

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

ANAEROBNÍ FERMENTACE KALŮ Z VÝROBY BUNIČINY A KRMNÉHO DROŽDÍ

ANAEROBIC DIGESTION OF SLUDGE FROM PULP AND FODDER YEAST

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAROSLAV ŘEZÁČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN PĚČEK

BRNO 2010

ANOTACE

Cílem diplomové práce je vytipovat vhodné, v lokalitě dostupné suroviny ke společné kofermentaci s kaly z výroby buničiny a krmného droždí v podniku Biocel Paskov a.s.. Úvodní kapitoly stručně popisují mechanismy vzniku samotného kalu. Další část se zabývá vznikem, chemickým složením a vlastnostmi bioplynu. Jsou zde popsány faktory ovlivňující produkci bioplynu. Klíčovou částí diplomové práce jsou provedené fermentační zkoušky kalu a zvoleného směsného substrátu. Získané poznatky jsou vyhodnoceny a zvolena optimální skladba vstupních surovin s ohledem na maximální, ale i ekonomickou výtěžnost bioplynu. Dále je na základě získaných dat proveden hrubý návrh bioplynové stanice včetně její energetické a ekonomické bilance.

KLÍČOVÁ SLOVA

Anaerobní fermentace, bioplyn, kal, kofermentace, tepelná bilance

ANNOTATION

The thesis aims to identify suitable and in the locality available raw materials to a common fermentation with sludge from pulp and fodder yeast production in company Biocel Paskov a.s.. Introductory chapter briefly describes the mechanisms of penetration of the sludge itself. The following section deals with origin, chemical composition and properties of biogas. The factors affecting the production of biogas are described. A key part of this thesis is a performance of sludge fermentation test and selected mixed substrate. Acquired knowledge is evaluated and the optimum composition of input raw materials with regard to maximum, but also economic recovery of biogas selected. Further, on the basis of obtained data a rough draft of biogas station is done, including its energetic and economic balance.

KEYWORDS

Anaerobi stabilisation, biogas, sewage, common fermentation, heat balance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŘEZÁČ, J. *Anaerobní fermentace kalů z výroby buničiny a krmného droždí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pěček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Anaerobní fermentace kalů z výroby buničiny a krmného droždí* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Pěčka a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 28. května 2010

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Janu Pěčkovi za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této diplomové práce. Také bych rád poděkoval celé své rodině za podporu, kterou mi byla poskytnuta během celého studia na vysoké škole.

OBSAH:

1	ÚVOD	11
2	VÝROBA PAPÍRU A VZNIK BUNIČINY	13
2.1	Výrobní postup sufitové buničiny	14
2.2	Množství odpadních vod	15
3	ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD	15
3.1	Popis ČOV	15
3.1.1	Mechanické čištění	16
3.1.2	Biologické čištění	16
3.1.3	Terciární čištění	16
3.1.4	Kalové hospodářství	16
3.1.5	Plynové hospodářství	16
3.2	Popis médií	16
3.3	Popis průmyslové čistírny	17
3.3.1	Mechanické čištění	18
3.3.2	Biologické čištění	18
3.3.3	Kalové hospodářství	18
3.4	Možnosti využití kalů	19
4	VZNIK A VLASTNOSTI BIOPLYNU	20
4.1	Vznik bioplynu	20
4.2	Faktory ovlivňující tvorbu bioplynu	22
4.2.1	Teplota	22
4.2.2	pH	22
4.2.3	Nutriety	23
4.2.4	Toxické a inhibující látky	23
4.2.5	Technologické faktory	23
4.3	Vlastnosti bioplynu	23
4.4	Úprava a čištění bioplynu	24
4.5	Materiály vhodné pro fermentaci	24
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
5.1	Vlastnosti kalu	25
5.2	Popis zařízení v laboratoři	27
5.3	Předchozí pokusy	30
5.4	Síra v anaerobním procesu	30
5.5	Návrh možných řešení	31
5.5.1	Termofilní pásmo teplot	32
5.5.2	Kofermentace	33
5.5.3	Mikroaerace	34
5.5.4	Adsorpce na aktivním uhlí	36
5.6	Vlastní pokusy	37
5.6.1	Pokus č.1	37
5.6.2	Pokus č.2	39
5.6.3	Pokus č.3	40

5.7	Vyhodnocení pokusů	41
6	BIOPLYNOVÁ STANICE	43
6.1	Skladba hlavních částí BPS	44
6.2	Popis reaktoru	45
6.3	Zásady při přípravě výstavby BPS	46
6.3.1	Použitá technologie	46
6.3.2	Umístění	47
6.3.3	Postup při realizaci	47
7	NÁVRH BPS	48
7.1	Návrh reaktoru	49
7.2	Vlastnosti vznikajícího bioplynu	52
7.3	Volba kogenerační jednotky	53
7.4	Hrubý odhad nákladů	54
8	ZÁVĚR	56
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	57
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	61
11	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	62
12	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
13	SEZNAM TABULEK	64
14	SEZNAM PŘÍLOH	65

1 ÚVOD

Papír již mnoho desítek let patří k neodmyslitelným vynálezům lidské civilizace. Hlavní předností není jenom zaznamenání a uchování informace, ale slouží i jako balící prostředek. Dříve se myslelo, že s postupem počítačů ubude papíru, ale dneska vidíme, je tomu spíše naopak. Papír je jedna z nejdůležitějších surovin v dnešním světě. V České republice má papírenský průmysl více jak 500 let tradice [1].

Papír byl vynalezen někdy ve 3. tisíciletí př. n. l. v Číně, kde byl vyráběn z konopí. Poté se začal vyrábět z hedvábných a lněných materiálů. Papír tak, jak ho známe dnes, byl vynalezen v Číně o něco později. Do Evropy se dostal prostřednictvím Arabských kmenů. První papírny vznikly ve Španělsku a pak se šířily do celé Evropy. Od 16. století se pak začaly objevovat papírny i v českých zemích.

Jedním z hlavních trendů v současné světové výrobě papírů není přinášet každým rokem nové druhy papíru, ale zvyšování kvality stávajících výrobků. Kvalitou se myslí hlavně složení, se kterým jsou úzce spjaty mechanické vlastnosti papíru.

V České republice se hlavně vyrábí buničina. Z celkové produkce buničiny jde víc jak 50 % na export. Největší světovým výrobcem buničiny je USA, v Evropě to jsou Finsko a Švédsko[5]. Podíl sběrového papíru používaného pro výrobu vláknin neustále stoupá. Za posledních dobu stoupla jeho spotřeba na více jak dvojnásobek.

Jedním z indikátorů růstu životní úrovně je spotřeba papíru na jednoho obyvatele. Ta vzrůstá s celkovým hospodářským rozvojem země. Zatímco v roce 1995 činila v České republice 67,3 kg, v roce 2008 dosáhla výše kolem 150 kg papíru na obyvatele uvádí [3]. Pro srovnání je možné uvést, že na prvním místě je ve světě USA, kde se průměrná spotřeba na obyvatele pohybuje kolem 320 kg. V Evropě je na prvním místě Finsko a těsně následované Belgií.

K výrobě papíru a celulózy je zapotřebí buničina. Hlavním zdrojem je dřevo, mohou se použít i jiné materiály jako je konopí, sláma, bavlna apod. Dřevo obsahuje 45 % celulózy, 25 % hemicelulózy, 25 % ligninu a 5 % dalších rozpustných látek, uvádí [4]. Materiál používaný pro výrobu papíru je nejprve převeden do vláknitého stavu, což je koncentrovaná směs vláken rozptýlených v kapalině. Pak se přidají chemikálie, které mají rozpouštět lignin. Tento proces vyžaduje vícenásobné promývání a homogenizaci celé směsi. Pokud se přidává ještě recyklovaný papír, tak se musí přistoupit k bělení. Celý tento proces potřebuje velké množství vody a energie. Hlavně ve formě tepla, páry a elektrické energie. Proto má tento proces velký vliv na znečišťování vody a ovzduší. Papírny a celulózky jsou většinou stavěny v blízkosti vodního zdroje. Odkud je voda používána v procesu. Dříve byla všechna odpadní voda vypouštěna zpět do řek, což vedlo k snížení kvality mnoha vodních toků. Díky změnám legislativy byly značně sníženy množství vypouštěných odpadních vod. Také pomáhá vývoj a inovace provozních technologií, které jsou směřovány k uzavřeným vodním okruhům a snížení používání chlóru jako bělicího prostředku.

Znečištěné vody z výroby papíru a celulózy jsou odváděny na čistírny odpadních vod (ČOV), kde se odbourávají anorganické a organické látky. Cílem je dosáhnout takové kvality vody, aby se mohla zpět vypustit do recipientů. Dalším produktem ČOV jsou kaly,

kteřé se zpracovávají v kalovém hospodářství. Zde mohou být odvodněny, stabilizovány nebo hygienizovány. To má mít za cíl, snížení nepříznivých vlivů kalů na životní prostředí a lidské zdraví. Dalším požadavkem na zpracování kalů je, aby to bylo šetrné k životnímu prostředí a ekonomicky výhodné. Nelze jasně říci, který způsob následného zpracování je nejlepší. Jednotlivé možnosti se musí hodnotit na konkrétním zadaném problému. Musí se brát ohled na místní lokální podmínky, fyzikální a chemické vlastnosti a závěrečné zpracování kalu. V současné době se používají následující možnosti zpracování.

- zpětné získání energie z kalů, např. spalováním v cementářských pecích
- vyháníváním ve vyhánivacích nádržích za vzniku bioplynu. Vzniklý bioplyn se spaluje v kogeneračních jednotkách (KJ), vyrábí se teplo a elektrická energie.
- využitím v zemědělství, zde se musí sledovat koncentrace těžkých kovů. Aby se při jejich použití jako hnojiva spíše neškodilo přírodě.
- sládkovat na skládkách bez žádného využití.

Problémem energetického využití kalu na základě procesu vyhánívání a následné tvorbě a využití bioplynu spalováním v KJ. Tímto se bude zabývat tato diplomová práce. Hlavní důraz bude kladen na optimální skladbu vstupních surovin do vyhánivacích nádržích. Ohled bude brán na maximální výtěžnost bioplynu a pokud možno co největší omezení nežádoucích prvků, jako je např. síra. Na základě množství a kvality bioplynu bude navržena optimální bioplynová stanice.

2 VÝROBA PAPIÍRU A VZNIK BUNIČINY

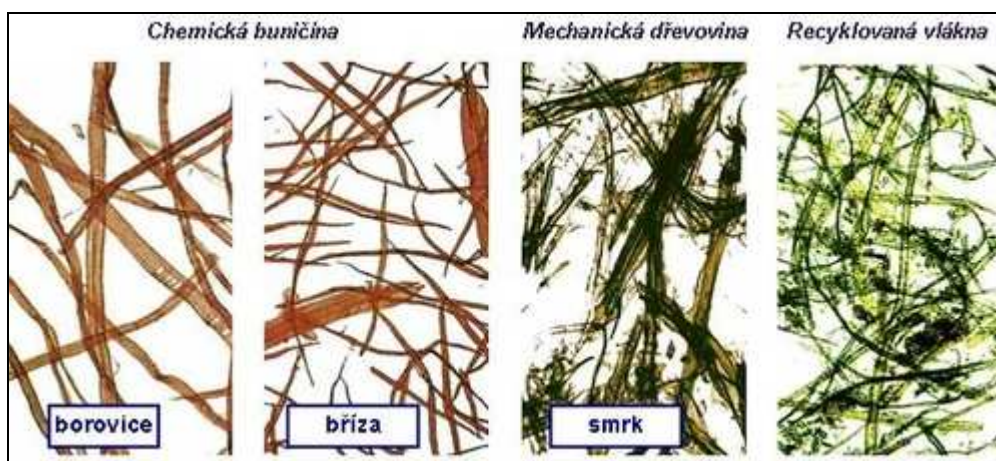
Kal, který bude zpracováván ve vyhřívacích reaktorech pochází z výroby buničiny a krmného droždí z podniku Biocel Paskov a.s.. V této kapitole bude stručně popsán výrobní postup výroby buničiny, abychom měli představu o původu znečištěné vody potažmo kalu.

Základním materiálem pro výrobu buničiny se používá dřevo. Používají se i jiné materiály, ale dřevo je ekonomicky nejvýhodnější. Zde je uveden zjednodušený postup zpracování dřeva.

Výrobní postup dle[2]:

- vlákninové dřevo (měkké dřevo - smrk, borovice, tvrdé dřevo – bříza)
- odkornění (zbavení kůry)
- sekání štěpků / strouhání kmenů
- vaření - rozvláknění
- praní
- mletí
- třídění
- bělení

Výroba papíru z buničiny probíhá chemickým způsobem. Dřevěné štěrky se vaří ve vařáku s chemikáliemi. Vařením se oddělí lignin, dřevo se tak rozpadne na vlákna. Proces končí v suspenzi s rozvlákněnými vlákny, která si dále udržují svoji pevnost [1]. Na obrázku (Obr. 2.1) jsou uvedeny nejpoužívanější druhy buničiny.



Obr. 2.1 Druhy buničiny [2]

Existují tři základní postupy jak získat ze dřeva buničinu. Nelze o žádném tvrdit, že je lepší než ostatní. Protože každý postup má svoje výhody a nevýhody.

Způsoby získání buničiny:

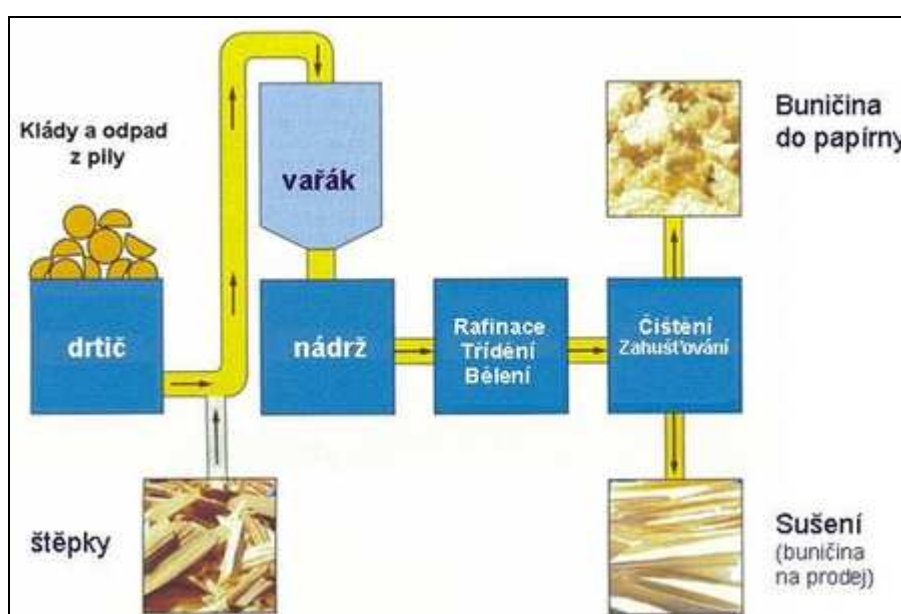
- chemický
- mechanický
- recyklací (ze sběrového papíru)

Nás bude zajímat chemická separace buničiny. Chemikálie jsou přidávány proto, aby se snáze rozpouštěl lignin. Jsou možné dva způsoby zpracování dle použitých chemických látek:

sulfátová - zásadité chemikálie (vyšší pevnost papíru)

sulfitová - kyselé chemikálie (nižší pevnost papíru)

Dřevěná vlákna zůstávají po tomto rozpouštění čistá a nepoškozená. Papír, který je vyráběn touto cestou je označován jako bezdřevý. Cílem je eliminovat obsah ligninu tak, aby vlákna zůstala neporušená a zachovala si svoji pevnost. Na konci procesu obsahuje buničina jen málo nečistot. Pro zajímavost, k výrobě 1 tuny chemické buničiny je přibližně potřeba 4 – 6,6 m³ dřeva. Množství dřeva se udává jako dřevo bez kůry [2]. Zjednodušený postup výroby chemické buničiny je na Obr. 2.2.



Obr. 2.2 Chemická výroba buničiny [2]

2.1 Výrobní postup sulfitové buničiny

Přivezené dřevo se odkorní a rozseká na štěrky. Poté je dopravními pásy dávkováno do vařáku. Vařením dřevních štěpků s varnou kyselinou se uvolní ze dřeva lignin. Po rozpouštění ligninu se získá surová nebělená buničina. Celý tento proces je ohříván parou. Výluh, po dokončení vaření a odvedení odplynů je přečerpán na odparku. Odplyny jsou dále použity pro výrobu kyseliny. Buničina je z vařáku odváděna na třídící linku, kde se zbaví nečistot jako jsou suky a nerozvařené části. Poté je uskladněna v zásobnících, ze kterých se postupně dopravuje na prací lisy, kde je propírána a tříděna. Následuje kyslíková delignifikace a bělení za užití chemických roztoků. Tato operace probíhá v kyslíkovém reaktoru. Dále je buničina vedena do tlakového stupně, kde probíhá opět delignizace a bělení. Následuje další uskladnění a poté nové třístupňové bělení. Po každém stupni bělení se musí buničina znovu přefiltrovat. Jak skončí poslední filtrace buničina je znovu vytříděna, aby se zbavila všech nečistot. Pak putuje na sušící stroj, kde je odvodněna, lisována a po důkladném vysušení nařezána na archy [8].

Tímto postupem se vyrábí nečastěji hygienický, grafický a obalový papír, ale i lepenky a kartony. Výhody tohoto kyselého procesu jsou: odolnost papíru vůči žloutnutí, dobré pevnostní a příznivé vlastnosti pro archivaci. Za nevýhody lze považovat: nízká výtěžnost, emise vypouštěné do ovzduší, znečišťování vodních toků a také velké množství odpadu, který musí být likvidován.

Vedlejším produktem této výroby může být výroba krmného droždí, které se získává z výluhu po vaření. Tato hmota projde procesem zkvašování cukru a tím se získává droždí. Tímto způsobem získané kvasnice se používají pro výrobu krmných směsí pro hospodářská a domácí zvířata. Lze je použít i ve farmacii, díky vysokému obsahu ribonukleové kyseliny. Vedlejší produkty z procesu výroby kvasnic najdou uplatnění ve stavebním, ocelářském i kožedělném průmyslu [9].

2.2 Množství odpadních vod

Jak bylo uvedeno tento proces je velkým producentem odpadu, hlavně odpadní vody. Zdrojem těchto vod jsou: odparka, praní, bělení, sušící troj, dřevosklad a droždárna. Všechny proudy přitékají na ČOV jedním nátokem. Vlastnosti přitékající odpadní vody jsou: teplota cca 37 °C a pH se pohybuje v rozmezí 4-5. Celkový přítok je 831 m³/h. Vyčištěné odpadní vody jsou odváděny do říčního toku. Účinnost čištění je CHSK 75,49 % a BSK₅ 98,7 % [8].

3 ČISTÍRNA ODPADNÍCH VOD

Čistírna odpadních vod je zařízení, kde se odstraňují rozpuštěné a nerozpuštěné látky obsažené v odpadních vodách. Výsledkem tohoto procesu na výstupu je vyčištěná voda, která odpovídá svým složením a kvalitou platným předpisům pro vypouštění vod do recipientu. Dělení je hlavně podle velikosti a typu zvoleného procesu. K vyčištění odpadní vody musíme za sebe poskládat několik různých procesů, které se na vzájem kombinují, jsou to mechanické, biologické a chemické procesy. Snahou je, aby čistírna byla co nejvíce jednoduchou, spolehlivou a nenáročnou na obsluhu. Volba zařízení celé linky musí mít dobrou účinnost, pokud možno minimální energetickou spotřebu a mít přijatelné ekonomické náklady spojené s provozem.

3.1 Popis ČOV

Každá větší komunální i průmyslová čistírna odpadních vod se dá rozdělit do následujících částí:

- Mechanické (primární) čištění
- Biologické čištění
- Terciární čištění (není součástí každé ČOV)
- Kalové hospodářství
- Plynové hospodářství

3.1.1 Mechanické čištění

Přiváděná odpadní voda nejdříve vstupuje do fáze hrubého přečištění, které se děje v lapacích písku a na česlích. Zde se zachytávají hrubé částice, aby později nedošlo k poškození strojního zařízení čistírny. Druhá fáze mechanického čištění se provádí na usazovací nádrži. Zde dojde k usazení jemných podílů nerozpuštěného znečištění, které se usazuje na dně nádrže ve formě kalu. Tento primární kal je odváděn do kalového hospodářství [7].

3.1.2 Biologické čištění

Nebo taky aerobní čištění, které probíhá v aktivačních nádržích. Zde vstupuje voda z primárního čištění, zbavená všech nerozpuštěných látek. Zde se využívají aerobní bakterie, které odbourávají organickou hmotu z vody. Biologickou cestou probíhá zde přeměna amonného iontu na dusičnany (nitrifikace). Dále se kal separuje od čisté vody v dosazovacích nádržích. Část aktivovaného kalu je vráceno do aktivační nádrže a část putuje do kalového hospodářství [7].

3.1.3 Terciární čištění

Tento způsob čištění se zařazuje, když odtok z čistírny nedosahuje požadovaných parametrů. Je to takové dočištění vody. Hlavně se zde odstraňuje fosfor a další nerozpuštěné látky [7].

3.1.4 Kalové hospodářství

U malých čistíren se řeší tento problém odvozem kalů k dalšímu zpracování. U větších a velkých čistíren se za pomoci aerobní nebo anaerobní stabilizace tyto kaly zpracovávají. Tento proces pobíhá bez přístupu vzduchu ve vyhnívajících nádržích (reaktorech). Poté je stabilizovaný (vyhnílý) kal zpracováván k dalšímu použití. Což znamená jako hnojivo, když splňuje hygienické normy, může být spalován v pecích nebo také skládkováním na skládkách [7].

3.1.5 Plynové hospodářství

Plynové hospodářství navazuje a je spjata s kalovým hospodářstvím. Ve vyhnívajících reaktorech dochází k vyhnívání nebo také k fermentaci kalů. To je proces rozkladu a přeměny organických látek bez přístupu vzduchu a za působení hnilobných bakterií. Na konci tohoto děje vzniká v reaktoru bioplyn. Který je odváděn a spalován v kogeneračních jednotkách. Zde se vyrábí elektrická energie a teplo [7].

3.2 Popis médií

V ČOV se pracuje s různými druhy medií. Je to převážně odpadní voda, různé formy kalů a také plynů. Zde si provedeme základní rozdělení a stručný popis jednotlivých medií. Pod názvem kal je myšlena suspenze pevných látek ve vodě. Tato pevná složka je také nazývána jako sušina. Obsah a složení sušiny je závislé na mnoha faktorech. Jako je např. druh a složení odpadních vod [7].

Odpadní voda – směs dešťové, povrchové a jinak znečištěné vody, která je přiváděna na čistírnu

Primární kal – nestabilizovaný kal oddělen sedimentací v usazovacích nádržích

Biologický kal – kal z biologického čištění

Aktivovaný kal – kal vzniklý v aktivační části biologického čištění

Surový kal – vznikl spojením primárního a aktivovaného kalu

Zahuštěný kal – vzniká gravitačním zahuštěním v zahušťovací nádrži

Vylisovaný kal – kal po vylisování na lisu

Vápněný kal – kal po přidání (hygienizaci) nehašeného vápna

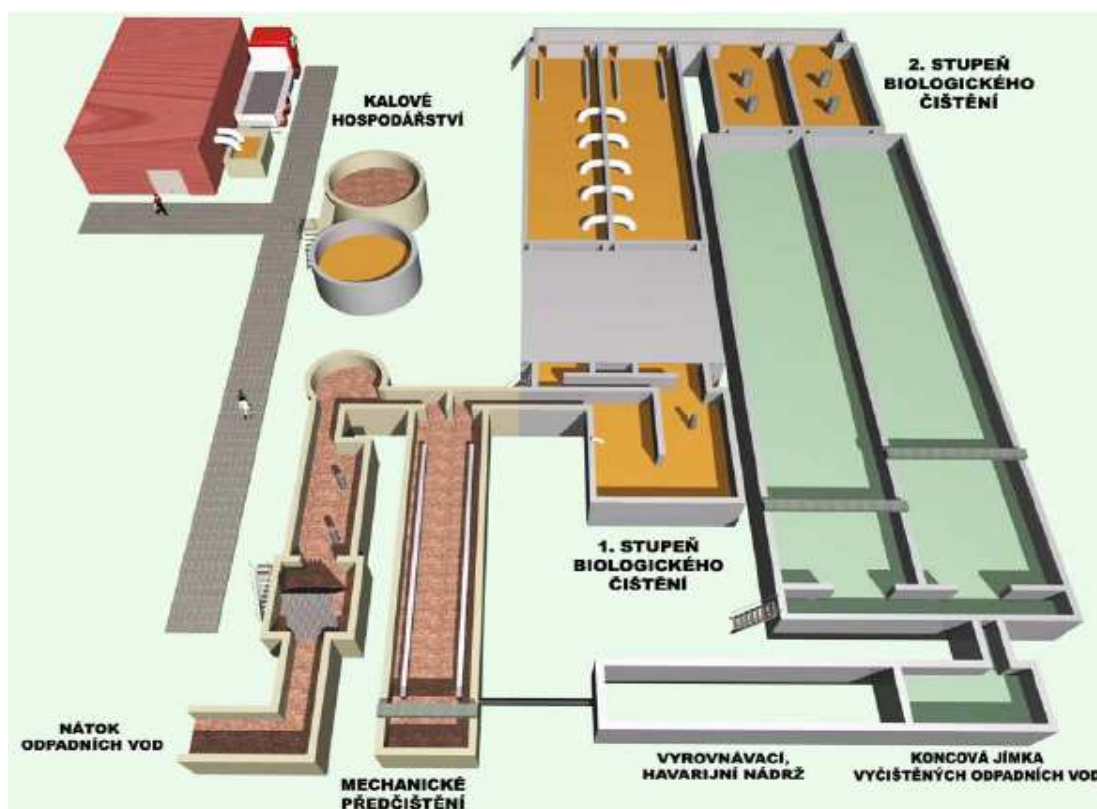
Vyhnilý kal – kal po aerobní nebo anaerobní stabilizaci, dojde zde ke snížení obsahu organických látek

Kalová voda – kapalina oddělená od vyhnilého kalu při odvodnění, vrací se do biologického stupně čistírny

Bioplyn – produkt fermentačního procesu, bezbarvý plyn složený převážně z metanu (CH_4) a oxidu uhličitého (CO_2)

3.3 Popis průmyslové čistírny

Zde bude stručně popsána existující průmyslová čistírna odpadních vod v podniku Biocel Paskov a.s., která zpracovává odpadní vodu z výroby buničiny a krmného droždí. Schéma této čistírny je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Schéma ČOV z výroby buničiny [8]

3.3.1 Mechanické čištění

Vzniklé odpadní vody z výroby jsou přiváděny do jednoho sběrného potrubí, které ústí do nátoky na čistírnu. Voda vstupuje do stabilizační nádrže, kde se zbaví rázů a dojde zde k vyrovnání teplot a pH. Poté je voda připravena k samotnému předčištění. Po průchodu pře česle, kde se odstraní hrubé nečistoty, jako zbytky štěpky, neprovařené části buničiny a suků natéká do neutralizační nádrže. Zde se dávkuje vápenné mléko ke snížení kyselosti vody. Kvůli většímu obsahu suspendovaných látek je zde zařazena sedimentační nádrž. Zde tyto látky sedimentují na dno nádrže a poté jsou odčerpány do nádrže s gravitačním zahuštěním. Tato suspenze látek ve vodě se nazývá primární kal. Plovoucí látky jsou také shrabovány a čerpány do nádrže pro zahuštění. Na konci usazovací nádrže je přepadový žlab, který slouží k odvodu vody v případě vzniku havarijního stavu. Voda je shromažďována v havarijní jímce a po odstranění havárie se přečerpá zpět na začátek ČOV. Po mechanickém předčištění putuje voda na biologický stupeň čištění [8].

3.3.2 Biologické čištění

Biologické čištění je rozděleno na dva stupně čištění. Do biologického stupně je také přiváděn aktivovaný kal z regenerace a přepadová voda ze zahušťovací nádrže. Přiváděná voda na 1. stupeň čištění prochází anoxickým selektorem. Ten slouží k potlačení vláknitého bytění aktivovaného kalu. Poté je aktivační směs vedena do kyslíkového oxického selektoru, do kterého je vháněn kyslík, který tuto směs homogenizuje v celém objemu. Po homogenizaci je aktivační směs odvedena do dvou aktivačních linií. Zde je vháněn kyslík pomocí ponorných areátorů, které slouží k aktivaci. Nespotebovaný kyslík, který by odcházel z hladiny pryč je vháněn zpět do aktivovaného kalu pomocí povrchových areátorů. To má za následek opakované provzdušňování aktivovaného kalu. Tento proces je náchylný na správné dodržování teploty a pH. Musí se zde také sledovat koncentrace uhlovodíků, aby nedocházelo k vytváření výbušné směsi. Aktivovaná směs odtéká pomocí přepadových žlabu do 2. stupně biologického čištění, který se skládá ze dvou linek aktivace a dvou podélných dosazovacích nádrží. Aktivační směs je přivedena na linky vzduchové aktivace. Ta se děje pomocí povrchových areátorů. Poté je tato směs přivedena do dosazovacích nádrží. Na dně těchto nádrží se usazuje kal, který je kontinuálně odváděn do regenerace. Plovoucí kal je shrabován štítem pojezdového mostu. A čerpán zpět do aktivačního procesu. Kal čerpáný z dosazovacích nádrží je shromažďován v regenerační nádrži. Zde je provzdušněn vzduchem. Takto regenerovaný kal je přiváděn před selektor. Přebytečný kal je odváděn do nádrže kalů ke kalolisům. Vyčištěná voda odtéká do koncové jímky [8].

3.3.3 Kalové hospodářství

Tato sekce v sobě zahrnuje spoustu úrovní zpracování. Je to zahušťovací nádrž, regenerační nádrž, homogenizační nádrž a kalové lisy. Do kalového hospodářství vstupují dva druhy kalů primární a přebytečný biologický kal. Primární kal je čerpán z usazovací nádrže do zahušťovací nádrže. Po gravitačním zahuštění vniká zahuštěný kal. Biologický kal se do zahušťovací nádrže nečerpá z důvodu možného zahňování. Biologický kal je přímo čerpán z regenerační nádrže před vstup na sítopásové lisy. Před samotným sítopásovým lisem jsou oba kaly smíchány v homogenizační nádrži a odtud čerpány na lisy na odvodnění. Odvodněný kal, má sušinu 18 – 24 % hm.. Kalová voda je čerpána zpět na začátek ČOV. Ke kalu je přidáváno nehašené vápno (CaO) pro hygienizaci a snížení zápachu. Tím dojde k usmrcení mikroorganismů, které způsobují hnilobný proces a chemické vázání síry. Vzniká tak síran nebo sulfid vápenatý. Takto vápněný kal je umístěn do kontejnerů a odvážen jako odpad k dalšímu zpracování [8].

3.4 Možnosti využití kalů

Kal je suspenze anorganických a organických látek ve vodě. V kalech je koncentrováno až 80 % původního znečištění. Jsou to hlavně patogenní mikroorganismy, těžké kovy a různé chemické látky. Náklady na kalové hospodářství představují značný podíl celkových provozních nákladů na ČOV. Zpracováním kalů z kalového hospodářství je velmi rozsáhlý problém. Neexistuje jedno univerzální řešení, které by bylo jak energeticky a ekonomicky nejvýhodnější. Při samotné likvidaci se musí brát v potaz mnoho různých faktorů, jako jsou fyzikální, chemické, biologické vlastnosti a také podmínky v dané lokalitě. Zpracování kalů lze rozdělit na dvě fáze a to úprava kalů (primární fáze) a konečné řešení (finální fáze). Základní dělení těchto fází je uvedeno níže [10].

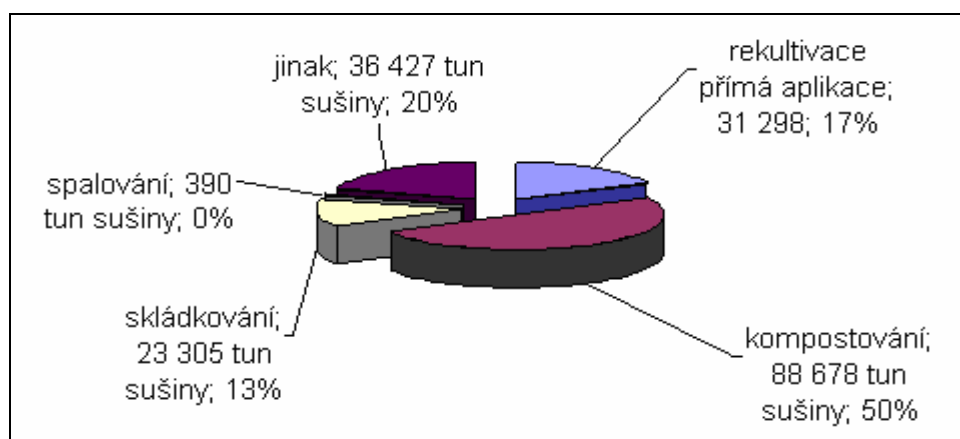
Úpravy kalů:

- Separace – třídění dle kvality
- Zahuštění a odvodnění – zvýšení obsahu sušiny
- Hygienizace – zneškodnění patogenů
- Anaerobní stabilizace – výroba bioplynu
- Sušení – zvýšení obsahu sušiny

Finální řešení:

- Hnojení – přímá aplikace na zemědělskou půdu
- Kompostování – přeměna organiky kalu na humus
- Spalování v cementářské peci – ekologická metoda
- Spalování – většinou přidáním výhřevnějšího paliva
- Skládkování – uložení na skládku

Produkce kalů v celé Evropě stoupá. Je to hlavně dáno rozšiřováním kanalizační sítě. Ve státech s rozvinutějším hospodářstvím. Je otázka nakládání s kaly brána velice vážně. Nynější snahou je úplný zákaz vypouštění kalu do povrchových vod a výrazně omezit skládkování. Neustále přísnější limity jsou pro používání kalů v zemědělství. A snahou je dosáhnout co největšího energetického využívání kalů. V České republice je tato problematika legislativně upravena zákonem č. 185/2001Sb., o odpadech a vyhláškou 382/2001 Sb., o používání kalů na zemědělské půdě. V roce 2003 bylo vyprodukováno 186 tis. tun sušiny kalů v České republice dle [11]. Převážná část 67 % byla využita v zemědělství, jak uvádí graf na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Způsoby nakládání s kalem v ČR v r.2003 [11]

Dále v diplomové práci se budu zabývat úpravou kalu. Konkrétně anaerobní metanizací. Je to jeden z možných způsobů stabilizace čistírenských kalů. V tomto procesu se zpracovává primární a aktivovaný kal. Proces probíhá ve vyhnívacích nádržích. Dochází při něm ke značnému hmotnostnímu a objemovému úbytku organické hmoty. Současně se produkuje bioplyn, který je spalován v kogeneračních jednotkách. Vyrobené teplo a elektrická energie je využívána na snížení provozních nákladů ČOV. Podrobněji tento postup stabilizace a vznik bioplynu bude popsán v následující kapitole.

4 VZNIK A VLASTNOSTI BIOPLYNU

Bioplyn lze zařadit do kategorie plyných směsí, které si jsou svým složením podobné. Patří sem zemní plyn, skládkový plyn, důlní plyn atd. Poprvé se začal cíleně vyrábět na přelomu 19. a 20. století a to z kalů čistíren odpadních vod. Proto se dříve nazýval kalový plyn. Bioplyn vzniká biologickou cestou za působení mikroorganismů. Tyto organismy můžeme nalézt pod povrchem země, v zažívacím traktu živočichů, hlavně přežvýkavců a ve skládkách komunálního odpadu. Jsou považovány za jedny z nejstarších životních forem na planetě Zemi. Samotný proces probíhá v přírodě samovolně nebo je záměrně vyvolán člověkem ve vyhnívacích reaktorech. Výsledek je vždy stejný, dochází ke vzniku bioplynu [18].

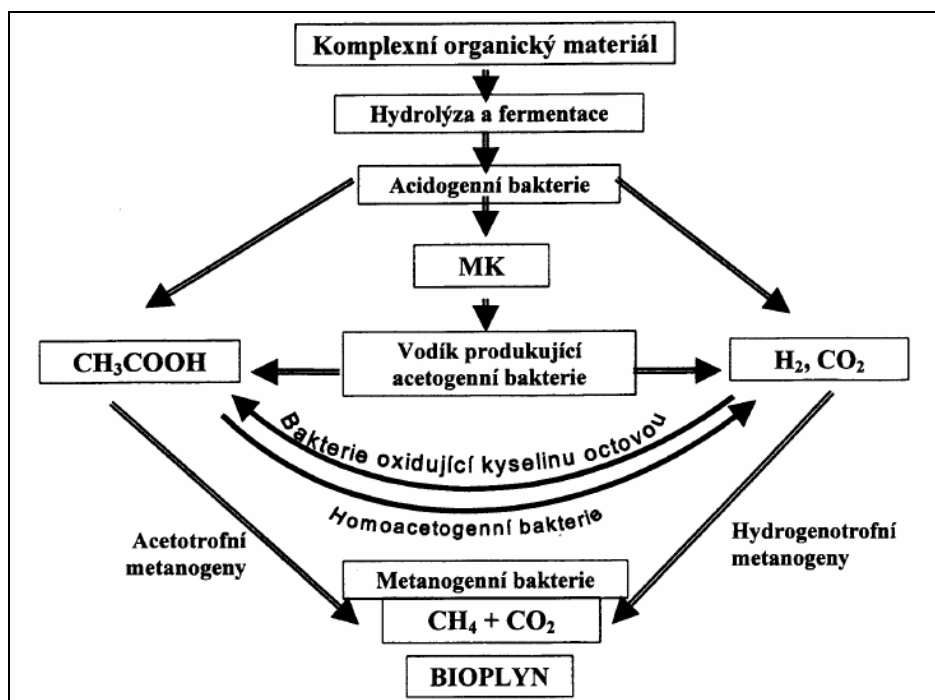
4.1 Vznik bioplynu

Bioplyn vzniká jako produkt vyhnívacího procesu, kde dochází k přeměně a rozkladu organických látek. Celý proces probíhá ve vlhkém prostředí bez přístupu kyslíku (anaerobní prostředí) za působení různých druhů anaerobních mikroorganismů. Při celém procesu nevzniká teplo, ale vytváří se hořlavý plyn – metan (CH_4). Současně také vzniká oxid uhličitý (CO_2) a voda. V odborné literatuře se můžeme setkat s různými názvy pro tento proces jako jsou – anaerobní fermentace, anaerobní digesce, metanová fermentace, metanové kvašení, biometanizace, bioganisifikace apod. Všechny termíny a názvy mají stejný význam [18].

Anaerobní fermentace je složitý biologický proces skládající se z mnoha dílčích a na sebe navazujících procesů, kde probíhají fyzikální a fyzikálně - chemické pochody. V každé fázi působí různé druhy anaerobních mikroorganismů. Produkt jedné skupiny organismů se stává potravou pro druhou skupinu mikroorganismu. Proto je velmi důležité, aby celý proces pracoval správně a nebyly zde velké výchyly a poruchy chodu celého systému. Většinou u organických materiálů je bioplyn získán rozkladem polysacharidů, lipidů a proteinů. A taky na podílu celulózy, hemicelulózy, ligninu a dalších přítomných látek. Podíl těchto látek je v různých materiálech odlišný. Proto i výtěžnost bioplynu je různá [18].

Při rozkladu proteinů (bílkovin) jsou do bioplynu uvolňovány sirnaté sloučeniny. Největší výtěžnosti bioplynu se dosahuje rozkladem lipidů (tuků). Jejich podíl v substrátu je zpravidla menší. Proto je hlavním zdrojem pro tvorbu metanu rozkládání polysacharidů. U materiálů rostlinného původu je rozklad ztížen přítomností ligninu. Tento materiál zpevňuje celou buněčnou strukturu. V anaerobním procesu je téměř neaktivní. Při vyšších obsazích zpomaluje rychlost celého procesu. V dřevní hmotě se obsah ligninu pohybuje

okolo 25 % dle [4]. Většina autorů rozděluje tento proces do čtyř základních fází, celý postup je popsán na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Schéma anaerobního rozkladu [12]

I. fáze – Hydrolyzá

Začíná v době kdy prostředí ještě obsahuje vzdušný kyslík. Podmínkou pro její nastartování je i dostatečná vlhkost – nad 50 % hmotnostního podílu. Není zde úplné anaerobní prostředí to znamená, že je zde přítomen kyslík. Hydrolytické mikroorganismy přeměňují polymery (polysacharidy, lipidy, proteiny, atd.) na jednodušší organické látky (monomery) [12].

II. fáze - Acidogeneze

Produkty hydrolyzy jsou dále rozkládány na jednodušší organické látky. Může zde být obsažen ještě zbytkový kyslík. Dochází k úplnému vytvoření anaerobního (bezokyslíkatého) prostředí. Vzniká oxid uhličitý (CO_2), vodík (H_2) a kyselina octová (CH_3COOH). Zde začínají svoji činnost metanogenní bakterie, které vytvářejí metan. Vznikají také organické látky jako jsou kyseliny, alkoholy apod. [12].

III. fáze - Acetogeneze

Tato fáze je často označována jako mezifáze. Probíhá oxidace produktů acidogeneze. Acidogenní bakterie přeměňují vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou (CH_3COOH). Také vzniká vodík a oxid uhličitý [12].

IV. fáze - Methanogeneze

Je to poslední fáze celého procesu obsahující metanogenní bakterie. Tyto bakterie rozkládají hlavně kyselinu octovou (CH_3COOH) na metan a oxid uhličitý. Další druh bakterií produkuje metan z vodíku a oxidu uhličitého [12].

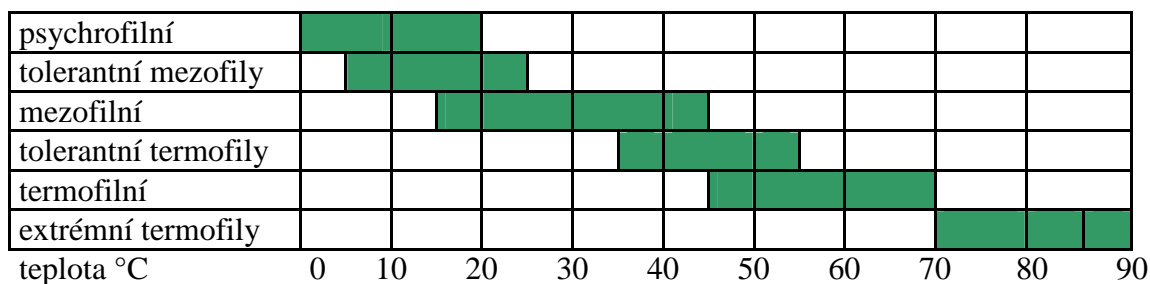
Pro stabilitu anaerobní fermentace je důležitá rovnováha mezi jednotlivými fázemi, které probíhají odlišnými kinematickými rychlostmi. Poslední (metanogení) fáze probíhá asi pětikrát pomaleji než ostatní fáze. K tomu se musí přihlížet při konstrukci vyhnívajících reaktorů a také při jejich plnění. Průměrně je doba zdržení 20 – 30 dní. Produkty po fermentaci jsou bioplyn a biologicky stabilizovaný kal.

4.2 Faktory ovlivňující tvorbu bioplynu

Na anaerobní rozklad organických látek má vliv řada faktorů. Tyto faktory mohou měnit životní prostředí mikroorganismů. K nejdůležitějším faktorům patří – teplota, pH, toxické látky, nutrienty atd. Všechny tyto faktory se musí brát na zřetel při provozu reaktoru.

4.2.1 Teplota

Teplota má velký vliv na anaerobní rozklad. Změnou teploty se mění rychlost probíhajících pochodů. Tím se naruší dynamická rovnováha procesu a to může vést až k havárii procesu. S rostoucí teplotou roste rychlost probíhajících procesů. Metan se vytváří ve velmi širokém pásmu teplot od 5 °C do 95 °C. Názvy jednotlivých pásem a šířka teplotních rozmezí je znázorněno na Obr. 4.2.



Obr. 4.2 Rozdělení teplotních pásem [12]

V praxi se nejvíce využívají dvě pásma. A to mezofilní oblast tj. 30 až 40 °C a termofilní oblast tj. 45 až 60 °C. Pro zachování požadované teploty se reaktory musí vyhřívat. Čím vyšší teploty použijeme tím jsou bakterie citlivější na teplotní výkyvy. V mezofilní oblasti snesou bakterie výkyv 2 až 3 °C, v termofilní oblasti jenom 1 °C. Lze konstatovat, že pro stabilitu procesu je výhodná konstantní teplota. Při velkém zatížení procesu je změna teploty velmi nebezpečná [12].

4.2.2 pH

Správný úzký rozsah hodnoty pH má velký vliv na růst a činnost metanogenních mikroorganismů. Nejlepší je, aby bylo pH udržováno v neutrální oblasti, což znamená 6,5 až 7,8. Pokud se hodnota pH dostane pod 6 nebo nad 8 je činnost mikroorganismů značně omezena. Hlavní příčinou výkyvu hodnoty pH bývá přetížení reaktoru. Je zde velký nárůst produkce kyselin, které nedokáží bakterie zpracovávat a tím se kyseliny hromadí v systému. Aby se tomu předcházelo je nutné řídit zatížení reaktoru. To se provádí kontrolou množství a složení mastných kyselin ve vstupním médiu. V případě zvýšení obsahu kyselin se přidávají alkalizační činidla [12].

4.2.3 *Nutriety*

Pro bezproblémový provoz reaktoru je potřeba mít správný poměr dusíku (N) a fosforu (P) ku organickým látkám. Živiny nebo-li organické látky jsou zde zastoupeny CHSK, která se určuje z bilance produkce biomasy. Výsledný poměr CHSK : N : P se pohybuje v rozmezí od 300 : 6,7 : 1 až 500 : 6,7 : 1. Vedle těchto látek je žádoucí přítomnost řady jiných mikronutrientů jako jsou sodík (Na), draslík (K), vápník (Ca), železo (Fe), hořčík (Mg) atd. Ve většině případech je obsah nutrietů ve vstupním médiu postačující [12].

4.2.4 *Toxické a inhibující látky*

Přítomnost těchto látek vede k nepříznivému vlivu na celý proces. Jsou to nejčastěji nižší mastné kyseliny a amoniak. Zda tyto látky budou inhibičně působit záleží na pH a jejich celkové koncentraci. Při nízkých hodnotách pH působí inhibičně mastné kyseliny a při vysokých hodnotách pH působí amoniak [15].

4.2.5 *Technologické faktory*

Nejdůležitější technologické faktory jsou míchání a doba zdržení. Obsah celého reaktoru musí být dobře promícháván, aby se dosáhlo homogenní struktury. To zaručuje maximální kontakt mezi substrátem a mikroorganismy. Co má za následek maximální fermentaci celého obsahu. Aby se dosáhlo dostatečné účinnosti celého rozkladu a nedocházelo k vyplavování mikroorganismů, musí se volit i optimální doba zdržení. Vzhledem k různorodosti bakterií se doba zdržení udává na 20 až 30 dní. Čím je substrát hůře rozložitelný tím je doba zdržení delší [15].

4.3 **Vlastnosti bioplynu**

Chemické složení bioplynu je značně ovlivněno složením vstupního substrátu. Na základě toho se pohybuje množství metanu a musí se brát v potaz i technologické procesy. Je rozdíl zda budeme bioplyn získávat ze skládky nebo stabilizace kalů.

Bioplyn se skládá hlavně z metanu (CH₄) a oxidu uhličitého (CO₂) jsou zde přítomny i menšinové složky jako vodík (H₂), dusík (N₂), sulfan (H₂S) a jiné. Dále je v bioplynu obsažena voda ve formě páry. Její množství závisí na teplotě vyhnívání. Množství zastoupení metanu a oxidu uhličitého se dle různých literatur liší. U metanu se pohybuje rozmezí od 50 % do 75% obj. a u oxidu uhličitého od 25 % do 50 % obj. [16]. Pokud je obsah oxidu uhličitého značně vysoký, znamená to, že nedošlo k vytvoření optimálních anaerobních podmínek. Díky značnému podílu metanu se dá bioplyn využívat jako energetická surovina. Na množství metanu v bioplynu závisí jeho výhřevnost. Bioplyn má výhřevnost v rozmezí od 13,72 do 27,44 MJ/m³ dle [17].

Metan jako majoritní zástupce v bioplynu je plyn bezbarvý a bez zápachu. Ve směsi se vzduchem tvoří výbušnou směs. Metan je lehčí než vzduch. Oxid uhličitý je bezbarvý, bez zápachu a těžší než vzduch. Výsledné vlastnosti bioplynu závisí na poměru těchto dvou plynů a také na teplotě a tlaku. Když přesáhne obsah metanu v bioplynu hranici 53 % [17] stává se lehčí než vzduch. Bioplyn může i často zapáchat. Na vině není metan ani oxid uhličitý, protože jsou bez zápachu. Zápach je způsoben sulfanem a dalšími sirnými a dusíkatými sloučeninami. Silněji zapáchá bioplyn ze skládek než z anaerobní stabilizace.

4.4 Úprava a čištění bioplynu

K efektivnímu využívání bioplynu je důležité co nejvíce odstranit nežádoucí prvky v bioplynu. Jsou to zejména halogenové uhlovodíky a sulfan. Chlorované a fluorované uhlovodíky jsou nebezpečné z hlediska nedokonalého spalování, protože vytvářejí dioxiny a dibenzofurany. Sulfan je nebezpečný, protože se přeměňuje na kyselinu sírovou (H_2SO_4), která kondenzuje ve spalovacím zařízení a způsobuje následnou korozi. Přítomnost sloučenin síry, chloru, fluoru a fosforu znemožňuje katalytickou redukci NO_x . Proto je také důležité odstranit vodu z bioplynu. Rozsah čištění závisí na plánovaném využívání bioplynu. Ke snížení prachu a kapalin z bioplynu se děje nejčastěji pomocí různých filtrů a cyklonů. Odstraňování chemických sloučenin se děje např. přidáváním solí železa do vstupujícího substrátu, adsorpcí na plynárenské hmotě, praní organickými rozpouštědly nebo řízeným dávkováním kyslíku do reaktoru [17]. Podrobněji o této problematice bude psáno v následující kapitole.

4.5 Materiály vhodné pro fermentaci

Pro anaerobní fermentaci se hodí jakýkoliv organický materiál, u kterého lze nastartovat metanové kvašení v průběhu procesu. Takový druh materiálu se všeobecně označuje pod názvem biomasa. Pod názvem biomasa si může představit organickou hmotu rostlinného a také živočišného původu. Mezi hlavní producenty biomasy nebo také bioodpadu patří: zemědělství, potravinářský, papírenský, živočišný průmysl, odpady z domácností a zahrad, čistírny odpadních vod apod. Všechny materiály musí splňovat následující podmínky:

- **Obsah sušiny** – optimální obsah sušiny u tuhých odpadů je 22 až 25 %, u tekutých 8 až 14 %. Když je obsah sušiny menší než 3 % u tekutých odpadů celý proces má zápornou energetickou bilanci. To znamená, že množství vyprodukovaného bioplynu nám nestačí na ohřev a udržení na zvolené teplotě. Proto je nutné přivádět externí zdroj paliva. Pozitivní energetickou bilanci získám, když se obsah sušiny pohybuje v rozmezí 3 až 5 % pro tekuté materiály. Horní hranicí obsahu sušiny je čerpatelnost daného materiálu. Hranice kdy ještě probíhá anaerobní fermentace je 50 % sušiny v substrátu [18].
- **Velikost pH** – za ideální hodnotu pH se uvádí interval od 6,5 do 7,8. Což je blízko neutrální hodnotě. V průběhu procesu se tento ukazatel mění. Na začátku procesu může poklesnout až na pH 4 až 6. Některé kmeny mikroorganismů mohou pracovat i při pH 8 až 9. Optimální hodnota pH se sleduje na vstupu do procesu a případně potřeby se upraví [18].
- **Poměr C : N** – je to poměr uhlíkatých a dusíkatých látek. Za optimální hodnotu se považuje pásmo v poměru 20 až 30 : 1. Zvýšený obsah dusíkatých látek má negativní vliv na složení bioplynu. Materiály s vyšším obsahem dusíku (N) jsou exkrementy všech hospodářských zvířat. Zvýšený obsah uhlíku (C) mají materiály rostlinného původu. Aby se dosáhlo optimálního poměru C : N jsou tyto materiály vzájemně míchány [18].

- **Nežádoucí příměs** – je látka nebo skupina látek, které potlačují nebo jiným způsobem omezují normální průběh fermentačního procesu. Jsou to různá antibiotika, léčiva pro zvířata, krmné směsi pro zvířata apod. Do anaerobního reaktoru také nepatří materiály ve kterých již byl nastartován a běží hnilobný proces [18].
- **Předchozí manipulace** – není vhodné používat materiál, který byl už dlouhodobě skladován. Mohl zde nastat aerobní proces (kompostace). Nebo materiál změnil svoje chemicko-fyzikální vlastnosti [18].

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V této části je popsán samotný pokus. Nejdříve je popsán samotný kal a jeho vlastnosti. Poté seznámení s průběhem a výsledky předchozích fermentačních zkoušek. Vyhodnocení předešlých pokusů. Navrnutí možných řešení kofermentace kalu s jiným materiálem. Za účelem maximální a energeticky výhodné produkce bioplynu. Také zde jsou popsány laboratorní zkoušky fermentace kalu a dosažené výsledky.

5.1 Vlastnosti kalu

Kal, který je zde popsán vzniká při výrobě buničiny a krmného droždí v podniku Biocel Paskov a.s.. Kaly vznikají při čištění odpadních vod z výrobního provozu na ČOV, která je součástí areálu podniku. Vznikají zde dva druhy kalu a to primární a biologický kal. Primární kal obsahuje krátká vlákna celulózy z procesu úpravy dřevní štěpky. Biologický kal vzniká na aerobní části ČOV. Oba kaly jsou čerpaný do nádrže, kde jsou smíchány. Poté je kal zahuštěn na cca 7 % hm. Následuje přeprava, kde je odvodněn na cca 20 % sušiny [21]. Vlastnosti takto odvodněného kalu jsou v Tab. 5.1.

Sušina	15 až 30 % hm.
Popel z absolutní sušiny	5 až 30 % hm.
Biologický kal v sušině	50 až 90 % hm.
Mechanický primární kal v sušině	5 až 50 % hm.
pH	10 až 13
Objemová hmotnost	900 až 1200 kg.m ⁻³
Cizorodé částice	max. 1,0 % hm.

Tab. 5.1 Vlastnosti odvodněného kalu [19]

Z tabulky vyplývá, že kal je vhodným materiálem pro anaerobní fermentaci. Obsah sušiny je dobrý, v případě potřeby se dá snížit. Hodnota pH je zvýšená, v důsledku vápnění kalu. $CHSK_{Cr}$ 37,73 g/l [36]. Vzhled kalu připomíná lepivou hmotu pastovitěho charakteru. Barva je hnědá, jsou zde patrná krátká jemná vlákna. Kal je vidět na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Odvodněný kal

Také byl udělán laboratorní rozbor kalu. Jeho výsledky jsou uvedeny v Tab. 5.2.

	Vzorek v dodaném stavu	Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
Voda hrubá [% hm.]	78,04	-	-
Voda zbytková [% hm.]	2,32	-	-
Voda celková [% hm.]	80,36	-	-
Popel [% hm.]	1,97	10,01	-
Hořlavina [% hm.]	17,67	89,99	100,00
Spalné teplo při 25°C [kJ.kg ⁻¹]	3817	19436	21598
Výhřevnost při 25°C [kJ.kg ⁻¹]	1582	18091	20103
Prchavá hořlavina [% hm.]	14,97	76,24	84,72
Neprchavá hořlavina [% hm.]	2,70	13,75	15,28
Vodík H [% hm.]	1,20	6,13	6,81
Uhlík C [% hm.]	8,68	44,18	49,09
Dusík N [% hm.]	1,12	5,70	6,33
Kyslík O _d [% hm.]	6,53	33,24	36,24
Chlor Cl [% hm.]	0,01	0,06	0,07
Síra prchavá S _{vk} [% hm.]	0,13	0,68	0,76
Síra v popelu S _a [% hm.]	0,01	0,04	-
Síra veškerá S _t [% hm.]	0,14	0,72	-

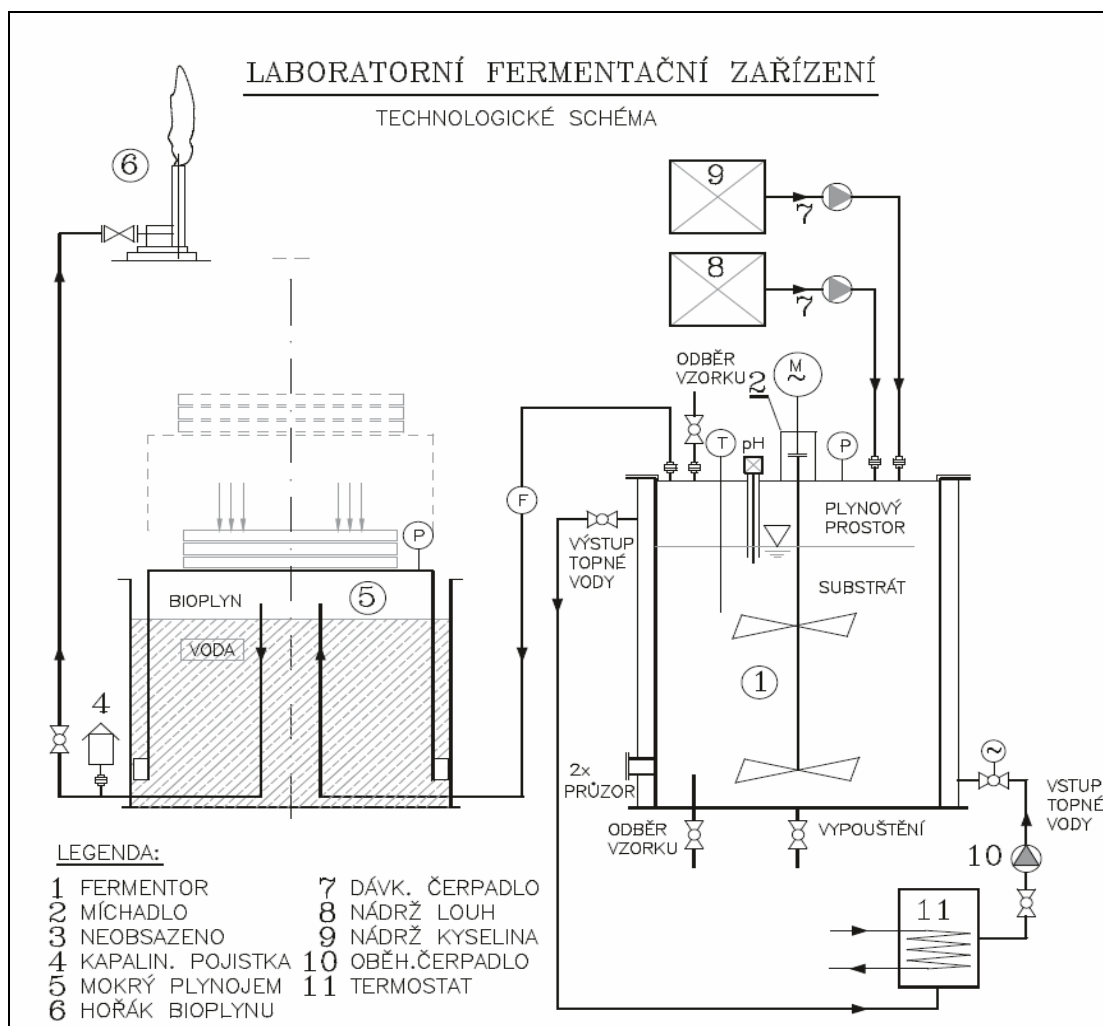
Tab. 5.2 Výsledky rozboru kalu [20]

Výsledky rozboru prokázaly vhodnost tohoto materiálu k anaerobní fermentaci. Díky přítomnosti organických látek. Z rozboru také vyplývá, že kal má nízký poměr C : N. A to konkrétně C : N = 7,75. Za optimální hodnotu pro anaerobní fermentaci se považuje pásmo v rozmezí 20 až 30. Abychom dosáhli optimálního poměru C : N musíme přidat vhodný materiál, který má daný poměr vyšší. Volbou vhodného materiálu a následně laboratornímu ověření se věnuji v následujících kapitolách. Je brán zřetel na nejvhodnější materiál, ale i na ekonomickou a lokální dostupnost [21].

5.2 Popis zařízení v laboratoři

Laboratorní pokusy jsou zaměřeny na vhodnou volbu a kofermentaci zvoleného materiálu s kalem z výroby buničiny a krmného droždí v podniku Biocel Paskov a.s.. Výsledky pokusu jsou zpracovány a zhodnoceny níže.

Pro udržování správných anaerobních podmínek a kontroly výtěžnosti bioplynu byla použita laboratorní fermentační jednotka. Tato jednotka se skládá z fermentoru o užitém objemu 25 l, mokrého plynojemu, plynoměru, termostatu sloužící k ohřevu substrátu a sondy na měření teploty a pH napojenými na počítač. Technologické schéma celé sestavy je na **Obr. 5.2** a skutečný vzhled celé jednotky je zobrazen na obr. 5.3.



Obr. 5.2 Technologické schéma fermentační jednotky [21]



Obr. 5.3 Fermentační jednotka

Fermentor je dvouplášťová nádoba vyrobená z nerezové oceli. Celý je izolován, aby se snížily co nejvíce tepelné ztráty. Vršek nádoby je zakryt odnímatelným víkem. Na spodní straně jsou umístěna dvě hrdla. Jedno slouží k vypouštění substrátu a druhé k odběru vzorků. Na plášti jsou umístěna průhledítka. Uvnitř válcové nádoby jsou svislé zářezky, které zabraňují roztočení substrátu při míchání. Na víku je umístěno dvouvtulové míchadlo o průměru lopatek 100 mm a uspořádání 2 x 4 listy po 45°. Pohon míchadla zajišťuje asynchronní trojfázový přírubový elektromotor o výkonu 550 W při otáčkách 915 min⁻¹. Cíla sestava víka, míchadla a elektromotoru je utěsněna, aby nedocházelo k úniku bioplynu. Elektromotor je osazen frekvenčním měničem pro plynulou regulaci otáček. Konstantní teplota ve fermentoru je udržována díky přívodu topné vody do meziplášťového prostoru. Voda je ohřívána termostatem s topnou spirálou. Dále je v sestavě čerpadlo a regulační teploměr.

Vznikající bioplyn je zachytáván do mokrého plynojemu. Plynojem je složen z plastového válce, který je naplněn vodou a zvonu. Pohyb zvonu je vertikální. Směr pohybu je dán množstvím produkovaného respektive odebíraného bioplynu. Aby nedošlo k vysunutí zvonu je plynojem opatřen záchytným systémem. Fermentor je chráněn před poškozením od zvýšeného přetlaku kapalinovou pojistkou, která je součástí provozu a chrání celou sestavu. Produkce bioplynu je měřena plynoměrem. Pracovní tlak ve fermentoru je odečítán z analogového manometru. Teplota a pH jsou měřeny sondami a data zasílána do počítače, kde jsou zpracovány programem Magic XBC [24].

Součástí každého pokusu jsou informace o:

- Složení vstupní směsi
- Obsah sušiny kalu
- Obsah organiky v kalu
- Výtěžnost bioplynu
- Složení bioplynu

Složení vstupní směsi

Složení vstupní směsi se podrobněji zabývám v další kapitole. Hledám optimální složení, aby se dosáhlo co největší výtěžnosti bioplynu bez přítomnosti sulfanu. Hodnoty vstupního kalu, přidávaného substrátu jsou zapisovány a je hledán optimální poměr mezi nimi. Měření hodnot, vážením na elektrické váze, bylo prováděno při zakládání vsázky do fermentoru a pokaždé při jeho průběžném plnění.

Obsah sušiny kalu

Obsah sušiny kalu se zjistí pomocí sušících vah na obr. 5.4. Bylo postupováno dle normy ČSN 44 1375. Počáteční teplota sušení je 105 °C. Potřebný vzorek byl odebrán z fermentoru a umístěn na plechovou mističku poté vložen do sušících vah. Celý proces probíhá automaticky a ustane po odpaření veškeré vody ze vzorku.



Obr. 5.4. Sušící váhy

Výtěžnost bioplynu

Z produkovaného množství bioplynu, množství organické sušiny a času byla vypočtena výtěžnost bioplynu z 1 kg přivedené organické sušiny. Tato hodnota vypovídá o kvalitě probíhajícího procesu. Protože vznik a množství bioplynu je závislé na množství organiky v kalu.

Složení bioplynu

Složení bioplynu bylo určováno pomocí víceplynového měřícího přístroje Dräger X-am 7000 obr. 5.5. Přístroj umožňuje stanovit množství metanu, oxidu uhličitého, kyslíku a sulfanu ve vzniklém bioplynu. Po připojení přístroje k přívodu bioplynu dojde automaticky vyhodnocení podílu jednotlivých složek. Množství těchto látek je důležité k vyhodnocování správnosti anaerobního procesu a zhodnocení volby kofermentačního substrátu.



Obr. 5.5 Dräger X-am 7000 [22]

Obsah organiky v kalu

Obsah organiky v kalu byl zjišťován metodou ztráty žíháním (ZŽ). Je k tomu zapotřebí žíhací pec, která je na obr. 5.6. Bylo postupováno dle normy ČSN EN 12879. Podstata zkoušky spočívá v žíhání vysušeného kalu v peci při teplotě 550 °C ± 25 °C. Ztráta žíháním se vypočte z rozdílů hmotností kelímků se sušinou a je vyjádřena v procentech. Dle následujícího vztahu rov. 5.1.

$$w_v = \frac{(m_b - m_c)}{(m_b - m_a)} \cdot 100 \quad (\text{Rov. 5.1})$$

kde: w_v – ztráta žíháním sušiny kalu [%]
 m_a – hmotnost prázdného kelímku [g]
 m_b – hmotnost kelímku se sušinou [g]
 m_c – hmotnost kelímku se zpopelněnou sušinou [g]



Obr. 5.6 Žihací pec

5.3 Předchozí pokusy

V předešlých letech byly provedeny na ústavu ÚPEI pokusy s kalem z výroby buničiny a krmného droždí z podniku Biocel Paskov a.s.. Fermentační zkoušky byly provedeny v rámci diplomové práce Kateřiny Zemanové pod vedením Ing. Jaroslava Boráně, PhD [8]. Moje práce navazuje na ty to pokusy. Nyní se seznámíme s výsledky předchozích měření.

V prvním pokusu byl použit samotný odvodněný nevápněný kal z výroby buničiny. Bylo zvoleno mezofilní pásmo teplot. A nebylo použito žádné inokulum. Po šesti dnech byla produkce bioplynu nulová a pokus byl ukončen. Průměrný obsah CH_4 v bioplynu byl 44 % [8].

Ve druhém pokusu byl využit stejný kal z Paskova plus byl přidán kal z ČOV Brno – Modřice. Bylo opět zvoleno mezofilní pásmo teplot. Po devíti dnech byl pokus ukončen, protože se už neprodukoval žádný bioplyn. Průměrný obsah CH_4 v bioplynu byl 29,5 % [8].

Z těchto informací lze usuzovat, že fermentační proces neprobíhal standardně. Protože obvyklá doba zdržení vsázky ve fermentoru je 20 až 30 dní. Nízká produkce bioplynu ukazuje, že došlo k nízkému odbourání organické hmoty. A tím i k malému objemovému úbytku kalu. Další příčinou proč byl podíl CH_4 v bioplynu malý byla přítomnost sulfanu. Sírné sloučeniny se do kalu dostávají z výroby buničiny. Protože je používán kyselý proces. Důkazy o přítomnosti sulfanu byly potvrzeny měřicím přístrojem Dräger.

5.4 Síra v anaerobním procesu

Z výsledků z předchozích pokusů je zřejmé, že obsah síry má vliv na produkci bioplynu. Proto je snaha výskytu síry a jejich sloučenin v anaerobním procesu zabránit. V aerobním čistírenském procesu sírany procházejí čistírenskou linkou beze změny, sulfidy a síra v organických sloučeninách jsou oxidovány. V odtoku z ČOV pouze zvyšují množství rozpuštěných anorganických solí. Jen malá část přechází a zůstává v kalu. Pokud je však takový materiál vstupem do reaktoru anaerobní technologie, ať už se jedná o odpadní vody

nebo kaly, je potom zdrojem síry a sulfanu. Záleží na vstupních koncentracích a na podmínkách prostředí, kolik sulfanu přejde do bioplynu [25].

V anaerobním prostředí dochází k redukci síranů na sulfidickou síru při oxidaci organických látek za působení sírných bakterií. Sulfidická síra je obvykle jediným produktem metabolismu těchto mikroorganismů. Za aerobních podmínek jsou sulfidy energeticky stabilní formou síry. Při anaerobním čištění odpadních vod i při anaerobní stabilizaci kalů se často vyskytují případy, kdy vedle vysoké koncentrace organických látek obsahují vody a kaly značné množství sírných sloučenin v různých formách. Jsou to například odpadní vody z lihovarů, papíren, droždářen a farmaceutického průmyslu, které obsahují vysoké koncentrace síranů. Všechny anaerobní reaktory mohou být použity pro čištění síranových vod s organickým znečištěním, problémem je však nízká produkce bioplynu [25].

Záleží však na aktuálních podmínkách procesu (teplotě, pH, přítomnosti těžkých kovů apod.) v jakých formách se bude síra vyskytovat. Sulfidy v rozpuštěné formě jsou považovány za toxické pro mnoho mikroorganismů (hlavně metanogenních), při zvýšené koncentraci sulfidů je proces anaerobní fermentace značně omezován. Také zpomalují nebo zastavují produkci metanu při koncentraci větší 0,05 % obj.. Sulfidy nejsou škodlivé jen svou toxicitou, ale jsou zdrojem plynného sulfanu v bioplynu. Všechna anaerobní zařízení mohou být použita pro zpracování materiálů s obsahem síry, ovšem za předpokladu monitorování koncentrací H_2S v kapalině nebo plynu. To znamená omezit všechny vlivy, které by mohly působit změny v teplotě, pH apod. nebo hledání vhodného složení vstupního substrátu. Pokud nelze zamezit přechodu sulfanu do plynné fáze udržováním stabilních provozních podmínek nebo kofermentací, je třeba použít některé z metod odstraňování sulfanu z bioplynu [25]. Možné návrhy řešení jsou popsány níže.

Při využívání bioplynu k energetickým účelům je obsah sulfanu velmi důležitým faktorem. Při spalování bioplynu je sulfan přeměňován na oxid siřičitý a následně oxid sírový, který při sloučení s vodní párou vytváří kyselinu sírovou. Která je silná žíravina, způsobující degradaci běžných kovů. Tato kyselina dokáže také při kontaktu narušit materiály částí kogenerační jednotky. Spalovaný bioplyn v kogeneračních jednotkách je z tohoto důvodu vhodné před samotným spálením zbavit sírných sloučenin. Tyto látky a jejich sloučeniny napadají korozi kovové součásti spalovacího motoru, potrubí, nádrží a vyvolávají emise zápachu. Kyselina sírová také zhoršuje mazací vlastnosti motorového oleje [13].

5.5 Návrh možných řešení

Metody snižování koncentrace sulfanu v bioplynu se soustřeďují buď na minimalizaci vzniku rozpuštěných sulfidů přímo v anaerobním reaktoru nebo na odstraňování sulfanu až ze vzniklého bioplynu. V reaktoru lze dosáhnout snížení sírných sloučenin volbou vhodných podmínek nebo přidáváním vhodného substrátu. U plynné formy sulfidu se dají využít metody, které jsou využívány v plynárenství. Potřebujeme dosáhnout, aby obsahu sulfanu v bioplynu se pohyboval okolo 500 mg/m^3 . Takle hranice je požadována výrobcí kogeneračních jednotek dle [28].

Zde jsou uvedeny možné návrhy řešení jak omezit výskyt sulfanu v anaerobním reaktoru tak i v bioplynu.

V anaerobním procesu:

- termofilní pásmo teplot
- kofermentace
- mikroaerace

V samotném bioplynu:

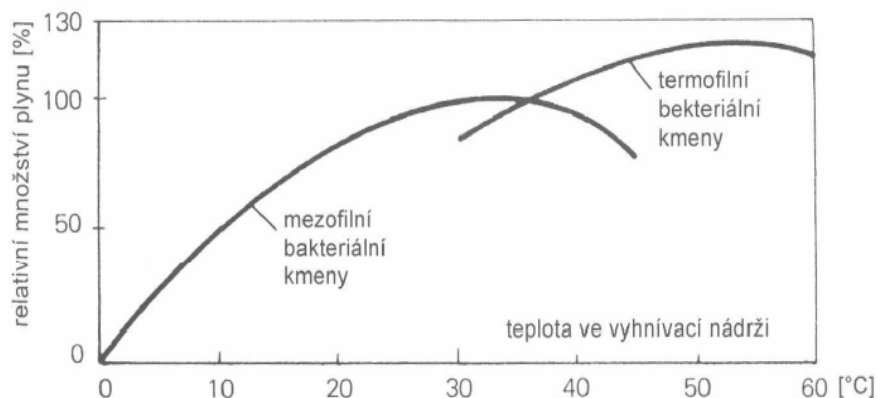
- adsorpce na aktivním uhlí

Metody na snižování sulfanu v anaerobním prostředí nebo v bioplynu jsou různorodé a existuje více možností jak dosáhnout požadovaného efektu. U anaerobního reaktoru je další možnost udržovat pH v optimálních podmínkách (pH 6,5 – 7,8), přidáváním železnatých solí apod. Při čištění samotného bioplynu lze využít praním alkalickými roztoky, praním organickými rozpouštědly apod. Další způsoby jsou popsány v literatuře [17], [16] a [27].

5.5.1 Termofilní pásmo teplot

Teplota je jedním z dominantních faktorů, které silně ovlivňují činnost mikroorganismů. Při nižších teplotách je aktivita bakterií menší. Naopak při vysokých teplotách je aktivita také omezena, až může působit destruktivně na mikroorganismy. U ČOV se využívají dvě pásma teplot. A to mezofilní v rozmezí teplot 30 – 40 °C a termofilní v rozmezí teplot 45 – 60 °C. Předchozí testy na ÚPEI ukázaly, že fermentace v mezofilním pásmu teplot neměla uspokojivé výsledky. Tady se otevírá prostor pro vyzkoušení fermentace kalu v termofilním pásmu teplot. Konkrétně při 55 °C [29].

Termofilní anaerobní fermentace má určité výhody v porovnání s mezofilním procesem. Zvýšená teplota omezuje činnost sírných bakterií a tím i produkci sulfanu. Další výhodou proti mezofilnímu procesu je zvýšená rychlost rozkladu organických látek. To vede k vyšší účinnosti celého procesu a tím i vyšší produkci bioplynu. To umožňuje větší zatížení reaktoru. Vyšší produkce bioplynu dle obr. 5.7, zlepšuje energetickou a ekonomickou bilanci celého zařízení. Produkce stabilizovaného kalu je také menší díky intenzivnějšímu rozkladu organických látek. Nevýhodou je zvýšení nároků na udržení optimálních podmínek, hlavně teplotních. To klade větší nároky na ohřev reaktorů a jejich kvalitní izolaci, aby zbytečně nevznikaly vysoké ztráty tepla. Pro zachování požadované teploty se reaktory musí vyhřívat. Čím vyšší teploty použijeme tím jsou bakterie citlivější na teplotní výkyvy. V termofilní oblasti snesou mikroorganismy výkyv cca 1 °C. Dále je důležité pro správný chod termofilního procesu aktivní a dobře adaptovaná termofilní kultura mikroorganismů. Celý proces musí být pečlivě sledován a řízen, aby se dosáhlo požadovaných výsledků [29].



Obr. 5.7 Vliv teploty na produkci bioplynu [30]

Další výhodou termofilního procesu je hygienizační účinek na vyhnílý kal. To znamená, zničení většiny patogenů obsažených v kalu. Díky zvýšené teplotě je možné kal lépe využít při následném zpracování. Snížení viskozity fermentované směsi, má za následek menší energetické nároky na míchání celého reaktoru a odstraní se také problémy s pěněním v reaktoru. [29].

5.5.2 Kofermentace

Kofermentace je technologie, při které dochází k fermentaci různých druhů substrátů v anaerobním procesu. Do základního materiálu, který je majoritní složkou v reaktoru (v našem případě kal z výroby buničiny), je přidán další biologicky rozložitelný odpad. Za účelem zlepšení průběhu procesu a zvýšení výtěžnosti bioplynu. Tento způsob řešení má taky své specifické problémy. Hlavní je správná volba substrátu a také správné dávkování, aby požadovaný efekt byl co nejúčinnější. Do úvah o nejlepším substrátu se musí brát také hledisko ekonomické a lokální dostupnosti.

Výsledky rozboru kalu z Biocelu Paskov a.s. uvedené v kapitole 5.1 prokázaly, že kal je vhodný pro fermentaci. Rozbor také ukázal, že kal má nízký poměr C : N. Konkrétní hodnota C : N = 7,75. Za optimální hodnotu pro anaerobní fermentaci je považováno pásmo v rozmezí 20 až 30. Abychom dosáhli optimálního poměru C : N musíme přidat vhodný materiál, který má daný poměr vyšší. S ohledem na lokální možnosti byly vybrány následující materiály uvedené v Tab. 5.3.

Druh materiálu	C : N
Odpady z jídelen	23
Bramborové olupky	13
Odpady z lihovaru	14
Odpady z mlékárny	14-27
Zelená hmota (tráva)	60
Masokostní moučka	4,8 - 10

Tab. 5.3 Materiál pro kofermentaci [16], [28], [41]

Každý materiál má jistá omezení, která se musejí brát na zřetel. Odlišnosti vycházejí jak z podstaty materiálu, zpracování a možnosti dopravy.

Zelená hmota – pro bezproblémovou fermentaci je nutné předchozí drcení. Tráva se musí rozdrtit na co nejmenší kousky, aby reakční plocha byla co největší. Také je zde kritérium na způsob dávkování, zejména na vhodnosti čerpadla. Kontrola důkladného promíchání celého reaktoru a zabraňování tvorbě usazenin nebo plovoucí vrstvy. Tráva není dostupná po celý rok. Z toho vyplývá nutnost mít zásoby na provoz. V případě nedostatku by se musela tráva nakupovat od zemědělských družstev. Zelená hmota se může vzít se sečení areálu Biocelu Paskov a případně sečení veřejné zeleně z okolních obcí [12].

Odpady z jídelen – tyto odpady vykazují vysokou výtěžnost bioplynu. Je zde zastoupeno vysoké procento tuků. Problém nastává s hygienickými požadavky. Kofermentace odpadů z jídelen vyžaduje tzv. hygienizaci, která je požadována legislativou. Spočívá v termické přeúpravě substrátu, ohřátí na teplotu 70 °C a výdrže na této teplotě po dobu jedné hodiny. Dochází tak k likvidaci patogenních mikroorganismů. Se zásobováním odpadů by nebyl problém, protože podnik má vlastní závodní jídelnu [12].

Odpady z lihovaru – jedná se o tekuté odpady. Odpadá tak nutnost stavět zařízení na drcení nebo homogenizaci. Nejsou zde asi problémy z hygienizaci. Tyto odpady se musí dovážet z Frýdku – Místku, kde je místní lihovar. To jsou největší náklady.

Bramborové olupky – je to odpad z oškrabování brambor. Konzistence kašovitá hmota. Tuto hmotu není nutné mechanicky zpracovávat a jinak upravovat. Dovoz odpadu by se realizoval z obce Fryčovice, kde sídlí firma na zpracování zeleniny.

Odpady z mlékárny – jedná se o tekuté odpady. Není nutné je již dále mechanicky zpracovávat ani hygienizovat. Dovoz by se uskutečnil v cisternách z Frýdku – Místku kde je mlékárna. Jediné náklady by souvisely s dopravou.

Masokostní močka – jde o tuhý odpad, přesněji prášek. Má vysoký podíl tuků a tím je zaručená vysoká produkce bioplynu. Nevýhoda je abrazivost tohoto materiálu a dodržování hygienických předpisů a norem pro nakládání s masokostní moučkou. Dochází k zvýšenému opotřebení mechanických součástí reaktoru. Náklady jsou spojené s dopravou masokostní moučky do areálu podniku.

5.5.3 Mikroaerace

Tahle metoda je založena na řízeném dávkování vzduchu (kyslíku) do anaerobního systému. Za účelem zlepšení kvality bioplynu i stabilizovaného kalu. Ve vyhnívajícím reaktoru jsou kultury anaerobních bakterií (metanogenních), které mohou přežít i při nízké koncentraci kyslíku. Jejich správná činnost, ale závisí na přítomnosti mikroaerofilních kultur (sirné bakterie). Tyto mikroorganismy jsou schopny přebytečný kyslík zcela spotřebovat. Množství přiváděného vzduchu musí být regulováno, aby bakterie mohly beze zbytku spotřebovat všechny kyslík a nedocházelo k omezení ostatních mikroorganismů [26].

Dávkování vzduchu do anaerobní části reaktoru vzniká uvnitř tzv. mikroaerobní prostředí. Toto prostředí zlepšuje odstraňování sulfidů z prostoru reaktoru. Dávkování vzduchu musí být správně nastaveno a regulováno. Protože nesprávné množství vzduchu má vliv na následující faktory [26]:

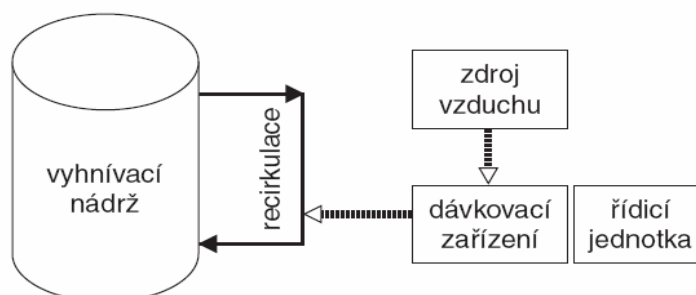
Velké množství vzduchu:

- odumírání organismu anaerobního rozkladu – zastavení celého procesu
- oxidace snadno rozložitelných organických materiálů – malá produkce bioplynu
- kontaminace bioplynu kyslíkem – nízká kvalita bioplynu

Malé množství vzduchu:

- neodstranění veškerého sulfidu – nízká kvalita bioplynu [26]

Technické provedení je velmi jednoduché a nepotřebuje rozsáhlé stavební ani technologické úpravy stávajícího zařízení. Vše se omezuje na správnou volbu kompresoru a řídicí jednotku, jak je schématicky znázorněno na obr. 5.8.

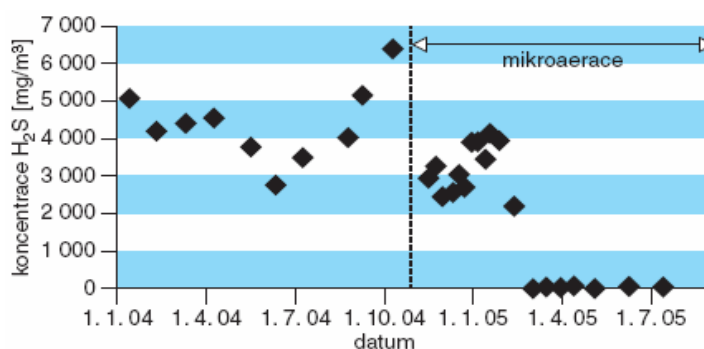


Obr. 5.8 Schéma odsiřování [27]

Při samotné realizaci je možno využít různá místa pro přivádění vzduchu do reaktoru. Jako je např. dávkování do vstupního kalu, přímo do reaktoru, do recirkulace kalu (obr. 5.8), do bioplynu, který bude využíván k míchání vyhnívací nádrže. Výhodou je také nenáročná obsluha. Náklady spojené s pořízením a provozem jsou minimální [26].

Při nižších koncentracích sulfanu v bioplynu stačí dávkování do plynového prostoru anaerobního reaktoru. Oxidace siřných sloučenin probíhá na stěnách plynového prostoru. Pokud jsou koncentrace sulfanu vyšší je dávkování vzduchu do plynového prostoru neúčinné. Aby se účinnost zvýšila je zapotřebí přímý kontakt vzduchu s biomasou. Také je důležitá dobrá homogenizace celého objemu reaktoru [26].

Celkově má tato metoda velkou účinnost. V literatuře [26] se uvádí až 99 % odstranění celkové síry. Velký význam hraje přesné a řízené dávkování vzduchu do anaerobní části. V této oblasti bylo provedeno rozsáhlé dlouhodobé měření. Výsledky ročního provozu odsiřování za pomoci mikroaerace jsou uvedeny na obr. 5.9.



Obr. 5.9 Vývoj koncentrace sulfanu [27]

Z výsledků vyplývá, že velmi důležitá je etapa zapracování procesu. Jde o proces založený na specifické biochemické aktivitě mikroorganismů. Po zahájení řízeného dávkování vzduchu poklesla koncentrace sulfanu velmi významně [26]. Praktické zkušenosti s mikroaerací mají na bioplynové stanici v Kněžicích. Koncentrace síry v anaerobní části před dávkování vzduchu se pohybovala 1000 – 1600 mg H₂S/m³ a po zavedení mikroaerace klesla na 100 – 250 mg/m³ což znamená, že účinnost odsiřování byla 85 – 95 %. Další zkušenosti jsou z bioplynové stanice RAB Třeboň. Tam se koncentrace síry pohybovala 2 900 – 3 400 mg H₂S/m³ a po instalaci mikroaerace klesla 300 – 400 mg H₂S/m³. Celková účinnost odsiřování byla okolo 90 % [28].

Závěrem lze říci, že tato metoda slouží k velkému snížení koncentrací síry v anaerobním prostředí. Výhody jsou: není potřeba stavba nových technologických zařízení, stačí instalace relativně jednoduchého kontrolního dávkovacího zařízení, provozně nenáročná a zcela automatizovaná, pořizovací cena je velmi příznivá. Za nevýhodu lze považovat dobrou znalost anaerobního procesu a specifických vlastností anaerobního kalu [27].

5.5.4 Adsorpce na aktivním uhlí

Adsorpce je separační proces, při kterém dochází k výměně hmoty. Plynná látka ze směsi plynů se hromadí na povrchu pevné látky, díky účinku mezipovrchových přitažlivých sil. Rozlišují se dva druhy adsorpce. První je fyzikální adsorpce a druhá chemisorpce. Pevná látka s kapilární strukturou na jejímž povrchu dochází k adsorpci se nazývá adsorbent. A látka, která je vázána (adsorbována) se nazývá adsorbát. Látky schopné adsorpce jsou např. aktivní uhlí nebo silikagely [31].

Adsorpční metody prokázaly svoje výhody zejména při odstraňování sulfanu z relativně malých objemů bioplynu. Při této metodě se sulfan zachycuje na pevných adsorbentech. Tento postup využívá speciální impregnované uhlí, které zaručuje oxidaci sulfanu na elementární síru i bez přítomnosti kyslíku v bioplynu. Díky impregnační přísadě lze zajistit vysokou účinnost odsiřování plynu, ale i dost vysoké adsorpční kapacity aktivního uhlí [13].

O instalaci odsiřovacího zařízení na bázi adsorpce projeví zájem především středně velké ČOV. Jsou dislokovány u měst o počtu několika desítek tisíc obyvatel. Jedná se o odsiřovací zařízení Suloff. V dnešní době pracuje na ČOV Znojmo, ČOV Prostějov, ČOV Kroměříž a ČOV Kralupy nad Vltavou [13].

Jednotka Suloff slouží k odstraňování sulfanu z bioplynu. Děj probíhá pomocí adsorpcí na aktivním uhlí s následnou katalytickou oxidací na elementární síru, která zůstává zachycena na sorbetu. K adsorpci se používá impregnované aktivní uhlí ve formě drobných granulí. Adsorpční materiál se vlivem vylučování elementární síry deaktivuje. Proto je po určité době nutná jeho výměna. Účinnost odsiřování se pohybuje mezi 96 – 99 % podle podmínek, za kterých je jednotka provozována a podle koncentrace sulfanu v bioplynu. Samotné čištění probíhá v adsorbéru s pevným ložem, přes které proudí bioplyn. Zařízení má tvar válce a je vyrobeno z antikorozní oceli. Může být umístěno i ve venkovním prostředí na betonovém základně [32], viz obr. 6.0.



Obr. 6.0 Odsiřovací jednotka Suloff - ČOV Prostějov

Informace o stavu jednotky mohou být posílány do řídicího počítače nebo může být kontrola prováděna manuálně. Celá jednotka je tepelně izolovaná a obsahuje elektrický ohřev pláště. Tohle opatření zajistí spolehlivý provoz v zimním období. Výměnu aktivního uhlí a servis zajišťuje dodavatelská firma [32].

5.6 Vlastní pokusy

Z vodných materiálů pro kofermentaci uvedených v **Tab. 5.3** bylo dále zjištěno, jaké případně množství by bylo možné dodávat do reaktorů. Přehled substrátů a jejich množství dostupnost je uvedeno v Tab. 5.4. Hodnoty uvedené v tabulce je průměrná měsíční produkce těchto odpadů. Dále tyto informace byly důležité k stanovení správného poměru dávkování suroviny a kalu.

Název	Množství [t/měsíc]	C : N	Sušina [%]
Mléčný odpad	200 000	14-27	6,4
Masokostní moučka	300	4,8 - 10	98
Bramborové olupky	80	14	27,5
Lihovarnické výpalky	50	13	6,6

Tab. 5.4 Množstevní dostupnost surovin [16], [28], [41]

Poté byly získány vzorky jednotlivých substrátů a provedeny fermentační zkoušky. Vzorek masokostní moučky nebyl získán, protože má z uvedených substrátů nejmenší poměr C : N. A tím pádem i nejmenší vliv na snížení obsahu H₂S.

5.6.1 Pokus č.1

K prvnímu pokusu byl použit odvodněný nevápněný kal z ČOV Biocel Paskov a.s. a kal z ČOV Frýdek – Místek. Který slouží k zapracování fermentoru a vytvoření stabilního anaerobního prostředí. Kal byl zvážěn a z homogenizován. Posléze směs byla nalita do

fermentoru a ten byl vzduchotěsně uzavřen. Složení a vlastnosti kalu jsou v Tab. 5.5. Bylo zvoleno mezofilní pásmo teplot, konkrétně teplota 38 °C.

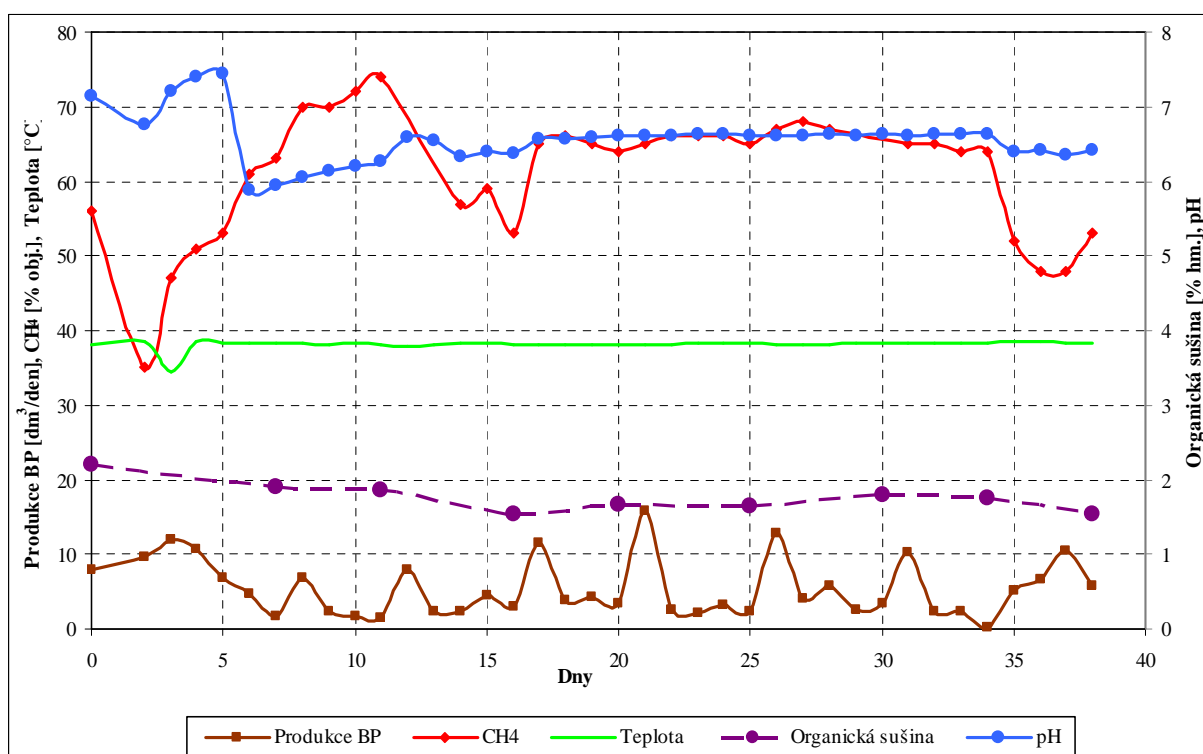
Druh kalu	Hmotnost [kg]	Sušina [%]	ZŽ [%]
ČOV Paskov	1,5	19,39	89,09
ČOV Frýdek – Místek	21	1,35	51,21

Tab. 5.5 Složení vstupní směsi

Poté byl kal z ČOV Biocel Paskov a.s. semikontinuálně dávkován do fermentoru. V pravidelných týdenních intervalech bylo přidáváno 700 g odvodněného nevápněného kalu. Vlastnosti kalu byly sušina 19,39 % hm., ZŽ 89,09 % hm. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 0,86 kg_{os}/m³.den. Tato hodnota se vypočítá dle rov. 5.2. Průběh celého pokusu je zobrazen na obr. 6.1.

$$B_V = \frac{X_o}{\Theta}, \quad (\text{Rov. 5.2})$$

kde B_V – látkové zatížení fermentoru [kg_{os}/m³.den]
 X_o – koncentrace organické sušiny v kalu [kg_{os}/m³]
 Θ – doba zdržení v fermentoru [den]



Obr. 6.1 Průběh anaerobní fermentace při 38 °C

Z grafu vyplývají následující údaje. Průměrná denní produkce bioplynu byla 5,73 dm_N³/den. Zvýšená produkce bioplynu byla vždy po dávkování novým substrátem. Teplota se držela na zvolených 38 °C až na jeden výkyv na začátku pokusu. Obsah metanu se pohyboval v průměru okolo 62,3 % obj. Hodnota pH se držela v intervalu 5,9 – 7,5. Množství H₂S se pohyboval od dolní hranice 3 ppm do horní hranice, která se nemohla

změřit, protože horní hranice přístroje používaného k detekci je 1000 ppm, a tato hodnota byla překročena. Odbourání organických látek bylo 66,15 % hm. Při zvolené teplotě 38 °C se z 1 kg organické sušiny vyprodukuje 331 dm_N³ bioplynu.

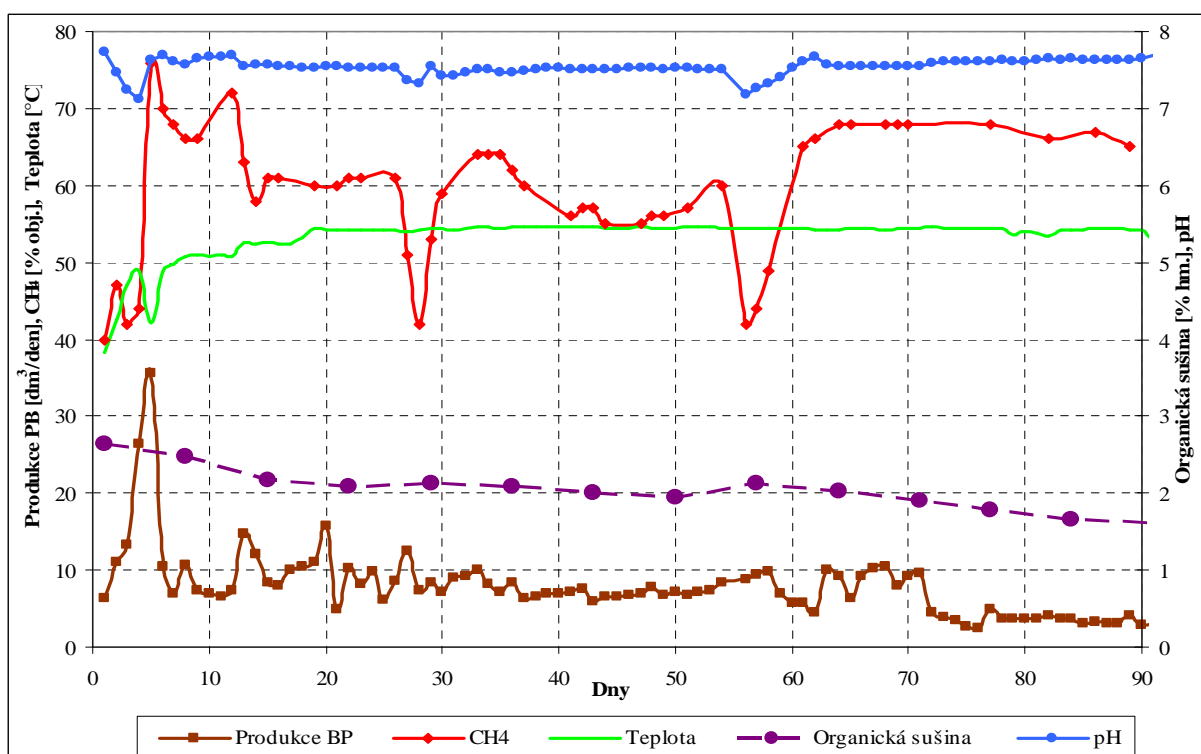
5.6.2 Pokus č.2

V pokusu číslo dva bylo znova využito zapracovaného fermentoru. ČOV. Byl využit fermentor z pokusu číslo jedna. Polovina obsahu fermentoru byla vypuštěna cca 10 kg kalu. A posléze přidána směs kalu z ČOV Biocel Paskov a.s. a ČOV Frýdek – Místek. Po navážení a důkladném promíchání směsi byl fermentor naplněn a uzavřen. Složení je uvedeno v Tab. 5.6. Pro pokus číslo dva bylo zvoleno termofilní pásmo teplot, konkrétně teplota 54,5 °C.

Druh kalu	Hmotnost [kg]	Sušina [%]	ZŽ [%]
Původní kal ve fermentoru	10	1,61	58,70
ČOV Paskov	2	18,83	89,87
ČOV Frýdek – Místek	8	1,33	51,36

Tab. 5.6 Složení vstupní směsi

Dále bylo do fermentoru dávkováno semikontinuálně v pravidelných týdenních intervalech 700 g odvodněného kalu z ČOV Biocel Paskov a.s. o vlastnostech sušina 18,83 % hm., ZŽ 89,87 % hm. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 0,85 kg_{os}/m³.den. Průběh celého pokusu je zobrazen na obr. 6.2.



Obr. 6.2 Průběh anaerobní fermentace při 54,5 °C

Z grafu lze vyčíst následující informace. Průměrná denní produkce bioplynu byla 7,47 dm_N³/den. Zde není tak patrný nárůst produkce bioplynu po přidání nového substrátu.

Jediný velký výkyv byl zaznamenán při pátém dnu procesu. Tuto špičku lze zdůvodnit zvýšeným množstvím organiky obsažené v kalu z Frýdku – Místku po nadávkování. A tím i zvýšené produkce bioplynu. V dalším průběhu procesu se již nevyskytla. Teplota byla pozvolně zvyšována z 38 °C na požadovanou hodnotu termofilního procesu. Po dvaceti dnech se ustálila na 55,4 °C. Obsah metanu v bioplynu se pohyboval v průměru okolo 58,8 % obj. Hodnota pH nebyla korigována a pohybovala se v rozmezí 6,3 – 7. Množství H₂S se drželo v intervalu 5 – 490 ppm. Odbourání organických látek bylo 78,17 % hm. Při zvolené teplotě 54,5 °C se z 1 kg organické sušiny vyprodukuje 441 dm³ bioplynu.

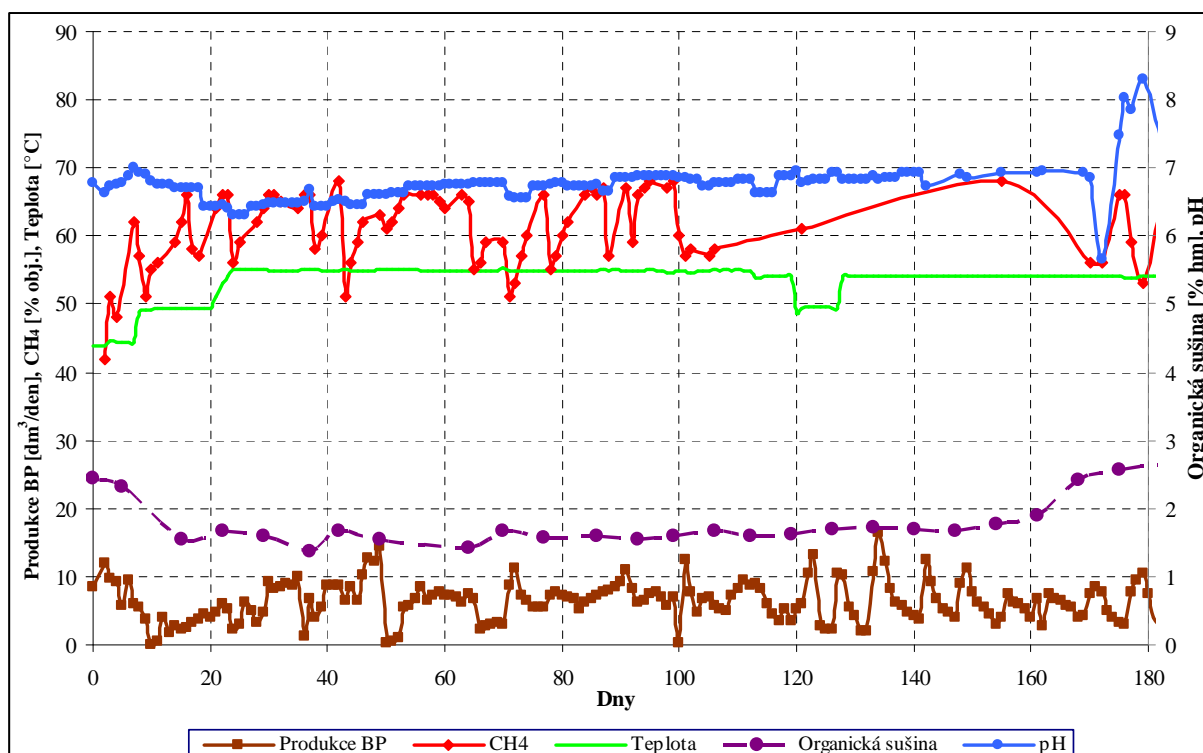
5.6.3 Pokus č.3

Při pokusu číslo tři bylo stejně jako u předchozích využito k zapracování fermentoru kalu z ČOV Frýdek – Místek. Poté byl přidán odvodněný nevápněný kal z ČOV Biocel Paskov a.s.. Po odvážení zvoleného množství kalu a následném promíchání byla takto vzniklá směs zavedena do fermentoru. Složení je uvedeno v Tab. 5.7. Bylo zvoleno termofilní pásmo teplot, konkrétně 54,5 °C.

Druh kalu	Hmotnost [kg]	Sušina [%]	ZŽ [%]
ČOV Paskov	1,5	24,31	88,72
ČOV Frýdek – Místek	21	1,39	51,02

Tab. 5.7 Složení vstupní směsi

Do fermentoru bylo semikontinuálně dávkováno 700 g odvodněného kalu z ČOV Biocel Paskov a.s.. V pravidelných týdenních intervalech. Vlastnosti kalu sušina 24,31 % hm., ZŽ 88,72 % hm. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 1,1 kg_{os}/m³.den. Průběh celého pokusu je zobrazen na obr. 6.3.



Obr. 6.3 Průběh anaerobní fermentace při 54,5 °C

V první fázi pokusu se dávkoval samotný kal z ČOV Biocel Paskov a.s. až do 113 dne. Následující hodnoty platí pro toto období. Průměrná denní produkce bioplynu byla $6,77 \text{ dm}_N^3/\text{den}$. Je zde vidět zvýšení produkce bioplynu po dávkování novým substrátem. Teplota byla pozvolně zvyšována až na požadovanou hodnotu $54,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Celý proces zvyšování teploty trval 25 dní. Obsah metanu v bioplynu se pohyboval okolo $59,8 \%$ obj. Hodnota pH nebyla korigována a pohybovala se v rozmezí $6,3 - 7$. Množství H_2S se pohybovalo v rozmezí $3 - 34 \text{ ppm}$. Odbourání organických látek bylo $75,25 \%$ hm. Při zvolené teplotě se z 1 kg organické sušiny vyprodukuje 334 dm_N^3 bioplynu.

V druhé fázi pokusu se společně s kalem přidávaly bramborové olupky v množství 60 g , které měly vlastnosti, sušina $27,5 \%$ hm., ZŽ $93,5 \%$ hm. Společná kofermentace probíhala od 113 do 155 dne pokusu. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo $1,3 \text{ kg}_{\text{os}}/\text{m}^3.\text{den}$. Průměrně se vyprodukovalo $6,58 \text{ dm}_N^3/\text{den}$ bioplynu. Mezi 120 až 127 dnem došlo k poklesu teploty na $49,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Bylo to zapříčiněno snížením výkonu ohřívače topné vody. Obsah metanu v bioplynu byl v průměru $61,2 \%$ obj. Hodnota pH zůstala v stejném intervalu jako v první fázi. Množství H_2S se pohybovalo v rozmezí $60 - 240 \text{ ppm}$.

Ve třetí fázi pokusu byl společně s kalem přidávané lihovarnické výpalky o sušině $6,6 \%$ hm. v množství 200 g . Společná kofermentace trvala od 155 do 182 dne pokusu. Průměrně se vyprodukovalo $5,84 \text{ dm}_N^3/\text{den}$ bioplynu. Obsah metanu byl $60,3 \%$ obj. Hodnota pH zůstala v stejném intervalu jako v předchozích fázích. V závěru pokusu došlo k výraznému výkyvu hodnot. Zapříčinil výpadek programu Magic XBC. Množství H_2S se pohybovalo v rozmezí $92 - 198 \text{ ppm}$.

5.7 Vyhodnocení pokusů

Pro vyhodnocování výsledků pokusů existuje řada parametrů, které lze sledovat. V tomto případě bylo zvolena následující kritéria:

- množství metanu v bioplynu,
- produkce bioplynu z 1 kg organické sušiny,
- množství H_2S ,
- odbourání organických látek.

V laboratorních podmínkách je produkce bioplynu většinou nižší než ve skutečném zařízení. Příčinnou jsou malé objemy laboratorních zařízení. Každá sebemenší změna způsobí výkyv v produkci. Jak je to dobře patrné z grafů. V praxi tyto menší výkyvy nejsou tak významné, protože se pracuje s velkými objemy.

Všechny tři pokusy se podařilo udržet a vytvořit stabilní anaerobní prostředí. Díky zapracování samotného fermentoru na začátku pokusu. V průběhu všech pokusů nenastaly žádné mimořádné situace, který by vedly k zastavení nebo snížení výkonnosti celého procesu. Průběhy všech sledovaných a zaznamenávaných veličin jsou zpracovány do přehledných grafů u každého pokusu. Přehled hodnot podle kterých se bude hodnotit nejvhodnější varianta provozu fermentoru jsou uvedeny v Tab. 5.8.

Název	Množství metanu [% obj.]	Produkce BP z 1 kg suš. [dm _N ³]	Množství H ₂ S [ppm]	Odbourání organických látek [% hm.]
Pokus č. 1	62,3	331	>1000	66,15
Pokus č. 2	58,8	441	490	78,17
Pokus č. 3	59,8	334	34	75,25

Tab. 5.8 Informace o pokusech

Pokus č. 1 byl provozován v mezofilní oblasti při teplotě 38 °C. Množství vzniklého metanu v bioplynu je nejlepší ze všech pokusů. Produkce bioplynu je malá a značná nevýhoda je enormní množství H₂S. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 0,86 kg_{os}/m³.den. Odbourání organických látek je nejmenší ze všech pokusů.

Pokus č. 2 byl provozován v termofilní oblasti. Při teplotě 54,5 °C. Množství metanu je nižší než v prvním pokusu, ale jde o jednotky procent. Maximální množství H₂S bylo 490 ppm. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 0,85 kg_{os}/m³.den. Odbourání organických látek bylo nejlepší ze všech pokusů a to 78,17 % hm.

Pokus č.3 byl také provozován v termofilní oblasti a při stejné teplotě jako pokus č. 2. Množství metanu je také přibližně stejné. Produkce bioplynu byla malá, ale množství H₂S bylo nejmenší ze všech tří pokusů. Zatížení fermentoru organickými látkami bylo 1,1 kg_{os}/m³.den. Odbourání organických látek bylo 75,25 % hm. Výsledky po přidání bramborových olupků a lihovarnických výpalků pro společnou kofermentaci nejsou tak uspokojivé jak se předpokládalo. Došlo k nárůstu tvorby metanu v obou případech, ale jen o jednotky procent. A množství H₂S stoupl na 240 ppm u olupků a na 198 ppm u výpalků oproti 34 ppm u samotného kalu. Jinak se prakticky nic nezměnilo.

Volba optimálního řešení

Pro pokus č. 1 je výhodou mezofilní oblast. To znamená, že se nemusí dodávat tolik tepla pro ohřev vstupujícího kalu. Nevýhoda je nízká produkce bioplynu a vysoké množství H₂S. Pro samotné spalování se nejdříve musí odsířit. Možností je pořízení odsiřovacího zařízení jako např. v kapitole 5.5.4 nebo jiné technologie. Zde vnika investice do pořízení technologie a následný provoz a údržbu. Je zde možnost vyzkoušet využití kofermentace s jiným materiálem. Zde vstupují do úvah náklady na dopravu substrátů do areálu podniku a s tím i zvýšená četnost dopravy. Taky nelze zaručit stoprocentní pravidelnost dodávek a garantovat množství.

Pokus č. 3 je nevýhoda termofilní oblast. To klade vyšší nároky na dodávky tepla. Díky termofilní oblasti má být produkce bioplynu vyšší než u mezofilní. Tento předpoklad se u tohoto pokusu nepotvrdil. Došlo k významnému poklesu H₂S. Vliv přidávaných substrátů byl menší než se očekávalo. Jak produkce bioplynu, tak i množství metanu se výrazně nezvýšilo. A vstupují zde náklady s dovozem kofermentujících substrátů a garance pravidelnosti a množství.

Pokus č.2 má taky nevýhodu termofilní oblasti, což klade větší nároky na dodávané teplo. Zde se podařilo prokázat předpoklad o nárůstu produkce bioplynu, která je ze všech pokusů nejlepší. Množství metanu je taky uspokojivé. Nevyšší zaznamenané množství H₂S překračuje podmínku 500 mg/m³, protože hodnotě 490 ppm odpovídá 743,3 mg/m³.

Průměrná množství H_2S bylo 300 ppm což je 417 mg/m^3 a ta už splňuje podmínku provozu. V případě dlouhodobě zvýšeného množství H_2S by se to projevilo častější výměnou oleje KJ.

Na základě zmíněných argumentů pro a proti, volím pro BPS termofilní pásmo kolem $55 \text{ }^\circ\text{C}$. S počátečním zapracováním fermentoru kalem z ČOV Frýdek – Místek. Následně dávkování samotného kalu z ČOV Biocel Paskov a.s. bez přidávání jiných substrátů. A obdobné podmínky, které byly nastoleny při pokusu č.2.

6 BIOPLYNOVÁ STANICE

Bioplynová stanice (BPS) je zařízení, ve kterém probíhá řízená anaerobní fermentace. Za působení anaerobních kultur bakterií a bez přítomnosti vzduchu. Koncovými produkty jsou bioplyn a nerozložitelný zbytek tzv. digestát. Jsou zde zpracovávány organicky rozložitelné substráty. Charakteristický vzhled BPS je na obr. 6.4. Existují různá hlediska rozdělení BPS. Obecné rozdělení BPS je podle zpracovávaného substrátu [34]:

- Zemědělské – zpracovávají pouze vstupy ze zemědělské prvovýroby
- Čistírenské – zpracovávají kaly z ČOV
- Ostatní – zpracovávají bioodpady nebo vedlejší živočišné produkty a biosložku vytříděnou ze směsného komunálního odpadu

Podle počtu stupňů [33]:

- Jednostupňové – všechny fermentační fáze probíhají v jediném fermentoru
- Vícestupňové – fermentační fáze jsou rozděleny do dvou nebo více fermentorů

Podle způsobu plnění [33]:

- Diskontinuální – doba jednoho cyklu (naplnění) odpovídá době zdržení materiálu ve fermentoru. Používá se hlavně při suché fermentaci tuhých materiálů.
- Semikontinuální – doba mezi jednotlivými dávkami je kratší než doba zdržení materiálu v reaktoru.
- Kontinuální – dávkování se provádí nepřetržitě.



Obr. 6.4 Bioplynová stanice [38]

Podle podílu vlhkosti v materiálu [33]:

- Tuhé materiály – vstupní substrát s podílem sušiny cca 18 až 35 %, ve výjimečných případech i 50 %
- Tekuté materiály – vstupní substrát s nízkým podílem sušiny 0,5 – 3 % a negativní energetickou bilancí a vyšším podílem sušiny 3 až 14 % a pozitivní energetickou bilancí
- Kombinované materiály – kombinace předchozích dvou materiálů v různém poměru

6.1 Skladba hlavních částí BPS

Technologické části BPS pro anaerobní fermentaci organických materiálů může mít podle druhu a úpravy zpracování substrátu před vstupem do fermentoru mnoho variant. Zde je možné dělení hlavních částí BPS.

Zdroj organických materiálů

Doprava do příjmové nádrže musí s malými výkyvy odpovídat nominální výkonnosti strojní linky. Před uskladněním v přijímací nádrži musí být evidován druh, charakter a množství materiálu [33].

Příjem a úprava materiálu

Nádrže a prostory určené pro skladování lze podle potřeby a povahy zpracovávaného materiálu vybavit zařízením na jeho úpravu. Jako je separace příměsí, zhušťování, přehřívání, homogenizace, hygienizace apod. [33].

Anaerobní reaktor

Reaktor je nejdůležitější součástí strojní linky. Rozhoduje o kvalitní funkci celé strojní linky. Většina bioplynových stanic má reaktor válcový, betonový, kovový nebo plastový s osou svislou nebo vodorovnou. Řízený anaerobní proces znamená, že reaktor je vybaven míchacím zařízením, ohřevem, a dávkovacím zařízením [33].

Bioplynová koncovka

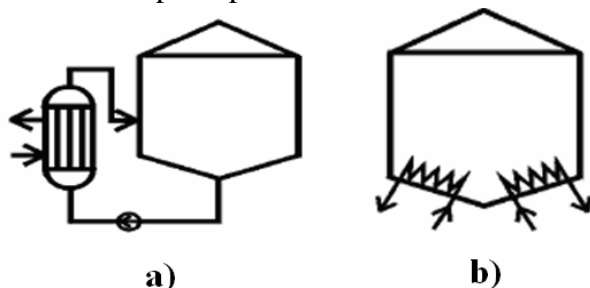
Obsahuje potrubí na dopravu bioplynu, bezpečnostní zařízení proti zpětnému zahoření plynu, dmychadlo, plynojem, regulační a kontrolní prvky, zařízení na úpravu bioplynu. Také zařízení na využití bioplynu (kotel, kogenerační jednotka) a hořák zbytkového bioplynu [33].

Kalová koncovka

Je složena z armatur, dopravních čerpadel, homogenizátorů, skladů a separačních zařízení. Digestáty z BPS v případě, že vyhovují limitům obsahu cizorodých látek, zejména těžkým kovům, mohou být použity jako organické hnojivo na zemědělské půdě. Na základě předpisů legislativy hnojiv nebo mohou být dále použity jako rekultivační prostředek na nezemědělské půdě [33].

6.2 Popis reaktoru

Základní technologickou částí anaerobního procesu je reaktor, zde jsou umístěny anaerobní mikroorganismy. Hlavní podmínkou pro dobrou činnost bakterií je udržení prostředí bez přístupu vzduchu a udržení konstantní teploty. Zajištění požadované teploty

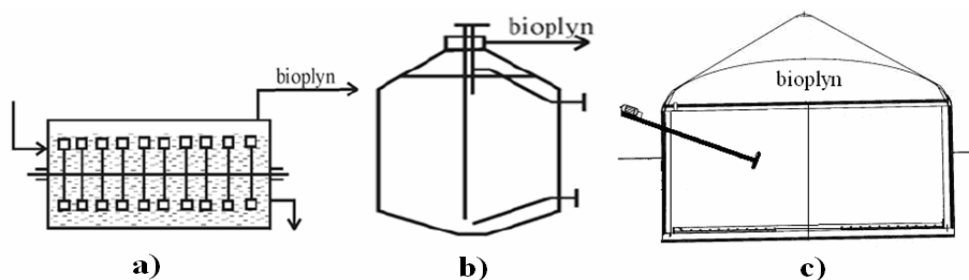


Obr. 6.5 Způsoby ohřevu reaktorů [33]
a) externí výměník, b) vnitřní vytápění

je prováděno pomocí ohřevu substrátu přímo ve fermentoru nebo externě mimo fermentor. Jako topné médium slouží horká voda přiváděná dovnitř reaktoru systémem zabudovaných topných hadů. Tento systém se používá zejména u menších a středních nádrží. Druhou možností je provádění ohřevu externí cirkulací reaktorové směsi přes tepelný výměník, do kterého je opět přiváděna topná voda. Tento způsob umožňuje i míchání substrátu v reaktoru. Pro ohřev

teplé vody se využívají horkovodní kotle na spalování bioplynu, nebo kogenerační jednotky. Konstrukce výměníků mohou být řešeny systémem trubka v trubce, šroubovicové nebo spirálové výměníky. K cirkulaci kalu mezi reaktorem a výměníkem se používají kalová čerpadla. Různé způsoby ohřevu reaktorových nádob jsou znázorněny na obr. 6.5. Systém s topnými hady se v současnosti nejčastěji používá na BPS. Externí výměníky se používají na kalových koncovkách ČOV [33].

Reaktor má nečastěji tvar válce, možná řešení jsou znázorněna na obr.6.6. S osou vertikální, jsou možnosti i horizontální osy, ale to není tak časté provedení. Materiál použitý na stavbu je nejčastěji železobeton. Rozměry se pohybují řádově 10 – 30 m v průměru a kolem 12 m výšky [33].



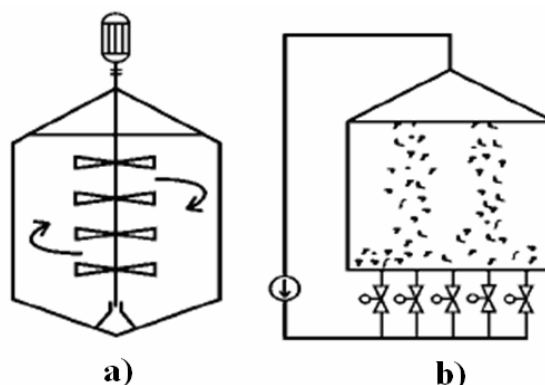
Obr. 6.6 Různé druhy reaktorů [33]
a) horizontální nádrž s rotačním míchadlem, b) nádrž stojatá s konickými dny
c) zapuštěná nádrž se zásobníkem bioplynu

Reaktory se konstruuji v systémech jednoduchých (jednostupňové) nebo kombinované (dvoustupňové). Jednoduché systémy obsahují jeden nebo více reaktorů v sériovém anebo v paralelním řazení. Hlavním znakem jednoduchých systémů je sdružený odběr bioplynu a liniový průtok reagující suspenze. Kombinované systémy, neboli dvoustupňová anaerobní digesce mají nejméně dva reaktory s odlišným prostředím. Vstupní reaktor je někdy nazýván předreaktorem a probíhají zde s vyšší intenzitou acidogenní procesy. Bioplyn z těchto předreaktorů je částečně recyklován a z části je do následných metalizačních stupňů přepouštěn jen probubláváním nebo sycením v přídatné nádrži [33].

Reaktor musí být rovněž opatřen zařízením pro míchání. To může být zabezpečeno pomocí čerpadla umístěného vně nádrže s cirkulací fermentační směsi cirkulačním potrubím, nebo mícháním bioplynem, které zajišťuje dmychadlo. Míchání stlačeným bioplynem je výhodné z hlediska snížení usazování písku na dně nádrže a tvorbě kalového koláče na povrchu hladiny kalu. Další možností je použití vrtulového míchadla – buď rychloběžného, nebo pomaloběžného s velkým průměrem míchací vrtule.

Způsoby míchání reaktorů jsou znázorněny na obr. 6.7. Spotřeba energie na míchání anaerobních reaktorů je důležitým faktorem rozhodujícím při volbě míchacího postupu.

Jen ve výjimečných případech, jsou míchací systémy provozovány nepřetržitě. Zcela běžné jsou krátké míchací periody a výrazně delší časové úseky, kdy je reaktor v klidu. Pro míchání anaerobních reaktorů je důležité občasné přemístění reagující biomasy pro homogenizaci obsahu. Intenzivní nepřetržitě míchání prakticky nezvyšuje výtěžnost bioplynu. Způsob a délku míchání je nutné volit podle druhu zpracovávaného organického substrátu. Příliš intenzivní míchání nepřináší efektivní zvýšení tvorby bioplynu ani zvýšení rychlosti rozkladu biologicky rozložitelné hmoty. Ale u některých materiálů je optimální dobou míchání nutno ověřit v laboratoři nebo na hotové bioplynové stanici [33].



Obr. 6.7 Způsoby míchání reaktorů [33]

- a) míchání mechanické – lopatkové,
b) míchání pneumtické – bioplyn

6.3 Zásady při přípravě výstavby BPS

K realizaci každého projektu předchází dlouhý čas příprav. Jedná se o proces přípravy tak i o procesy povolování a schvalování dokumentů pro výstavby BPS. Také se musí brát v úvahu uplatnění různých technologií na území České republiky. Technologie, které dobře fungují v zahraničí se nedají bezmyšlenkovitě převzít. Český trh má svá specifika. Jedná se o legislativní rámec povolování procesů, dotační politiku, státní podporu, financování a provozní ekonomiku. Tyhle faktory ovlivňují návratnost vložených investic [34].

6.3.1 Použitá technologie

Podle obsahu sušiny v substrátu lze rozdělit použitou technologii na suchou a mokrou. Suchá fermentace je použitelná, když obsah sušiny se pohybuje v rozmezí cca 18 až 35 %. Další faktorem je kvalita vstupních surovin, přítomnost nežádoucím částic apod. V současnosti technologie suché fermentace nejsou rozšířeny na území České republiky. Takže není tolik praktických zkušeností s provozem těchto zařízení.

Mokrá fermentace se využívá při obsahu sušiny kolem 3 až 14 %. Většina provozovaných BPS je založena na této technologii. V provozech, kde se vyskytují vysokosušinné substráty se tento problém řeší ředěním biomasy vodou, tak aby se celkový obsah sušiny po zředění ustálil v rozmezí požadovaném pro mokrou fermentaci. Ne všechny postupy jsou použitelné při všech realizacích BPS. Každá vstupující surovina má svá specifika. Výsledkem nesprávné volby technologie mohou být problémy s tvorbou krusty nebo pěny v reaktorech, nedostatečná kapacita, konstrukce dopravních systémů a zápach šířící se z BPS. Pro ekonomicky úspěšný provoz BPS je zásadní správná volba kogenerační

jednotky. Toto zařízení patří mezi nejvytíženější částí celého provozu. Provoz jednotky je kolem 8 000 hodin za rok. Po celou dobu jednotka vyrábí elektrickou energii a teplo. Příjmy z prodeje elektrické energie představují nejvýznamnější kladnou položku v ekonomické bilanci. Volbě vhodné kogenerační jednotky a současně zajištění kvalitního servisu a údržby je potřeba věnovat dostatečnou pozornost [34].

6.3.2 Umístění

Pro správný chod BPS je důležité vhodné umístění objektu. Má to vliv na povolovací řízení stavby a v nejhorším případě může nevhodné umístění znamenat krach celého projektu. Hlavně jde o řízení posouzení vlivu na životní prostředí (EIA) a územním rozhodnutí. Objekt by se neměl nacházet v přílišné blízkosti lidských sídel, protože to vyvolává negativní reakce. A také ne příliš daleko od zdrojů substrátu využívaných na BPS, protože náklady na dopravu by neúměrně zatěžovaly rozpočet BPS. Další faktory jsou dopravní infrastruktura, rozptylové podmínky, přítomnost zátopových území, geologické poměry atd. V širším měřítku se musí řešit nakládání s vyhnílym substrátem. Zda bude využívám na hnojení zemědělské půdy nebo bude odvážen k dalšímu zpracování [34].

6.3.3 Postup při realizaci

Všeobecně lze definovat několik základních kroků při realizaci BPS dle [34].

- Úvodní posouzení záměru
- Studie proveditelnosti, podnikatelský záměr
- Řízení EIA, projektová dokumentace k územnímu řízení
- Zpracování žádosti o investiční podporu, zajištění financování projektu
- Projektová dokumentace ke stavebnímu řízení
- Realizace projektu
- Monitoring provozu BPS

Úvodní posouzení záměru

Slouží k základní orientaci zájemce v problematice BPS. Jsou zde základní rysy technického řešení, hrubý odhad investice a ekonomického záměru. Formulace otázek, které budou řešeny v dalších projektových etapách. Jsou zde základní údaje o použité technologii, produkce bioplynu a hrubá energetická bilance. Na základě těchto informací se zájemce rozhoduje zda bude v projektu dále pokračovat [34].

Studie proveditelnosti, podnikatelský záměr

Navazuje na předchozí posouzení. Podrobněji popisuje technické řešení, rozpočet, způsob provozu, zajištění logistiky vstupních materiálů, řešení látkových koncovek, energetickou bilanci, legislativu apod. Nejčastěji je studie vypracovaná v několika variantách. Na závěr je doporučení optimálního řešení a dalšího postupu. Tato studie by měla sloužit jako základní rozhodovací dokument pro investora a jako podklad pro zpracování podnikatelského záměru. V podnikatelském záměru je podrobněji rozpracována investorem zvolená varianta. Je přihlédnuto k finančním možnostem investora a na možnost dotačních zdrojů. Tento dokument slouží k jednáním s bankami, zadání pro projektanty a zpracování dalších dokumentů. Kvalitní podnikatelský záměr značně ovlivňuje budoucí realizaci projektu [34].

Řízení EIA, projektová dokumentace k územnímu řízení

Rozsah projektové dokumentace pro územnímu řízení podléhá zákonu č. 183/2006 Sb., neboli stavební zákon. Stejně je tomu i v případě projektové dokumentace ke stavebnímu řízení. Součástí dokumentace by mělo být provedení inženýrsko-geologického průzkumu v místě realizace fermentoru. Další významným dokumentem je EIA. Je to posouzení projektu z hlediska vlivu na životní prostředí. Výsledné stanovisko je zásadní pro realizaci celého projektu [34].

Zpracování žádosti o investiční podporu

Způsob zpracování je ovlivněn typem investora. Na jeho základě se volí nejvhodnější dotační strategie. Velice vhodné jsou operační programy v rámci Evropské unie. Jako je např. Operační program průmyslu a inovace (OPPI), Operační program životního prostředí (OPŽP) apod. Výše podpory se pohybuje maximálně 30 % celkových nákladů. Existují speciální společnosti, které radí investorům jaký operační program je pro jejich projekt nejvýhodnější [34].

Realizace projektu

Realizace stavby zahrnuje provedení stavební části a dodávku technologie. Obvykle je tato realizace provedena generálním dodavatelem. Součástí dodávky je vypracování dokumentace provedení stavby, kolaudace, komplexní zkoušky a zaškolení obsluhy. Záruky a pozáruční servis je obvykle zakotven ve smlouvě o dodávce. Realizace stavby je závislá na klimatických podmínkách a výskytu neočekávaných situací. Obvykle se doba stavby pohybuje kolem 6 měsíců [34].

Monitoring provozu BPS

Provoz BPS podléhá mnoha zákonům a předpisům. Jako jsou např.: zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech, zákon č. 458/2000 Sb., energetický zákon, vyhláška č.156/1998 Sb., o nakládání s odpady apod. Provozovatel musí mít oprávněné osoby na různé činnosti. Jako jsou např. materiálové rozbor, provoz strojích zařízení, měření emisí, odpadová agenda, energetická agenda apod. [34].

Součástí této diplomové práce je provést návrh BPS. Rozsahu jak je popsáno v odstavci: Úvodní posouzení záměru. Což je navrhnutí použité technologie na základě výsledků fermentačních zkoušek provedených v kapitole 5. Na základě a průběhu výtěžnosti bioplynu. Provedení energetické a ekonomické bilance, kterými se bude zabývat následující kapitola.

7 NÁVRH BPS

V současné době produkuje ČOV společnosti Biocel Paskov a.s. 85,9 tun odvodněného kalu denně o sušině 22,94 % hm., který byl také používán při fermentačních zkouškách. Při realizaci BPS je zbytečné kal odvodňovat a posléze dávkovat do fermentoru, který pracuje na mokřím principu. Proto je lepší do fermentoru přidávat částečně odvodněný kal, který vystupuje ze síťového zahušťovacího stroje. Vlastnosti obou kalů jsou popsány v Tab. 7.1.

Název	Hustota [kg/m ³]	Sušina [%]	Produkce [t/den]
Odvodněný kal	1200	22,94	85,9
Zahuštěný kal	1010	7	281,5

Tab. 7.1 Vlastnosti kalů

Samotný bioplyn vzniká v reaktorech. Velikost nádrží se odvíjí od množství denní produkce přiváděného kalu a doby zdržení ve fermentoru. Obvyklá délka zdržení je 20 až 30 dní. Pro náš případ volím dobu zdržení 25 dní. Vyhnívající nádrže budou pracovat v kontinuálním režimu. Což znamená, že se kal vznikající na ČOV bude průběžně dávkovat do nádrží. A současně se část vyhnílého kalu bude odvádět do uskladňovací jímky.

7.1 Návrh reaktoru

Za dobu zdržení 25 dní vznikne na ČOV 7 125 m³ kalu. Tento objem není vhodné umístit do jediné obrovské nádrže. Nese to v sobě hodně úskalí jako je samotná stavba tak velké nádrže, obsluha a regulace takového objemu atd. Za optimální řešení považuji volbu dvou nádrží, každá o užitečném objemu 3 600 m³. Rozměry zvolených nádrží jsou uvedené v Tab. 7.2.

Počet nádrží	2	[-]
Objem jedné nádrže	3 600	[m ³]
Průměr nádrže	26	[m]
Zaplňená výška	6,8	[m]
Celková výška	8,8	[m]
Plocha stěny	571,77	[m ²]
Plocha dna	530,93	[m ²]
Plocha stropu	530,93	[m ²]

Tab. 7.2 Rozměry nádrže

BPS bude s kontinuálním plněním, bude se zpracovávat zahuštěný kal. Fermentační proces je rozdělen do dvou stupňů. Reaktory budou mít železobetonovou konstrukci. Stěna bude opatřena izolací. Uvnitř reaktoru je umístěn výtopyný had z trubek a pomaluběžné vrtule, které budou zajišťovat homogenizaci celého objemu. Kuželová střecha bude tvořena membránou. Pod střešou reaktoru nad hladinou kalu je plynem z plynotěsné membrány. Dále je nutné vybudovat skladovací jímku. Která, bude sloužit pro uskladnění vyhnílého kalu. Posléze tento kal bude odebírán k dalšímu zpracování. Jako je odvodnění a následné využití pro zemědělské účely a rekultivaci. Aby probíhal fermentační proces bez problémů, musíme zajistit požadovanou procesní teplotu. A to zajistíme tím, že budeme dodat potřebné množství tepelné energie. Množství energie se vypočítá dle rov. 7.

$$Q_K = m_N \cdot c_P \cdot (T_2 - T_1), \quad (\text{Rov. 7})$$

kde Q_K – tepelná energie [J]
 c_P – tepelná kapacita kalové suspenze [J/kgK]
 T_2 – teplota uvnitř nádrže [°C]
 T_1 – teplota vstupujícího kalu [°C]
 m_N – hmotnost neodvodněného kalu [kg]

Velikost měrné tepelné kapacity je zvolena stejná jako vody. Což je 4186,8 J/kgK. Teplota vstupujícího kalu je 10 °C . Teplota fermentace bude udržována na 55 °C. Energie potřebná pro ohřev neodvodněného kalu, který přichází do fermentoru se spočítá po dosazení do rov. 7.

$$Q_K = 281500 \cdot 4188,8 \cdot (55 - 10) = 53036,29 MJ \approx 14,73 MWh$$

Další energii, kterou musíme dodat je určena k pokrytí tepelných ztrát fermentorů. Bilance ztrát tepla z fermentoru se provádí pro zimní období, kdy je největší rozdíl venkovní teploty a uvnitř nádrže. Celková tepelná ztráta se bude rovnat součtu ztrát z obou nádrží a ztráty při nichž dochází v potrubí mezi zdrojem tepla a nádrží. Protože není známa přesná délka potrubí, budou se uvažovat ztráty v potrubí 8 % celkových ztrát dle [35]. Pro výpočet tepelných ztrát fermentoru za den vyjdeme z rov.7.1.

$$Q_Z = k \cdot A \cdot (T_{IN} - T_O), \quad (\text{Rov. 7.1})$$

kde Q_Z – energie na pokrytí ztrát [W]
 k – koeficient prostupu tepla [W/m²K]
 A – plocha prostupu tepla [m²]
 T_{IN} – teplota uvnitř nádrže [°C]
 T_O – teplota vně nádrže [°C]

V této rovnici neznáme koeficient prostupu tepla, který se bude lišit v závislosti na druhu použitého materiálu a jaké prostředí bude ve styku se stěnou. Koeficient prostupu tepla se vypočte dle rov. 7.2.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (\text{Rov. 7.2})$$

kde k – koeficient prostupu tepla [W/m²K]
 α_1 – koeficient přestupu tepla ze suspenze do stěny [W/m²K]
 α_2 – koeficient přestupu tepla ze stěny do okolního prostředí [W/m²K]
 d_i – tloušťka „i“ vrstvy [m]
 λ_i – tepelná vodivost „i“ materiálu [W/mK]

Nádrž jsem rozdělil na tři části, pro které spočítám koeficient prostupu tepla a tepelné ztráty. Teplota uvnitř nádrže (T_{IN}) bude uvažována 55 °C, průměrná venkovní teplota (T_O) v zimním období bude uvažována - 10 °C a teplota půdy (pod povrchem) bude uvažována 5 °C.

Strop fermentoru:

Materiál	Tloušťka [m]	Tepelná vodivost [W/mK]
Membrána PES	0,01	0,022
Vzduchová mezera	0,15	0,025
Membrána PES	0,01	0,022

Tab. 7.3 Složení stěny stropu [16], [45]

Koeficient přestupu tepla dle [16] stěna – vzduch: $\alpha_1 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$
 stěna – plyn: $\alpha_2 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$

Koeficient prostupu tepla po dosazení do rov.7.2 $k_1 = 0,142 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Tepelné ztráty stropu po dosazení do rov.7.1 $Q_1 = 4\,900 \text{ W} = 0,005 \text{ MW}$

Stěna fermentoru:

Materiál	Tloušťka [m]	Tepelná vodivost [W/mK]
Železobeton	0,35	1,512
Minerální vlna	0,15	0,037
Oplechování	0,001	60

Tab. 7.4 Složení stěny [16], [42]

Koeficient přestupu tepla dle [16] stěna – vzduch: $\alpha_1 = 15 \text{ W/m}^2\text{K}$
 stěna – kal: $\alpha_2 = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Koeficient prostupu tepla po dosazení do rov.7.2 $k_2 = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Tepelné ztráty stěny po dosazení do rov.7.1 $Q_2 = 8\,537 \text{ W} = 0,008 \text{ MW}$

Dno fermentoru:

Materiál	Tloušťka [m]	Tepelná vodivost [W/mK]
Beton	0,5	1,8
Podklad	1,0	5

Tab. 7.5 Složení stěny dna [16], [42]

Koeficient přestupu tepla dle [16] stěna – zem: $\alpha_1 = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$
 stěna – kal: $\alpha_2 = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$

Koeficient prostupu tepla po dosazení do rov.7.2 $k_3 = 0,52 \text{ W/m}^2\text{K}$
 Tepelné ztráty dna po dosazení do rov.7.1 $Q_3 = 13\,846 \text{ W} = 0,014 \text{ MW}$

Vlastní ztráty celého fermentoru jsou dány vztahem:

$$Q_{ZF} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4, \quad (\text{Rov. 7.3})$$

$$Q_{ZF} = 0,005 + 0,008 + 0,014 = 0,027 \text{ MW}$$

Celkové tepelné ztráty a množství přiváděného tepla na ohřev kalu jsou uvedené v Tab. 7.6. Pro tepelné ztráty potrubím uvažují 8 % z celkového tepla potřebného na pokrytí obou fermentorů dle [35].

Ztráty obou nádrží	1,31	[MWh]
Ztráty potrubím	0,105	[MWh]
Teplo na ohřev kalu	14,73	[MWh]
Celková tepelná energie	16,2	[MWh]

Tab. 7.6 Množství tepla k ohřevu

Z výpočtu vyplývá, že k ohřevu vstupujícího kalu, pokrytí tepelných ztrát dvou fermentorů v zimním období a pokrytí ztrát potrubí je zapotřebí kogenerační jednotka, která denně dodá 16,2 MWh energie.

7.2 Vlastnosti vznikajícího bioplynu

Palivem pro kogenerační jednotku bude vznikající bioplyn. Který, je složen ze směsice plynů. Hlavní složkou je metan a oxid uhličitý. V laboratoři bylo zaznamenáno určité množství kyslíku a sulfanu. Koncentrace těchto složek byla ale zanedbatelná. Proto se při výpočtu výhřevnosti v **Tab. 7.7** nevyskytují. Množství metanu v bioplynu při pokusu č. 2 bylo 58,8 % obj. Výpočet výhřevnosti byl proveden dle rov.7.4 a výsledky zapsány do následující tabulky Tab. 7.7.

$$LHV_{BP} = \sum_i^n c_i \cdot LHV_i, \quad (\text{Rov. 7.4})$$

kde LHV_{BP} – celková výhřevnost plynu [kJ/m_N^3]
 c_i – objemový zlomek „i“ složky v plynné směsi [-]
 LHV_i – výhřevnost „i“ složky [kJ/m_N^3]

Složka	Koncentrace [% obj.]	Výhřevnost složky LHV [kJ/m_N^3]	Příspěvky složek [kJ/m_N^3]
CH ₄	58,8	35 781,00	21 039,23
CO ₂	41,2	0,00	0,00
Celkem	100	výhřevnost bioplynu LHV [kJ/m_3]	21 039,23

Tab. 7.7 Výhřevnost bioplynu

Z tabulky vyplývá, že výhřevnost bioplynu je dána pouze výhřevností metanu. Oxid uhličitý nemá žádný energetický přínos.

Produkce bioplynu se vypočítá dle rov 7.5. Závisí na množství přiváděného kalu a na jeho vlastnostech. Změny vlastností jsou dány odstávkami v podniku, změna výrobního postupu při výrobě buničiny a nastavenými parametry během samotné anaerobní fermentace.

$$V_{BP} = m_N \cdot w_s \cdot w_o \cdot V_{sp}, \quad (\text{Rov. 7.5})$$

kde V_{BP} – množství vznikajícího bioplynu [m_N^3]
 m_N – hmotnost neodvodněného kalu [kg]
 w_s – hmotnostní zlomek sušiny v kalu [-]
 w_o – hmotnostní zlomek organiky v kalu [-]
 V_{sp} – specifická produkce bioplynu [$\text{m}_N^3/\text{kg}_{os}$]

Po dosazení do rov. 7.5 vyjde denní přepokládaná produkce bioplynu.

$$V_{BP} = 340300 \cdot 0,07 \cdot 0,8987 \cdot 0,441 = 9440,9 \text{m}_N^3 / \text{den} = 393,3 \text{m}_N^3 / \text{hod}$$

7.3 Volba kogenerační jednotky

Vznikající bioplyn se nejčastěji spaluje v kogenerační jednotce. To je zařízení pro kombinovanou výrobu elektrické a tepelné energie. Tepelná energie se využívá k ohřevu kalu vstupujícího do vyhřívacích nádrží a k udržení požadované teploty uvnitř nádrží. Elektrická energie může sloužit k pohonu elektrických zařízení uvnitř BPS nebo se prodává do sítě. KJ se skládá s pístového spalovacího motoru, kde se spaluje bioplyn a elektrického generátoru, který produkuje elektrickou energii. Na provoz KJ má vliv složení a vlastnosti bioplynu a také vhodná volba mazacího oleje. Celková účinnost se pohybuje mezi 80 -90 %. Hodnota elektrické účinnosti je v rozmezí 33 – 45 % a tepelná účinnost 40 - 50 %. Doba provozu KJ do generální opravy se pohybuje okolo 40 000 provozních hodin a roční provozní doba je 8 000 provozních hodin dle [40].

Na základě množství vznikajícího bioplynu a na základě zastupitelnosti, byly vybrány dvě KJ od firmy Tedom s.r.o. typ Quanto D580 SP BIO, která má spotřebu 218 m_N³/h. Jedna KJ vždy pojede na plný výkon a druhá se bude připojovat dle potřeby. V chodu na plný výkon se KJ budou střídat, aby opotřebení bylo stejnoměrné a počet pracovních motohodin byl také přibližně stejný. Varianty s dvěma KJ je výhodnější z hlediska možných nepředpokládaných situací a havárií. Jednotka, která nebude v provozu může se na ní provádět kontrola a pravidelná údržbě. Základní charakteristiky jsou uvedeny v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Jmenovitý elektrický výkon	600	[kW]
Maximální tepelný výkon	608	[kW]
Účinnost elektrická	42,5	[%]
Účinnost tepelná	43,0	[%]
Účinnost celková	85,5	[%]
Spotřeba plynu při 100 % výkonu	218	[m _N ³ /h]
Spotřeba plynu při 75 % výkonu	168	[m _N ³ /h]

Tab. 7.8 Parametry Quanto D580 SP BIO [39]

Nyní provedeme výpočet kolik KJ vyrobí tepelné a elektrické energie. Protože se jedná o stejný typ elektrická a tepelná účinnost jsou stejné. Proveden je jeden společný výpočet. Nejdříve vypočteme energetický obsah vzniklého bioplynu dle rov. 7.6.

$$Q_{BP} = V_{BP} \cdot LHV_{BP}, \quad (\text{Rov. 7.6})$$

kde Q_{BP} – energetický obsah bioplynu [kJ]

$$Q_{BP} = 9440,9 \cdot 21039,23 = 198629,3MJ = 55,17MWh$$

Výroba tepelné energie:

$$E_{BP,t} = Q_{BP} \cdot \eta_t, \quad (\text{Rov. 7.7})$$

kde $E_{BP,t}$ – vyrobená tepelná energie [MWh]
 η_t – tepelná účinnost [-]

$$E_{BP,t} = 55,17 \cdot 0,43 = 23,72MWh$$

Výroba elektrické energie:

$$E_{BP,el} = Q_{BP} \cdot \eta_{el}, \quad (\text{Rov. 7.8})$$

kde $E_{BP,el}$ – vyrobená elektrická energie [MWh]
 η_{el} – elektrická účinnost [-]

$$E_{BP,el} = 55,17 \cdot 0,425 = 23,44 \text{ MWh}$$

Z výpočtů vyplývá, že denně se z bioplynu vyrobí 23,72 MWh tepelné energie. Pro ohřátí vstupujícího kalu a pokrytí tepelných ztrát je potřeba 16,2 MWh. Množství vyrobené tepelné energie je dostačující a ještě část zůstane. Přebytečná tepelná energie se může využít k ohřívání užitkové vody, topení v objektech BPS nebo v podniku. Tepelná bilance je uvedena v Tab. 7.9.

Ztráty obou nádrží	1,31	[MWh]
Ztráty potrubím	0,105	[MWh]
Teplo na ohřev kalu	14,73	[MWh]
Celkové dodané teplo	16,2	[MWh]
Vyrobené teplo z KJ	23,72	[MWh]
Zbylé teplo	7,42	[MWh]

Tab. 7.9 Tepelná bilance

Vznikající elektrická energie je více ceněna než energie tepelná, protože je dotována a umožňuje zisk tzv. zelených bonusů. S vyrobenou elektrickou energií lze naložit dvěma způsoby. První z nich je prodej elektrické energie. To vyžaduje vybudovat elektrickou přípojku a uzavřít smlouvu s odběratelem. Druhá možnost je využití energie přímo v podniku a dostávat zelené bonusy. Výkupní cena elektrické energie, vzniklá spalováním bioplynu, produkovaného z kalu pro zdroj uvedeny do provozu po 1. lednu 2006 včetně je dle [43] 3 550 Kč/MWh a zelené bonusy jsou dle [43] 2 580 Kč/MWh platné pro rok 2010.

7.4 Hrubý odhad nákladů

Před rozhodnutím o výstavbě BPS je nezbytně nutné provést podrobné ekonomické propočty plánované stavby. Tyto propočty by měly rozhodnout o realizovatelnosti stavby, které by měly být provedeny odborníky v daném oboru. Následující ekonomická bilance je hrubý odhad uvažovaných nákladů na stavbu BPS dle [44].

Nejdůležitějšími údaji pro zjednodušený výpočet BPS jsou množství a vlastnosti zpracovaného materiálu. Mezi důležité vlastnosti patří:

- obsah sušiny
- podíl organických látek
- pH
- poměr C : N

Z těchto parametrů jsou stanoveny hodnoty jako: optimální skladba vstupního substrátu produkce bioplynu, měrná produkce bioplynu, volba provozní teploty aj.

Stanovení těchto parametru bylo předmětem této diplomové práce. Postupy stanovení těchto parametrů jsou popsány v předchozích kapitolách. V následující tabulce (Tab. 7.10) jsou popsány základní vlastnosti vstupujícího kalu.

Název	Sušina [%]	ZŽ [%]	C : N	pH (vápněný)	Měrná produkce BP [m_N^3/kg_{os}]
Kal z výroby buničiny	7	50 - 90	7,75	10 - 13	0,441

Tab. 7.10 Vlastnosti kalu

Investiční náklady jsou závisle na mnoha faktorech. Jako je plánovaná velikost BPS, použité technologie, zda je stavba celá realizována na klíč nebo je podíl vlastních prací, jestli byla na stavbu získána dotace ze státního fondu životního prostředí či nikoliv atd. Hrubé rozdělení investic na vybudování BPS je přibližně dle [44] takové:

- 43 % - stavební část (geologický průzkum, výkopové práce, výstavba fermentorů, stavba ostatních budov)
- 23 % - kogenerace (kogenerační jednotka, rozvody plynu, připojení k elektrické síti)
- 17 % - rozvod tepla (vytápění fermentorů, potrubní síť, regulační a ovládací zařízení)
- 13 % - rozvod materiálu (čerpadla, míchací technika, potrubní síť, regulační a ovládací zařízení)
- 4 % - projektová příprava (projektová dokumentace, posouzení vlivu na životní prostředí)

Na základě těchto předpokladů bylo odhadnuto hrubé náklady na stavbu BPS, které jsou uvedené v

Název	mil. Kč
Stavební část	41,1
Kogenerace	22,03
Rozvod tepla	16,25
Rozvod materiálu	12,42
Projektová příprava	3,8
Celková cena	95,6

Tab. 7.11 Odhad nákladů na BPS

Celkové investiční náklady se dají přesněji stanovit z podrobnějšího rozpisu cen jednotlivých součástí celé technologie a z detailního ceníku jednotlivých staveních prací. Pro BPS platí, že doba návratnosti investice do 5 let je velmi dobrá, do 10 let přijatelná. Po 15 letech provozu dosáhne většina hlavních prvků BPS hranice životnosti a je třeba je vyměnit a začínají se zvyšovat náklady na údržbu a opravy dle [44].

8 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo provést fermentační zkoušky kalu z výroby buničiny a krmného droždí z ČOV v podniku Biocel Paskov a.s.. Dalším úkolem bylo najít vhodné v lokalitě dostupné suroviny na společnou kofermentaci. Stanovit u těchto zvolených substrátů jejich sušinu a ztrátu žíháním aj. Vyzkoušet různé provozní podmínky jako je mezofilní nebo termofilní pásmo teplot, různé zatížení organickou sušinou. Cílem bylo získané výsledky vyhodnotit a určit optimální skladbu vstupního substrátu a optimální provozní podmínky. Na základě těchto dat provést hrubý návrh BPS včetně její energetické a ekonomické bilance.

V prvních kapitolách je stručně popsán vznik buničiny v podniku Biocel Paskov a.s. a provoz ČOV ve stejném podniku. V následující kapitole je popsán vznik bioplynu a faktory, které ovlivňují tento proces. V experimentální části jsou popsány vlastnosti vstupujícího odvodněného kalu, který má sušinu 18 – 24 % hm. a organiku cca 89 % hm. a navrženy možné postupy řešení při anaerobní fermentaci. Na základě těchto předpokladů se přistoupilo k ověření poznatků v laboratořích ÚPEI. Byly uskutečněny tři pokusy s různými provozními podmínkami procesu. Po vyhodnocení jednotlivých zvolených parametrů byl vybrán pokus č. 2 jako optimální řešení. Množství vznikajícího metanu v bioplynu bylo průměrně 58,8 % obj. a měrná produkce bioplynu $0,441 \text{ m}_N^3/\text{kg}_{\text{os}}$. Na základě těchto a dalších potřebných informací bylo přikročeno k návrhu BPS. Provedla se volba a výpočet vyhnívacích nádrží. Dále byla navržena tepelná izolace pro nádrže a vypočteno množství tepla, které je třeba do systému dodat v důsledku tepelných ztrát do okolí. Na základě denní produkce bioplynu a množství potřebného tepla, byla navržena kogenerační jednotka. V dalším kroku bylo přistoupeno k samotné tepelné bilanci, ze které vyplývá, že vyrobené teplo z kogenerační jednotky stačí na pokrytí celkových tepelných ztrát. Vyrobená elektrická energie se může využívat v podniku nebo prodávat. Také byly odhadnuty hrubé náklady na stavbu samotné BPS.

Tato diplomová práce nastiňuje představu, jaké kroky jsou nezbytně nutné před realizací samotné BPS. Od zvolení vhodného substrátu a fermentačních zkoušek, kterými celý proces začíná, přes vyhotovení různých posudků, vyhotovení projektové dokumentace až po realizaci samotné stavby. Celý tento proces je určitě náročný a vyžaduje preciznost a cílevědomost. Zásoby fosilních paliv stále ubývají a cena energií roste. Proto je zavádění výroby a následné spalování bioplynu stále výhodnější. Počáteční investice do BPS jsou stále dosti vysoké, ale při zvolení optimálních technologií a dodržování všech provozních parametrů skrývá bioplyn v sobě veliký potenciál do budoucnosti.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Zemědělská fakulta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích [online] Dostupné z <<http://home.zf.jcu.cz/~kpicha/zbn/zbn/papir.doc>>, [cit. 2010-1-10].
- [2] Misickov [online] Dostupné z <<http://www.misickov.cz/pracovni/papir.htm>>, [cit. 2010-1-15].
- [3] Anrika (NNO) [online] Dostupné z <<http://www.odpady.arnika.org/recyklace-papiru>>, [cit. 2010-1-15].
- [4] Integrovaná prevence a omezování znečištění (IPPC): Průmysl papíru a celulózy [online] Dostupné z <<http://www.ippc.cz/obsah/CF0185>>, [cit. 2010-1-15]
- [5] KRPA Holding CZ, a.s. [online] Dostupné z <<http://www.krpa.cz/default.asp?f=paper&id=61&lng=cs>>, [cit. 2010-1-20]
- [6] SLONČÍK, D. *Zpráva o životním prostředí za leden 2008*. Paskov. 8.1. 2008
- [7] ŘEZÁČ, J.: *Tepelná bilance anaerobní části ČOV*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 38 Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Pěček
- [8] ZEMANOVÁ, K.: *Možnosti zpracování kalu z výroby papíru a celulózy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Boráň, Ph.D.
- [9] BIOCEL Paskov a.s.: *Informace poskytnuté z Biocelu Paskov a.s.* Paskov 2009
- [10] DOHÁNYOS, Michal: *Efektivní využití a likvidace čistírenských kalů*. Biom.cz [online]. 2006-05-09 [cit. 2010-01-30]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/efektivni-vyuziti-a-likvidace-cistirenskych-kalu>>. ISSN: 1801-2655
- [11] LYČKOVÁ, B., FEČKO, P., KUČEROVÁ, R.: *Multimediální učební texty zaměřené na problematiku zpracování kalů*. [online] Dostupné z <<http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy2005/Bara/index.html>>, [cit. 2010-1-30]
- [12] ŽÍDEK, M.: *Energie z biomasy III*. Brno 2004 [online] Dostupné z <http://oei.fme.vutbr.cz/konfer/biomasa_iii/papers/08-Zidek.pdf>, [cit. 2010-2-20]
- [13] HOLUB, R.: *Problematika síry a křemíku v bioplynu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Beňo.
- [14] KAJAN, M., LHOTSKY, R.: *Možnosti zvýšení výroby bioplynu na stávajících zařízeních*. Třeboň 2006 [online] Dostupné z <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf>>, [cit. 2010-2-20]

-
- [15] DOHÁNYOS, Michal: *Anaerobní reaktor není černou skříňkou* - teoretické základy anaerobní fermentace. *Biom.cz* [online]. 2008-11-17 [cit. 2010-2-20]. Dostupné z <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace>>. ISSN: 1801-2655.
- [16] STRAKA, F. a kol.: *Bioplyn*. 2. vyd. GAS s.r.o., Praha 2006. 706 s. ISBN 80-7328-090-6.
- [17] DOHÁNYOS, M. a kolektiv : *Anaerobní čistírenské technologie*. 1 vydání. Brno: Noel 2000 s.r.o., 1998. 340 s. ISBN 80-86020-19-3
- [18] *Využití bioplynu v zemědělství*. Příbram 2008 [online] Dostupné z <<http://www.kis-stredocesky.cz/UserFiles/File/text%20bioplyn.doc>>, [cit. 2010-2-20]
- [19] BIOCEL Paskov a.s.: *Zpráva z provozního pokusu spalování kalu na kúrovém kotli a analýzy Biocelu Paskov a.s. o dalším využití kal*. Paskov. 2005
- [20] RWTÜV Praha s.r.o.: *Výsledky laboratorního rozboru kalu* Brno 2005
- [21] PĚČEK, J., HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., BEŇO, Z.: *Využití kalu z výroby buničiny a krmného droždí*. Odpadové fórum 2009 - sborník přednášek, pp.3561-35697, ISBN 978-80-02-02108-7, (2009) článek ve sborníku
- [22] Dräger s.r.o. [online] Dostupné z <http://www.draeger.com/index_cz.html>, [cit. 2010-3-02]
- [23] POŠTA, J.: *Člověk a odpadní voda - I. část* [online] Dostupné z <http://posta.tf.czu.cz/U3V/U3V_text2-2.doc>, [cit. 2010-3-02]
- [24] PĚČEK, J., HOUDKOVÁ, L., BORÁŇ, J., BEŇO, Z.: *Návrh a provoz laboratorní fermentační jednotky*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, ÚPEI, 2007. 9 s
- [25] SOVAK ČR, *Sírné sloučeniny ve vodohospodářské praxi a v ochraně prostředí*. 2002, roč. 11, č. 9, s. 4-9, [online] Dostupné z <[http://www.mzp.cz/www/ekodisk-new.nsf/1a76d1df1a0e29f0c1256e2800520b9d/ccf0268761d82571c1256fc00038e589/\\$FILE/SOVAK%202002-09.pdf](http://www.mzp.cz/www/ekodisk-new.nsf/1a76d1df1a0e29f0c1256e2800520b9d/ccf0268761d82571c1256fc00038e589/$FILE/SOVAK%202002-09.pdf)>, [cit. 2010-3-15]
- [26] KECLÍK, F., JENÍČEK, P.: *Mikroaerobní prostředí v biologických systémech pro zpracování kalu* Vysoká škola chemicko – technologická v Praze, Ústav technologie vody a prostředí, 2008. 7 s
- [27] SOVAK ČR, *Mikroaerace – ekonomická metoda odstraňování bioplynu*. 2006, roč. 15, č. 2, s. 8-10, [online] Dostupné z <http://www.sovak.cz/sites/File/casopis_cela_cisla_2006/sovak0206.pdf>, [cit. 2010-3-15]
- [28] STRAKA, F., KUNČAROVÁ, M., LACEK P.: *Optimalizace vsázek pro bioplynové stanice při použití biomasy, živočišných odpadů nebo dalších možných vedlejších*
-

-
- živočišných produktů* Ústav pro výzkum a využití paliv a.s. [online] Dostupné z <www.mze.cz/attachments/Optimalizace_vsazek.doc>, [cit. 2010-3-20]
- [29] KAJAN, M., LHOTCKÝ, R.: *Možnosti zvýšení výroby bioplynu na stávajících zařízeních*. Třeboň 2006 [online] Dostupné z <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/30.pdf>>, [cit. 2010-3-20]
- [30] SCHULZ, H., EDER, B.: *Bioplyn v praxi*. 1. české vyd. HEL, Ostrava 2004. 168 s. ISBN 80-86167-21-6
- [31] Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: *Integrovaný systém elektronických studijních opor VŠCHT Praha* [online] Dostupné z <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/adsorpce_z_plynne_faze_na_tuhe_latce.html>, [cit. 2010-3-20]
- [32] KS Klima-Service a.s. *Odsiřovací zařízení SULOFF* [online] Dostupné z <<http://www.ksklimaservice.cz/?download=suloff.pdf>>, [cit. 2010-3-20]
- [33] KÁRA, J., PASTOREK, Z., PŘIBYL, E., a kol.: *Výroba a využití bioplynu v zemědělství*. VÚZT, v.v.i., Praha 2007. 117 s. ISBN 978-80-86884-28-8
- [34] *BIOODPAD – BIOPLYN – ENERGIE*. Odpadové fórum, Praha 2009 [online] Dostupné z <<http://www.odpadoveforum.cz/>>, [cit. 2010-4-02]
- [35] HLAVÍNEK, P., HLAVÁČEK, J., JEŽ, M., *Čistění odpadních vod – praktické příklady výpočtů*. VUT Brno: 1995. 135 s.
- [36] PĚČEK, J.; HOUDKOVÁ, L.; BEŇO, Z.; ŘEZÁČ, J.: *Energetické využití kalu z výroby buničiny a krmného droždí*, Odpadové fórum 2010 - sborník přednášek, ISBN 978-80-85990-12-6, (2010) článek ve sborníku
- [37] PĚČEK, J.; HOUDKOVÁ, L.; BORÁŇ, J.; BEŇO, Z.; ZEMANOVÁ, K.: *Fermentation of Sludge from Pulp and Paper Plant*, HISA 2008, pp.1454-1454, ISBN 978-80-02-02051-6, (2008), ČSCHI článek ve sborníku
- [38] Ekolistu.cz, *Ve Žďáru nad Sázavou se bude vyrábět energie z komunálního odpadu* [online] Dostupné z <http://www.ekolist.cz/zprava.shtml?x=2174992&all_ids=1>, [cit. 2010-5-02]
- [39] TEDOM s.r.o.: *Kogenerační jednotky* [online] Dostupné z <<http://kogenerace.tedom.cz/prehled-typu-bioplyn.html>>, [cit. 2010-5-10]
- [40] KRBEK, J., POLESNÝ, B.: *Kogenerační jednotky -Zřizování a provoz*. 1 vydání GAS s.r.o., Praha 2007, ISBN 978-80-7328-151-9
- [41] KANARÁD, L., DUNDÁLKOVÁ, P., MARADA, P., MAREČEK, J.: *Příručka – Uplatnění a ověření možnosti využití MKM a kejdy v režimu výroby bioplynu s aplikací biopreparátů*. [online] Dostupné z <http://eagri.cz/public/eagri/file/32322/Étapa_V_MKM_a_bioplyn_FV.pdf>, [cit. 2010-5-10]
-

- [42] TZB-INFO.cz: Tepelné vodivosti materiálů [online] Dostupné z <http://stavba.tzb-info.cz/docu/tabulky/0000/000086_katalog.html>, [cit. 2010-5-15]
- [43] ERÚ: *Cenové rozhodnutí ERÚ č. 4/2009 ze dne 3. listopadu 2009, kterým se stanovuje podpora pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů energie, kombinované výroby elektřiny a tepla a druhotných energetických zdrojů*, Energetický regulační věstník, částka 9, ze dne 6. listopadu. 2009 [online] Dostupné z <http://www.eru.cz/user_data/files/cenova%20rozhodnuti/CR%20elektro/OZ/ER%20CR%204_2009_OZE_KVET_DZI.pdf>, [cit. 2010-5-15]
- [44] MUŽÍK, O., ABRHAM, Z.: *Economic modelling of biogas production*. In Management of Production Systéme with support of Information Technologies and Control Engineering, Nitra 2006, [online] Dostupné z <http://www.vuzt.cz/doc/ekonomika/BP_model_PDF.pdf?menuid=484>, [cit. 2010-5-20]
- [45] BIOPROFIT s.r.o.: inženýring bioplynových stanic [online] Dostupné z <<http://www.bioprofit.cz/>>, [cit. 2010-5-20]

10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

symbol	význam	jednotka
A	Obsah plochy	m^2
α_1	Koeficient přestupu tepla ze suspenze do stěny	W/m^2K
α_2	Koeficient přestupu tepla ze stěny do okolního prostředí	W/m^2K
BSK_5	Biologická spotřeba kyslíku za pět dní	mg/l
c_i	Objemový zlomek „i“ složky v plynné směsi	-
c_p	Tepelná kapacita kalové suspenze	J/kgK
$CHSK_{Cr}$	Chemická spotřeba kyslíku vázaná no obsah chromu	mg/l
d_i	Tloušťka „i“ vrstvy	m
$E_{BP,t}$	Vyrobená tepelná energie	MWh
$E_{BP,el}$	Vyrobená elektrická energie	MWh
k	Koeficient prostupu tepla	W/m^2K
λ_i	Tepelná vodivost „i“ materiálu	W/mK
LHV_{BP}	Celková výhřevnost plynu	kJ/m_N^3
LHV_i	Výhřevnost „i“ složky	kJ/m_N^3
m_a	Hmotnost prázdného kelímku	g
m_b	Hmotnost kelímku se sušinou	g
m_c	Hmotnost kelímku zpopelněnou sušinou	g
m_N	Hmotnost neodvodněného kalu	kg
η_t	Tepelná účinnost	-
η_{el}	Elektrická účinnost	-
Q_{BP}	Energetický obsah bioplynu	kJ
Q_K	Tepelná energie	J
Q_Z	Energie na pokrytí ztrát	W
Q_{ZF}	Tepelné ztráty celého fermentoru	W
T_1	Teplota vstupujícího kalu	$^{\circ}C$
T_2	Teplota uvnitř nádrže	$^{\circ}C$
T_{IN}	Teplota uvnitř nádrže	$^{\circ}C$
T_O	Teplota vně nádrže	$^{\circ}C$
V_{BP}	Množství vznikajícího bioplynu	m_N^3
V_{sp}	Specifická produkce bioplynu	m_N^3/kg_{os}
w_o	Hmotnostní zlomek organiky v kalu [-]	-
w_s	Hmotnostní zlomek sušiny v kalu	-
w_v	Ztráta žiháním kalu	%

11 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

symbol	význam
ČOV	Čistírna odpadních vod
BP	Bioplyn
BPS	Bioplynová stanice
BSK ₅	Biologická spotřeba kyslíku za pět dní
CHSK	Chemická spotřeba kyslíku indikující množství chemických oxidovatelných organických látek v odpadní vodě
KJ	Kogenerační jednotka
ÚPEI	Ústav procesního a ekologického inženýrství
ZŽ	Ztráta žháním

12 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Druhy buničiny [2]	13
Obr. 2.2 Chemická výroba buničiny [2]	14
Obr. 3.1 Schéma ČOV z výroby buničiny [8]	17
Obr. 3.2 Způsoby nakládání s kalem v ČR v r.2003 [11].....	19
Obr. 4.1 Schéma anaerobního rozkladu [12].....	21
Obr. 4.2 Rozdělení teplotních pásem [12].....	22
Obr. 5.1 Odvodněný kal	26
Obr. 5.2 Technologické schéma fermentační jednotky [21]	27
Obr. 5.3 Fermentační jednotka	28
Obr. 5.4 Sušící váhy	29
Obr. 5.5 Dräger X-am 7000 [22]	29
Obr. 5.6 Žihací pec	30
Obr. 5.7 Vliv teploty na produkci bioplynu [30].....	33
Obr. 5.8 Schéma odsiřování [27].....	35
Obr. 5.9 Vývoj koncentrace sulfanu [27]	35
Obr. 6.0 Odsiřovací jednotka Suloff - ČOV Prostějov	37
Obr. 6.1 Průběh anaerobní fermentace při 38 °C	38
Obr. 6.2 Průběh anaerobní fermentace při 54,5 °C	39
Obr. 6.3 Průběh anaerobní fermentace při 54,5 °C	40
Obr. 6.4 Bioplynová stanice [38].....	43
Obr. 6.5 Způsoby ohřevu reaktorů [33].....	45
Obr. 6.6 Různé druhy reaktorů [33]	45
Obr. 6.7 Způsoby míchání reaktorů [33]	46

13 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1 Vlastnosti odvodněného kalu [19].....	25
Tab. 5.2 Výsledky rozboru kalu [20].....	26
Tab. 5.3 Materiál pro kofermentaci [16], [28], [41].....	33
Tab. 5.4 Množstevní dostupnost surovin [16], [28], [41].....	37
Tab. 5.5 Složení vstupní směsi	38
Tab. 5.6 Složení vstupní směsi	39
Tab. 5.7 Složení vstupní směsi	40
Tab. 5.8 Informace o pokusech	42
Tab. 7.1 Vlastnosti kalů.....	49
Tab. 7.2 Rozměry nádrže.....	49
Tab. 7.3 Složení stěny stropu [16], [42]	50
Tab. 7.4 Složení stěny [16], [42]	51
Tab. 7.5 Složení stěny dna [16], [42]	51
Tab. 7.6 Množství tepla k ohřevu	51
Tab. 7.7 Výhřevnost bioplynu	52
Tab. 7.8 Parametry Quanto D580 SP BIO [39].....	53
Tab. 7.9 Tepelná bilance.....	54
Tab. 7.10 Vlastnosti kalu	55
Tab. 7.11 Odhad nákladů na BPS.....	55

14 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: Datový disk obsahující diplomovou práci v elektronické podobě.