmodernější verze.

	Původní stanice	Zmodernizovaná stanice
Zplyňovací výkon	935 tun/den	1955 tun/den
Zplyňováno pomocí	vzduchu	vzduchu
Teplota zplynování	850°C	850°C
Instalovaný el. výkon	230 kW	720kW

Tab. 11 Parametry stanice v Balingenu [32]

Stanice v Mannheimu

Po nashromáždění potřebných informací z pilotní stanice v Balingenu byla stanice v Mannheimu postavena v roce 2010. Svého předchůdce předčila ve všech parametrech.

Zplyňovací výkon	5000 tun/den
Zplyňováno pomocí	Vzduchu a páry
Teplota zplynování	850 – 900 °C
Instalovaný el. výkon	2.2 MW

Tab. 12 Parametry stanice v Mannheimu [32]

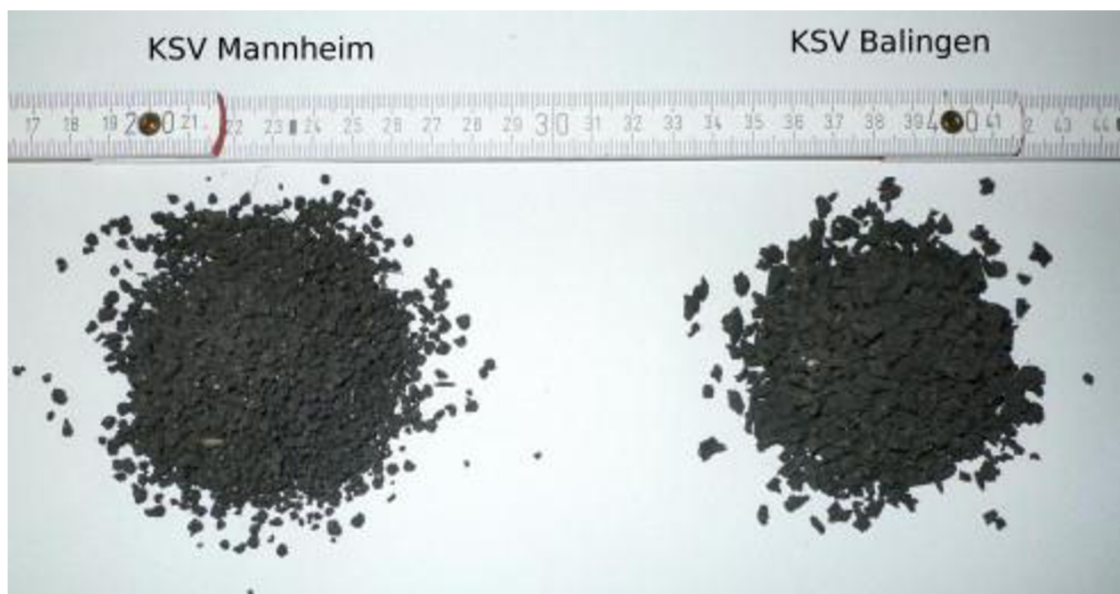
Největší technologický rozdíl mezi stanicí v Mannheimu a Balingenu je typ použitého sušiče. V Balingenu je to pásový sušič a v Mannheimu rotační sušič.

V následující tabulce je uvedeno složení kalů používaných v jednotlivých zařízeních. Největší rozdíl je v obsahu uhlíku, což je způsobeno účinností fermentace.

	Balingen	Mannheim
Výhřevnost [MJ/kg]	7 – 10	11 – 13
Obsah popela [%]	57	39.5
C [%]	16.9	30
H [%]	3.3	4.4
O [%]	19.8	20.8
N [%]	2.3	4.2
S [%]	0.7	1.1

Tab. 13 Složení kalů ze stanic v Mannheimu a Balingenu [32]

Následují fotografie obou stanic a zpracovávaného kalu.



Obr. 25 Vzorky kalů [32]



Obr. 26 Stanice v Balingenu [32]



Obr. 27 Stanice v Mannheimu [32]

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo popsat princip anaerobní fermentace suchou a mokrou metodou, popsat fermentační zbytek a termické způsoby dalšího nakládání s ním.

V práci jsou popsány rozdíly suché a mokré fermentace a porovnány výhody a nevýhody každé z metod. Dále je v práci podrobně rozepsáno složení fermentačního zbytku jak ze suché tak mokré fermentace, uváděno především na příkladu kalu z ČOV. V poslední části jsou popsány metody termického zpracování fermentačního zbytku spalováním a zplyňováním.

O nevyhnutelném vyčerpání fosilních paliv v blízké budoucnosti se v současnosti mluví čím dál častěji. Jak z důvodu tohoto faktu, tak i z důvodu regulací ze strany Evropské unie, se Česká republika každým rokem musí více a více zaměřovat na obnovitelné zdroje energie. Biomasa a produkovaný bioplyn k nim neodmyslitelně patří již dlouho. Zbytek po fermentaci byl však znám spíše jako hnojivo, než jako další možnosti zisku zelené energie. S novým výzkumem a zkoušením nových metod termického naložení s fermentačním zbytkem se však ukázalo, že materiál zbylý po anaerobní fermentaci skrývá velký potenciál jako doplňkový zdroj energie.

Výběr druhu zpracování vždy záleží na konkrétní situaci, kdy rozhoduje velká řada faktorů, ale při výběru ideální kombinace technologií, může být energetický výnos srovnatelný se zpracováním klasické biomasy.

Se vzrůstajícím trendem využívání termického zpracování zbytkového materiálu a zlepšováním potřebných technologií je jisté, že bude mít tato metoda na poli obnovitelných zdrojů energie čím dál větší roli.

Seznam použité literatury

- [1] PASTOREK, Zdeněk, Jaroslav KÁRA a Petr JEVIČ. *Biomasa: obnovitelný zdroj energie*. Praha: FCC Public, 2004, 286 s. ISBN 80-865-3406-5.
- [2] *Obnovitelné zdroje energie*. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001, 208 s. ISBN 80-901-9858-9.
- [3] Anaerobní technologie. *Biodis* [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://bioodpady.ecomanag.cz/anaerobni-technologie/>
- [4] DOHÁNYOS, Michal: Anaerobní reaktor není černou skříňkou - teoretické základy anaerobní fermentace. *Biom.cz* [online]. 2008-11-17 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>>. ISSN: 1801-2655.
- [5] Úvod do problematiky energetického využívání biomasy. ŠTUDLAR, Zdeněk. *Biom* [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/uvod_do_problematiky_energetickeho_vyuzivani_biomasy.pdf
- [6] KARAFIÁT, Zbyšek, VÍTĚZ, Tomáš, POSPÍŠIL, Lukáš: Bioplynové stanice na „suchou“ fermentaci – šance pro energetické využití biologicky rozložitelných odpadů (BRO). *Biom.cz* [online]. 2009-08-31 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynové-stanice-na-suchou-fermentaci-sance-pro-energeticke-vyuziti-biologicky-rozlozitelnych-odpadu-bro>>. ISSN: 1801-2655.
- [7] NOVÁK, Petr. „Suché“ bioplynové stanice („suché“ BPS). [Http://www.trendex.cz/](http://www.trendex.cz/) [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.trendex.cz/documents/prezentace-sucha-fermentace-Trendex.pdf>
- [8] Bioplynové stanice „suchá“ anaerobní fermentace. *Fortexbioplyn* [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/cz/sucha-fermentace/>
- [9] MIKULÍK, Marian. Biomasa a její energetické využití. *Biomasa-info* [online]. 2011 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://www.biomasa-info.cz/cs/doc/S3_13.pdf
- [10] Anaerobní technologie. *Bioplyn* [online]. 2007 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm

- [11] Systém suché bio fermentace. *Biofermentory* [online]. 2014 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.biofermentory.sk/system-suche-bio-fermentace/>
- [12] POSPÍŠIL, Lukáš: Výzkum „suché“ anaerobní fermentace různých druhů biomasy za účelem výroby bioplynu. *Biom.cz* [online]. 2011-10-24 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyzkum-suche-anaerobni-fermentace-ruznych-druhu-biomasy-za-ucelem-vyroby-bioplynu>>. ISSN: 1801-2655
- [13] Průvodce výrobou a využitím bioplynu. *Biom* [online]. 2009 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Pruvodce_vyrobou_vyuzitim_bioplynu_2.pdf
- [14] *Fortexbioplyn* [online]. [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.fortexbioplyn.cz/>
- [15] Výše výkupních cen a zelených bonusů. *Tzb-info* [online]. 2013 [cit. 2014-04-14]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/vyse-vykupnich-cen-a-zelenych-bonusu>
- [16] SVOBODA, Jan. *Bioplynová stanice na zpracování biologicky rozložitelných odpadů Žďár nad Sázavou* [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.chp-goes-green.info/sites/default/files/6-Svoboda_BPS-na-zpracovani-BRKO-Zdar.n.pdf
- [17] *Farmastonava: bioplynová stanice* [online]. 2011 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.farmastonava.cz/bioplynova-stanice/>
- [18] *Příručka pro nakládání s digestátem a fugátem* [online]. 2008 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://eagri.cz/public/web/file/32326/ETAPA_IV_Metodika_digestt_FV.pdf
- [19] ŠTASTA, Pavel. *Využití čistírenských kalů jako alternativního paliva*. Brno, 2009. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=58851. Dizertační práce. FSI VUT Brno. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
- [20] KOUTNÝ, Roman: Termické využití separátu po anaerobní fermentaci biologicky rozložitelných odpadů. *Biom.cz* [online]. 2010-01-25 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/termicke-vyuziti-separatu-po-anaerobni-fermentaci-biologicky-rozlozitelnych-odpadu>>. ISSN: 1801-2655.
- [21] Zpracování kalů. LYČKOVÁ, Ing. Barbora, Ph.D., prof. Ing. Peter FEČKO, CSC a Doc. Dr. Ing. Radmila KUČEROVÁ. *Využití odpadních kalů* [online]. 2008 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Bara/vyuziti.html>

- [22] KÁRA, Jaroslav, KOUTNÝ, Roman: Využití fermentačních zbytků anaerobní digesce jako paliva. Biom.cz [online]. 2009-12-30 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-fermentacnich-zbytku-anaerobni-digesce-jako-paliva>>. ISSN: 1801-2655.
- [23] Proenergy. Bioplynové stanice mokrá fermentace [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.proenergy.cz/page/89/bioplynové-stanice-mokra-cesta>
- [24] HAMMER, Václav. Výroba biopaliva z čistírenských kalů a biomasy. [online]. 2011 [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: <ftp://soubory.vodnihospodarstvi.cz/RedRada/HammerV%FDrobaBiopalivaZkal%F9.doc>
- [25] Sušení a zplyňování kalu. [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.sweco.cz/Global/Czech%20republic/Documents/inovativni_technologie/Su%C5%A1en%C3%AD%20a%20zply%C5%88ov%C3%A1n%C3%AD%20kalu%20-%20bro%C5%BEura2011.pdf
- [26] HARTIG, Karel a Josef KUTIL. Sweco hydroprojekt. Optimální volba kalové koncovky a výhody nízkoteplotního sušení [online]. [cit. 2014-05-28]. Dostupné z: http://www.vodaforum.cz/prezentace/zakaznici/vodaforum/dokumenty/pdf/f71_30-18-hartig.pdf
- [27] Interní rozbor VUT. 2014. [cit. 2014-05-28]
- [28] SIEGLE, V., H. SPLIETHOFF a R. CENNI. *Fuel characteristics of sewage sludge and other supplemental fuels regarding their effect on the co-combustion process with coal* [online]. [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/43_1_DALLAS_03-98_0197.pdf
- [29] JENÍČEK, Pavel. *Termické procesy zpracování kalů* [online]. In: . [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~jenicekp/Kalov%C3%A9%20hospod%C3%A1%C5%99stv%C3%AD/KH%2010%20-%20termick%C3%A9%20procesy.pdf>
- [30] BALÁŠ, Ing. Marek, Ing. Ph.D. Martin LISÝ a Ing. Ph.D. Jiří MOSKALÍK. 2012. Kotle: 2.část. *Kotle* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [31] Popis vybraných kotlů. In: *Invelt* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.invelt.cz/media/soubory/downloads/servis/popis_vybranych_kotlu.pdf
- [32] JUDEX, Johannes W., Michael GAIFFI a H. Christian BURGBACHER. Gasification of dried sewage sludge: Status of the demonstration and the pilot plant. *Waste Management* [online]. 2012, **32**(4): 719-723 [cit. 2015-05-25]. DOI: 10.1016/j.wasman.2011.12.023. ISSN 0956053x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0956053X11005939>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Bioplynová stanice na mokrou fermentaci	14
Obr. 2 Průtoková metoda	16
Obr. 3 Zásobníková metoda	17
Obr. 4 Kombinovaná metoda	17
Obr. 5 Směšovací reaktor	19
Obr. 6 Schéma bioplynové stanice na suchou fermentaci	21
Obr. 7 BPS Žďár nad Sázavou	23
Obr. 8 Fermentační plynotěsné komory	23
Obr. 9 Nakládání vsázky	24
Obr. 10 Komunální bioplynová stanice Šumperk – Temenice	24
Obr. 11 Fermentační komory	25
Obr. 12 Bioplynová stanice Stonava	25
Obr. 13 Fotografie suchého paliva	30
Obr. 14 Graf kalorického obsahu vyhnílého kalu	33
Obr. 15 Schéma spolu-spalování kalů v elektrárnách	34
Obr. 16 Roštový kotel	35
Obr. 17 Schéma rotační pece	36
Obr. 18 Schéma rotační etážové pece	37
Obr. 19 Schéma fluidní pece	37
Obr. 20 Vylisované brikety	39
Obr. 21 Princip zplyňování	43
Obr. 22 Protiproudý a souprroudý zplyňovač	44
Obr. 23 Dvojitý generátor a horizontální generátor	45
Obr. 24 Schéma zplyňovací stanice	46
Obr. 25 Vzorky kalů	48
Obr. 26 Stanice Balingen	48
Obr. 27 Stanice Mannheim	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Palivové vlastnosti vysušeného vyhnílého kalu	28
Tab. 2 Elementární rozbor hořlaviny	28
Tab. 3 Rozbor kalu (mokrý f.) Německo	29
Tab. 4 Rozbor kalu (mokrý f.) ČR	29
Tab. 5 Složení původního vzorku	31
Tab. 6 Složení odvodněného vzorku	31
Tab. 7 Složení hořlaviny	31
Tab. 8 Produkce kalů z ČOV a způsob jejich zneškodnění	32
Tab. 9 Rozbor briket	40
Tab. 10 Rozbor pelet	41
Tab. 11 Parametry stanice v Balingenu	47
Tab. 12 Parametry stanice v Mannheimu	47
Tab. 13 Složení kalů z Mannheimu a Balingenu	47