VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

VYUŽITÍ TEPLA PŘI BIODEGRADAČNÍCH PROCESECH JAKO POTENCIÁL ÚSPORY ELEKTRICKÉ ENERGIE
UTILIZATION OF HEAT IN BIODEGRADATION PROCESSES AS ELECTRICITY SAVINGS POTENTIAL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Michael Kuběna**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**
Ústav elektroenergetiky

Student: Michael Kuběna ***ID:*** 164751
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Využití tepla při biodegradačních procesech jako potenciál úspory elektrické energie

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popis biodegradačních procesů a jejich potenciál.
2. Konstrukce různých bioreaktorů.
3. Výběr a návrh experimentálního reaktoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 8.2.2016 ***Termín odevzdání:*** 24.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.
Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBĚNA, M. *Využití tepla při biodegradačních procesech jako potenciál úspory elektrické energie.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 51 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

……

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Petru Baxantovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky, které mi umožnily tuto práci vytvořit.

ABSTRAKT

Cílem této práce je zkoumat netradiční využití biomasy – konkrétně využití tepla, které vzniká při biodegradačních procesech, při nichž dochází k odbourávání organických látek. V předložené práci jsou nejprve popsány běžné způsoby využití biomasy. V druhé části je práce zaměřena na popis biodegradačních procesů. Také jsou zde shrnuty jednotlivé konstrukce bioreaktorů, zařízení, ve kterých probíhají tyto procesy. Dále jsou v práci popsány současné systémy, které využívají toto teplo. V rámci praktické části byl sestrojen bioreaktor se systémem odvodu tepla. Sestrojený bioreaktor byl následně monitorován teplotními čidly, jež sloužily k zmapování probíhajících procesů uvnitř bioreaktoru a k zjištění vhodné doby k odběru tepla.

KLÍČOVÁ SLOVA

biodegradace, vytápění kompostem, bioreaktor, biomasa, bioplynové stanice

ABSTRACT

The present thesis deals with a non-traditional use of biomass–in particular the use of heat generated by the biodegradation processes, involving the degradation of organic substances. The theoretical part of the thesis discusses common uses of biomass in general first, later focusing on the description of biodegradation processes. Various types of bioreactors, in which biodegradation processes take place, are also briefly examined. Moreover, modern systems using this type of heating are described. The practical part focuses on the construction of a bioreactor with the system of heat dissipation. The bioreactor was monitored with temperature sensors to survey the ongoing processes inside the bioreactor and to determine the appropriate time to abstract the heat.

KEY WORDS

biodegradation, compost heating system, bioreactor, biomass, biogas stations

Obsah

Seznam obrázků 9
Seznam tabulek 10
Seznam symbolů a zkratek 11
1 Úvod 12
2 Biomasa 14
2.1 Úvod 14
2.2 Rozdělení biomasy 14
2.3 Zpracování biomasy 15
2.3.1 Anaerobní fermentace odpadů z živočišné výroby 15
2.4 Využití tepla z bioplynových stanic 18
2.4.1 Možné komplikace využití tepla 18
2.4.2 Teplo pro potřebu samotného procesu 18
2.4.3 Vytápění 18
2.4.4 Sušení 20
2.4.5 Chlazení 20
2.4.6 Dodatečná výroba elektřiny 21
3 Získávání odpadního tepla při zpracování biomasy 22
3.1 Čistění odpadních vod 22
3.2 Kompostování 23
3.2.2 Výzkumy a metody získání a přenosu tepla při biodegradaci 26
3.2.3 Transport tepla 26
3.2.4 Komerčně využívané systémy 28
4 Praktická část 31
4.1 Návrh bioreaktoru 31
4.2 Realizace bioreaktoru 33
4.2.1 Plnění bioreaktoru 35
4.2.2 Způsob jímání tepla 36
4.3 Vytápění 37
5 Vyhodnocení 40
5.1 Umístění čidel 40

5.2 Měření 40
5.3 Výpočty 44
5.3.1 Výpočet výkonu 44
5.3.2 Výpočet tepelných ztrát 45
6 Závěr 48
Použitá literatura 49
Příloha A 51

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Graf vyrobené elektrická energie z OZE v ČR v jednotlivých rocích 13
Obrázek 2-1 Schéma bioplynové stanice firmy agriKomp 17
Obrázek 2-2 Graf produkce tepla v BPS [6] 18
Obrázek 2-3 Schéma latentního systému pro skladování tepla [6] 20
Obrázek 3-1 Odvod tepla z trojúhelníkového profilu [12] 24
Obrázek 3-2 Odvod tepla z lichoběžníkového profilu [12] 24
Obrázek 3-3 Příklad umístění hadice k transportu tepla v kompostu [15] 27
Obrázek 3-4 Schéma trubice isobars 28
Obrázek 3-5 Schéma přenosu tepla z kompostu [14] 30
Obrázek 4-1 Původní návrh bioreaktoru 31
Obrázek 4-2 Návrh jednoho segmentu bioreaktoru 32
Obrázek 4-3 Dílčí část bioreaktoru 33
Obrázek 4-4 Spodní část bioreaktoru 34
Obrázek 4-5 Kompletní bioreaktor 34
Obrázek 4-6 Umístěni výměníku do bioreaktoru 35
Obrázek 4-7 Konstrukce k jímání bioplynu 36
Obrázek 4-8 Umístění polyetylenové hadice do bioreaktoru 37
Obrázek 4-9 Teplota kompostovaného materiálu po vyjmutí z bioreaktoru 38
Obrázek 4-10 Finální schéma otopného systému 39
Obrázek 5-1 Model rozmístění čidel v bioreaktoru 40
Obrázek 5-2 Zobrazení nárůstu teplot v prvních dvanácti dnech 41
Obrázek 5-3 Průběh teploty v bioreaktoru a teploty okolí v čase 42
Obrázek 5-4 Průběh teploty okolí a vytápěného objektu v čase 42
Obrázek 5-5 Průběh teplot v bioreaktoru v čase 43
Obrázek 5-6 Průběh teploty v bioreaktoru po vytápění 44
Obrázek 5-7 Zobrazení teploty konstrukce bioreaktoru pomocí termokamery 46

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Podíl OZE v ČR [1] 12
Tabulka 2 - Produkce bioplynu z vybraných substrátů [2] 17
Tabulka 3 – Náklady na topný systém 39

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Název	Jednotka
P	výkon	W
P_{ztr}	Ztrátový výkon	W
c	Měrná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
ρ	hustota	$Kg.m^{-3}$
λ	Tepelná vodivost	$W.m^{-1}.K^{-1}$
m	Hmotnost	kg
l	Výška	m
BPS	Bioplynová stanice	-
BTU	British thermal unit, britská tepelná jednotka	-
CZT	Centrální zásobování teplem	-
FVE	Fotovoltaická elektrárna	-
PVC	Polyvinylchlorid	-
PE	Polyethylen	-
RC	Rankin – Clausiův cyklus	-
ORC	Organický Rankin – Clausiův cyklus	-
OZE	Obnovitelný zdroj energie	-
UNH	Univerzita of New Hampshire	-

1 ÚVOD

Rostoucí zatížení na životní prostředí, ať už v podobě výfukových plynů, tepelného znečištění na straně jedné, tak těžbou uhlí, ropy či nakládáním s vyhořelým jaderným palivem na straně druhé, vede ke snaze většího využití obnovitelných zdrojů energie. V souvislosti s tím byla provedena řada právních kroků. V roce 1997 byla vedle Kjotského protokolu o snižování emisí také přijata tzv. bílá kniha o obnovitelných zdrojích, kde si EU dala za cíl vyrábět do roku 2010 12 % spotřeby energie a 22,1 % spotřeby elektřiny z obnovitelných zdrojů. Dále byla přijata nová směrnice r. 2009, která stanovila, že do roku 2020 musí 20% spotřeby energie EU povinně pocházet z obnovitelných zdrojů energie. Co se týče samotné České republiky v roce 2020 by měl podíl OZE představovat 13%, což již bylo splněno v roce 2013, jak v lze vidět v tab. 1.1.

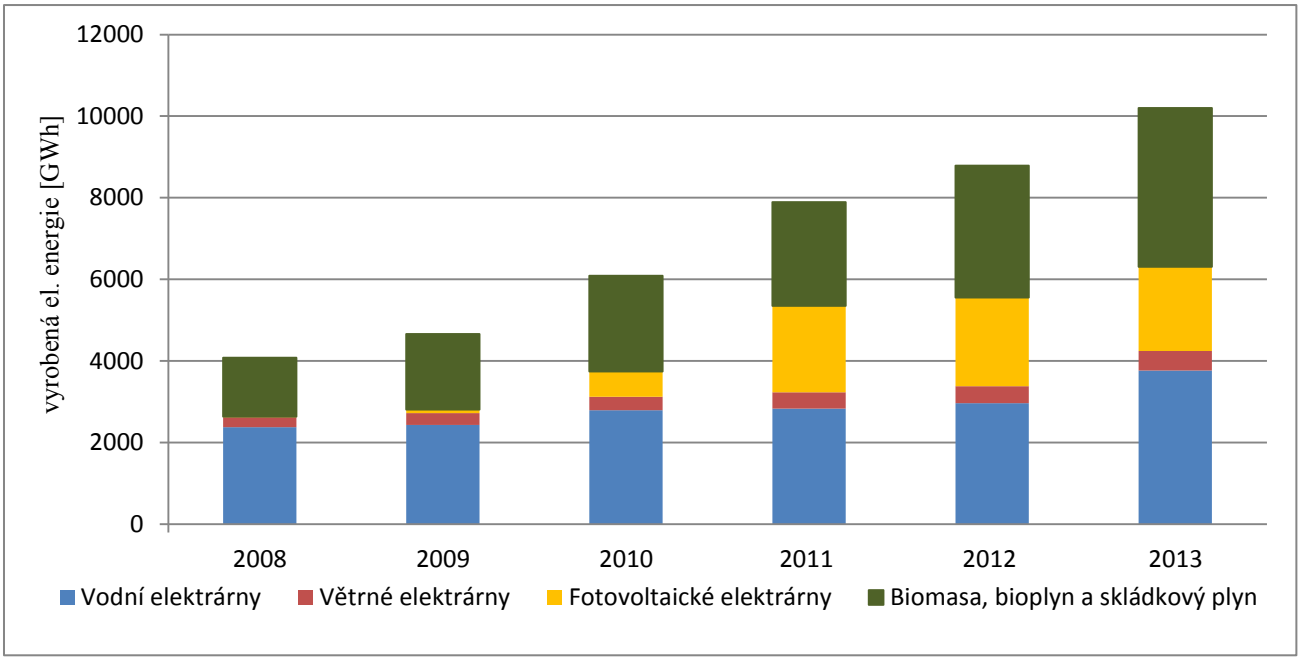
Tabulka 1 - Podíl OZE v ČR [1]

Podíl OZE na hrubé domácí spotřebě elektřiny v ČR						
Rok	2013	2012	2011	2010	2009	2008
Podíl na celkové spotřebě	14,53 %	12,48 %	10,21 %	8,24 %	6,80 %	5,70 %

Obnovitelnými zdroji energie se označují energie, které mají schopnost se částečně nebo úplně obnovovat a dle se dají rozdělit do třech základních skupin podle jejich zdrojů, dále pak do dalších podskupin.

- Sluneční energie – jedná se o nejčastěji využívanou energii mezi OZE, která je získávána termonukleární reakcí na Slunci, do této kategorie patří:
    - Sluneční záření
    - Energie větru
    - Teplo okolí
    - Biomasa
    - Energie vody
    - Energie moří
- Geotermální energie – tato energie se uvolňuje v nitru země, hlavní část této energie pochází např. z jaderných pochodů (štěpení), pohybu litosférických desek.
- Slapová energie – v této formě energie je využíváno přílivu a odlivu, tzn. gravitační síly především mezi Měsícem a Zemí.

Z výše uvedeného vyplývá, že výběr obnovitelných zdrojů je opravdu široký a záleží na dané lokalitě, jaká forma energie je vhodná na další využití. Například geotermální energie je velmi hojně využívaná v USA a Islandu. Přímořské státy využívají slapovou energii, energii moří (vlny, proudy, teplotní gradienty). Velký vzestup zaznamenává fotovoltaika a to jak v státech jižní a střední Evropy, tak v USA. Stejně tak využití biomasy má vzestupnou tendenci. Tento způsob využití energie bude níže popsán podrobněji.



Obrázek 1-1 Graf vyrobené elektrická energie z OZE v ČR v jednotlivých rocích

V grafu na obrázku 1-1 je zobrazena vyrobená elektrická energie z obnovitelných zdrojů v ČR, kde lze vidět vzrůstající podíl obnovitelných zdrojů. Především FVE a biomasy.

2 BIOMASA

2.1 Úvod

Jedná se o sluneční energii, která je pomocí fotosyntézy *(rov. 2.1)* v rostlinách přeměněná na energii chemickou. V případě rozbití chemických vazeb mezi uhlíkem, kyslíkem a vodíkem, ať už přímým spálením nebo rozkladem získáme tepelnou energii, popř. jiný druh paliva.

$$6H_2O + 6CO_2 \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \qquad (2.1)$$

Pro efektivní využití je potřeba kvalitní biomasa. Jedním z rozhodujících ukazatelů kvality je obsah vody, který má vliv na její výhřevnost. Při spalování je optimální hodnota vlhkosti pod 20 %. [2]

2.2 Rozdělení biomasy

Biomasu je možné rozdělit několika způsoby podle různých kritérií. Může to být například rozdělení podle:

- Záměrně pěstovaná biomasa – jedná se o biomasu, která je záměrně pěstována na využití v energetice. Jde o poměrně diskutabilní část, je však ze strany EU podporována i přes své negativa Do této kategorie se řadí:
    - Škrobeno-cukernaté plodiny (obilí, brambory, cukrová řepa)
    - Olejnaté plodiny (řepka, slunečnice)
    - Dřeviny (olše, topoly)
- Odpadní biomasa – do této kategorie patří biomasa, která již dříve sloužila k jiným, primárním účelům. Díky tomu se zpracovává odpad, který by již neměl další využití. Patří zde například:
    - Lesní odpady (větve, kůry stromů atp.)
    - Rostlinné odpady (řepková a kukuřičná sláma, seno)
    - Průmyslové odpady (odpady z mlékáren, lihovarů, dřevozpracujícího průmyslu)
    - Živočišné odpady (kejda, hnůj)

Z hlediska dalšího zpracování je také možné dělení:

- Biomasa vhodná pro spalování a zplyňování
- Biomasa vhodná pro anaerobní fermentaci

2.3 Zpracování biomasy

Na základě fyzikálních a chemických vlastností se volí technologie a postup zpracování biomasy. Jak již bylo zmíněno v úvodu, primárním faktorem je obsah sušiny v biomase. K přeměně biomasy slouží procesy, které se nazývají mokré a suché. Dle [2] se jednotlivé procesy dělí na:

- Termochemická přeměna biomasy (suché procesy)
  - Spalování
  - Zplyňování
  - Pyrolýza
- Biochemická přeměna biomasy (mokré procesy)
  - Anaerobní fermentace
  - Aerobní fermentace
- Fyzikální a chemická přeměna biomasy
  - Mechanicky (drcení, štípaní, lisování)
  - Chemicky (esterifikace bioolejů)
- Získávání odpadního tepla při zpracování biomasy
  - Kompostování
  - Čistění odpadních vod
  - Anaerobní fermentace pevných organických odpadů

V další části se bude práce zaměřovat především na anaerobní fermentací a získávání odpadního tepla při zpracování biomasy.

2.3.1 Anaerobní fermentace odpadů z živočišné výroby

Vstupní surovina je tvořena především z odpadů živočišné výroby (kejda), nicméně fermentované látky obsahují také zbytky biomasy rostlinného původu, kuchyňské odpady apod. (viz Tab. 2)

Při anaerobní (bez přístupu vzduchu) fermentaci se za působení mikroorganismů rozkládá organická hmota, finálním produktem je bioplyn, což je směs plynů: CH_4,CO_2, H_2,N_2, H_2S, dále to jsou nerozložitelné zbytky a digestát, který je při splnění hygienických norem vhodný pro další zemědělské využití jako hnojivo. [4] Podle [3] proces fermentace probíhá ve čtyřech fázích rozkladu, jsou to:

1) Hydrolýza – v tomto stádiu rozkladu je důležitá dostatečná vlhkost prostředí, v této etapě dochází k rozkládání makromolekulárních organických látek na nízkomolekulární látky rozpustné ve vodě
2) Acidogenze – v této fázi jsou látky dále rozkládány na jednodušší organické látky – na kyseliny (kapronová, valerová, máselná). Také zde vzniká H_2 a CO_2

3) Acetogenze – zde se přeměňují vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou
4) Metanogeneze – působením metanogeních bakterií je kyselina octová rozkládána na metan a oxid uhličitý, zároveň hydrogení bakterie produkují metan z vodíku a oxidu uhličitého

Pro správný průběh anaerobní fermentace je třeba zajistit vhodné podmínky, zejména pak jde o:

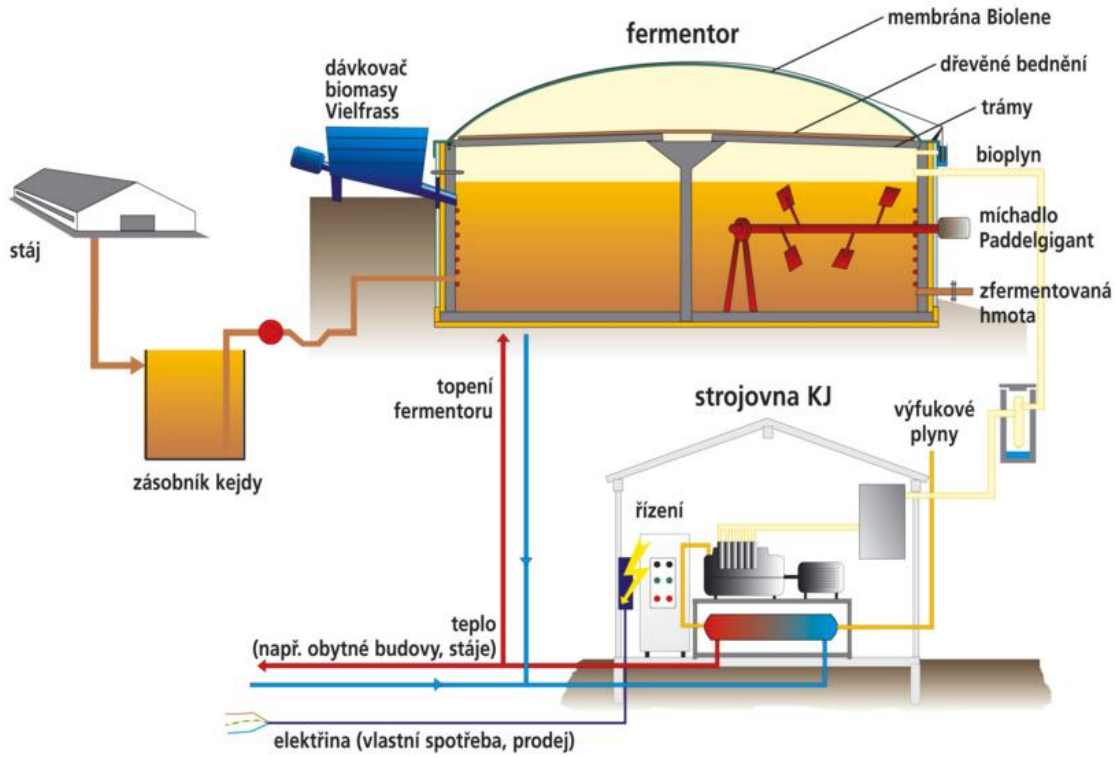
- Vlhkost materiálu – vlhkost vloženého materiálu je podmínkou k započetí první výše uvedené fáze – k hydrolýze. Vyhovující hodnota sušiny pro kejdu je 8 - 12%, pro slamnatou mrvu to je 22 - 25 %. Při vyšších hodnotách vlhkosti dochází k technologickým ztrátám tepla, při nižších pak k brždění samotného procesu.
- Teplota fermentovaného materiálu – pro udržení stabilního procesu je nezbytné zajistit správnou a konstantní teplotu, neboť zejména metanogení bakterie jsou velmi náchylné na kolísání teploty. Vhodná teplota materiálu závisí na konkrétních kmenech bakterií:
    - Bakterie psychrofilní 15-20°C
    - Bakterie mezofilní 35-40 °C
    - Bakterie termofilní 40- 60°C

Při klesnutí teploty pod 5°C ustává činnost bakterií, při teplotách vyšších než 70°C dochází rovněž ke zpomalování (až zastavení) celého procesu. Drtivá většina komerčně používaných bioreaktorů využívá mezofilních teplot, v menší míře pak termofilních, popř. kombinovaných. [4]

- Kyselost (pH) materiálu – jde o poměrně limitující faktor, neboť je požadována hodnota pH v úzkém rozsahu, navíc optimální hodnota se mění s jednotlivými fázemi. V prvotní fázi – k rozběhu a provozu fermentoru se optimální hodnota pohybuje v rozmezí od 4,5 do 8. Ve fázi metanogenze je vyžadována hodnota v neutrální oblasti, tzn. v rozmezí 6,5 - 7,5. Hodnoty vyšší či nižší mají silně inhibiční účinky. [5]
- Poměr látek – za optimální poměr C:N se považuje 20-30:1, příliš velké zastoupení dusíků má inhibiční účinky. Správný poměr je rovněž nutný mezi dusíkem a fosforem k organickým látkám, za vhodný poměr se udává CHSK: N: P 300: 6,7: 1 (500: 6,7: 1). Při zpracovávání kejdy či jiných živočišných produktů často vzniká přebytek amoniaku, který může mít rovněž inhibiční až toxické účinky.
- Zamezení přítomnosti inhibujících a toxických látek – látky, které nepříznivě ovlivňují proces fermentace. Patří zde např. kyslík, baktericidní léčiva, nebo již výše uvedený amoniak, či vysoký obsah dusíkatých látek
- Zajištění správných technologických faktorů – je důležité zajistit správnou dobu zdržení a míchání substrátu, neboť je nutné zajistit co nejefektivnější provoz, tj. co nejrychlejší a nejdokonalejší kontakt mikroorganismů s daným vstupním materiálem.

Tabulka 2 - Produkce bioplynu z vybraných substrátů [2]

Substrát	Sušina	bioplyn
	(% objemu)	($m^3.t^{-1}$)
Hovězí kejda	7	25
Prasečí kejda	9	36
Jateční odpady	18	65
Zeleninové odpady	22	90
Slamný hnůj	22	100
Domovní bioodpad	35	100
Travní senáž	30	150
Kuchyňské odpady	33	245
Obilní odpady	55	360



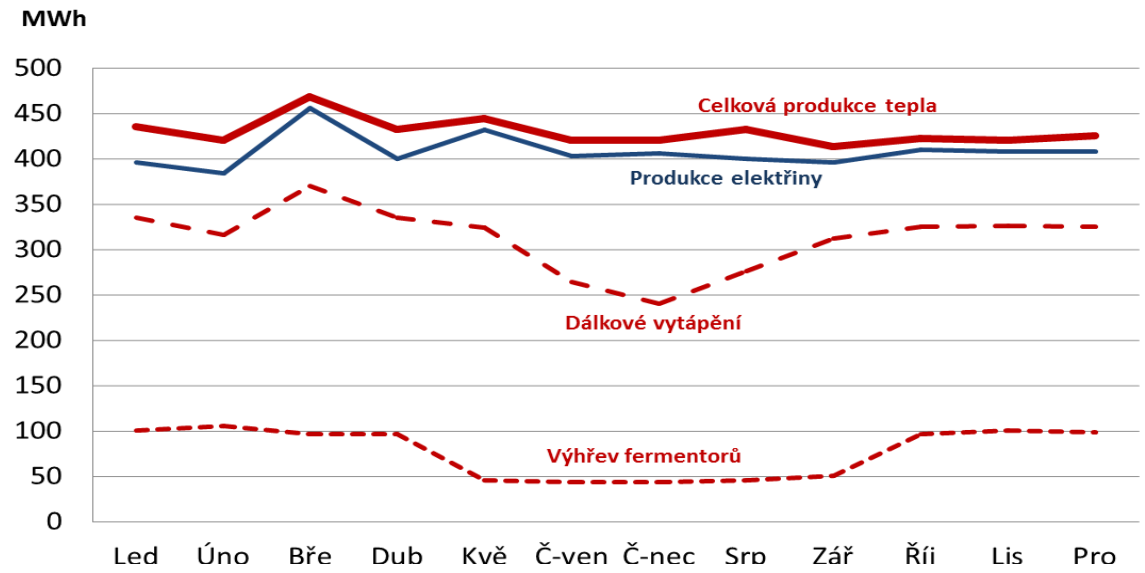
Obrázek 2-1 Schéma bioplynové stanice firmy agriKomp

Ze stáje je dopravena kejda (popř. jiné suroviny vhodné k fermentování) do zásobníku, odtud jsou tyto suroviny přemístěny do fermentoru na vhodnou dobu a zde vzniká bioplyn. Ten je následně přiváděn na kogenerační jednotku, kde vzniká elektrická a tepelná energie.

2.4 Využití tepla z bioplynových stanic

2.4.1 Možné komplikace využití tepla

S využitím tepla z bioplynových stanic je spojena řada problémů. Jedním z nich je umístění samotné BPS – většina těchto stanic je postavena dále za městy, u menších vesnic, kde nemusí být vhodné objekty k vytápění. Aby docházelo k co nejefektivnějšímu využití, je nutné již před samotnou realizací vypracovat projekt k přenosu a využití tepla. Dalším problémem může být závislost na roční době, kdy v létě dochází k přebytku, a tedy ztrátám jak z důvodu menší vlastní spotřeby (není nutno vytápět fermentoru), tak z důvodu globálního snížení spotřeby tepla. Nezanedbatelným problémem jsou také vysoké finanční náklady, např. výstavba tepelných sítí. [6] [7]



Obrázek 2-2 Graf produkce tepla v BPS [6]

2.4.2 Teplo pro potřebu samotného procesu

Dle [8] je spotřeba tepla, které je nutné při samotném procesu výroby bioplynu, závislá především na druhu teplotního procesu (mezofilní, termofilní). Dále také na tepelných ztrátách fermentoru či na roční době.

2.4.3 Vytápění

Tento způsob využití tepla je pravděpodobně nejekonomičtější z níže uvedených. Typickým příkladem je přímé vytápění zemědělských budov, které se obvykle nacházejí v blízkosti BPS, jedná se především o chlévy, stáje, popř. o skleníky (zde se rovněž nabízí možnost využití CO_2 z výfukových plynů k podpoře růstu rostlin). Nicméně ve většině případů je produkovaného teplo víc, než je spotřeba tepla na vytápění těchto budov, proto je častým případem využití tepla dálkové vytápění.[7] [6]

Před samotnou realizací, tedy ve fázi návrhu vytápěcích systémů, musí být provedeno důkladné vyhodnocení budící spotřeby tepla, jde především o:

- Celkovou spotřebu tepla
- Roční spotřebu tepla
- Spotřebu tepla ve špičce
- Sezónní rozdíly ve špičce

Při dodávce do CZT a následném vytápění obytných domů musí BPS splnit podmínky energetické zákona. V podstatě má provozovatel CZT povinnost odběru tepla z OZE pouze v případ, že:

- Jsou k tomu vhodné podmínky, čímž je myšleno např. dostatečná přenosová kapacita, vhodné přípojné místo atp.
- Již není dodáváno teplo do CZT z jiného obnovitelného zdroje
- Nedojde dodávkou tepla ke zvýšení ceny tepla

I přes veškeré použití moderních systémů při přenosu tepla dochází k tepelným ztrátám, které jsou ovlivněny především délkou potrubí a typem půdy ve kterém je vedení uloženo. Dle toho jsou pak navrhovaný správné izolace potrubí, hloubka uložení, průtok vody potrubím a počtu zařazených výměníku. [7]

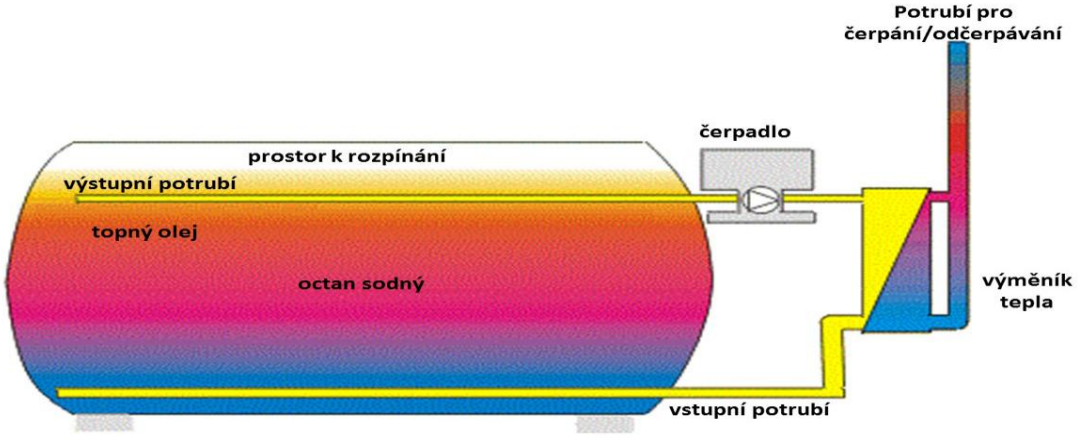
2.4.3.1 Přenos tepla v kontejnerech

V případě, že není možné vybudování potrubí k přenosu tepla či nejsou poblíž BPS vhodné objekty k vytápění, je možné využít ukládání tepla do kontejnerů. Dle [6]pro toto ukládání tepla existují v podstatě dvě technologie:

1. Latentní systémy pro skladování tepla
2. Termodynamické systémy pro skladování tepla

V prvním případě bývá použitými látkami octan sodný nebo hydroxid barnatý, který má však nebezpečné vlastnosti, a tak je jeho využití omezené. Využívá se jak měrné tepelné kapacity, tak změny skupenství. Při přechodu látky z pevného do kapalného stavu se látce dodává energie (nabíjení), naopak při změně látky z kapalného do pevného se uvolňuje tepelná energie. [6]

Jedním z postupů uchování tepla je smísení topného oleje, který přijme teplo, prostřednictvím výměníku, s octanem sodným, a tak dochází k uchování tepla. Obr. 2-2.



Obrázek 2-3 Schéma latentního systému pro skladování tepla [6]

Nutno dodat, že přenos tepla takovýmto způsobem je méně efektivní, tedy méně ekonomický, než výše uvedené napojení na CZT. Dochází zde ke ztrátám v samotném procesu ukládání tepla. Rovněž je nutné odvoz kontejneru. Maximální vzdálenost, při které se vyplatí tento způsob přenosu tepla, se udává 30 km.

2.4.4 Sušení

Jedná se o další způsob využití tepla. Sušeny bývají především materiály, které úzce souvisí s chodem bioplynové stanice, jsou to například:

- Digestát
- Dřevní štěpka
- Čistírenské kaly

Množství potřebného a tedy i využitého tepla pro sušení je závislé na mnoha faktorech, mezi které patří vlhkost vzduchu, rychlost větrání a typ materiálu. [9]

2.4.5 Chlazení

Teplo z BPS je možné využít také k chlazení. V současné době se používají dva druhy chladicích zařízení – kompresorové (klimatizace, ledničky) a absorpční.

Absorpční zařízení používají jako hlavní zdroj energie pro chlazení teplo. Mezi nejpodstatnější přednosti těchto zařízení patří nižší požadavky na elektrickou energii, nižší hluk a schopnost transformace tepla na chlazení. [6] [9]

Princip dálkového chlazení je v podstatě stejný jako u dálkového vytápění, s tím rozdílem, že je distribuována chladná voda. I přes stále zvyšující se počet chladících zařízení, se tento způsob transportu příliš nevyužívá.

2.4.6 Dodatečná výroba elektřiny

Výhodou elektrické energie oproti energii tepelné je, že je snáze převeditelná v jinou formu energie. Další předností je také její snazší distribuce. Vhodným zařízením k převodu tepla na elektrickou energii v bioplynové stanici je organický Rankinův cyklus.

Rozdíl mezi klasickým RC cyklem a ORC je v použitém médiu. ORC využívá místo vody organickou kapalinu, díky které je možné využívat zdroje s menší teplotou. Princip takového cyklu je však stejný jako u klasického RC, tedy kapalina je čerpána do kotle, kde dochází k vypařování, následně expanduje na turbíně a v kondenzátoru kondenzuje. [9]

3 ZÍSKÁVÁNÍ ODPADNÍHO TEPLA PŘI ZPRACOVÁNÍ BIOMASY

3.1 Čistění odpadních vod

Čištění odpadních vod je proces, který vede ke zlepšení kvality odpadních vod. Zároveň je odpadní voda zdrojem tepelné energie, která není v České republice tak využívána, jako například ve skandinávských zemích či Německu, Rakousku a Švýcarsku. Podle [16] má odpadní voda tepelnou a kinetickou energii, která je až 9x vyšší než je potřeba na její vyčištění.

Jedním z typických příkladů, kde probíhá čištění vody a zároveň se tak stává zdrojem tepelné energie, je čistírna odpadních vod. Mezi další takové zdroje můžeme považovat hotely, školy, administrativní budovy atp., kde vzniká velké množství teplé odpadní vody, které je možné pomocí výměníku využít.

Čistička odpadních vod

Získávání tepelné energie z vyčištěné vody je energeticky výhodné, protože tepelný potenciál je vyšší než u vody nevyčištěné. Po vyčištění je možné snížit teplotu vody až o 8°, což je žádoucí i z hlediska tepelného znečištění. Problém využití takového tepla je stejný jako u BPS, a to je vzdálenost ČOV od měst a s tím spojený problém transportu tepla. Jednou z možností tak je využití tepla přímo v ČOV. Nicméně tato možnost není příliš perspektivní, protože ČOV jsou již energeticky soběstačné, díky bioplynu, který vzniká při zpracování kalu.

Kanalizace jako zdroj tepla

Výhoda odpadní vody v kanalizaci je její relativně stálá teplota 10 °C – 20°C, a tak je možné ji využít v zimě jako zdroj tepla, naopak v létě jako chlazení. Jedním z omezení využití takového tepla je, že jímání takového tepla neovlivní činnost ČOV (přílišné ochlazení odpadní vody), do které kanalizace přitéká. Důležité také je, aby vytápěný objekt nebyl daleko od takového systému a nedocházelo tak k velkým ztrátám.

Systém na získání tepla z odpadních vod může být řešen přímým vložením tepelného výměníku do průtoku, který následně odevzdá tepelnou energii tepelnému čerpadlu. Takové zařízení je však vystaveno nepříznivým podmínkám, především to jsou hrubé nečistoty plující na hladině.

Další možný způsob je kanalizace s přímo zabudovanými tepelnými výměníky. Nevýhoda takového systému je nutnost vybudovat novou kanalizaci, nebo alespoň vyměnit části již postavené kanalizace. Nicméně výhodou takového způsobu je menší náročnost na údržbu než při použití vloženého výměníku uvnitř stoky. [16]

3.2 Kompostování

Kompostování lze definovat jako řízenou biologickou výrobu humusu. Jde tedy o aerobní proces, při kterém dochází k biodegradaci organických látek z odpadních materiálů, jehož výsledným produktem je kompost.

V průběhu kompostování dochází k různým chemickým reakcím, jednou z nich je hydrolýza bílkovin, cukrů a tuků. Jedná se o exotermní chemickou reakci, z čehož vyplývá, že při této reakci vzniká teplo, které je určující pro celý průběh kompostování. Celý proces má tři fáze, jsou to:

- Rozkladná fáze – v této fázi dosahuje kompostovaná hmota (zde ještě nemůžeme použít označení kompost) 50 - 60 °C (v některých případech až 70 °C), na biodegradačním procesu se tedy podílejí termofilní bakterie
- Přeměnná fáze – zde se na rozkladu podílejí především mezofilní bakterie, teplota kompostu se tak pohybuje kolem 40 °C. Již se jedná o kompost, produkt tak lze použít jako hnojivo.
- Fáze dozrávání – kompost má teplotu blízkou teplotě okolí

Jestliže chceme využívat teplo, které vzniká při biodegradaci, je nejprve nutné mít dobře zvládnutý proces samotného kompostování, abychom předcházeli předčasným ukončením procesu. Celý tento proces biodegradace, jeho úspěšnost, či neúspěšnost, závisí na několika níže jmenovaných faktorech.

Teplota

Jde o velmi důležitý faktor, avšak nelze určit její přesnou optimální hodnotu. Ta závisí především na druhu kompostovaného materiálu. Pro většinu materiálu se optimální teplota v rozkladné fázi pohybuje v rozmezí 50 – 60 °C. Je však důležité aby teplota nepřekročila horní mez, kdy by došlo k zastavení procesu (prudce by klesalo množství mikroorganismů), na druhé straně klesnout na teplotu okolní (rovněž dochází k zastavení procesu). [10] [11]

Vlhkost

Optimální hodnota je 50 – 60 %, nicméně opět závisí na druhu kompostovaného materiálu (především na jeho pórovitosti). Vlhkost, stejně jako teplota, má svou horní a dolní mez, které nesmí být v průběhu biodegradace překročeny. Pod hodnotu 40 % ustává činnost většiny mikroorganismů, nad 60 % dochází k vytváření anaerobního prostředí (ucpání pórů). [10] [11]

Poměr uhlíku: dusíku

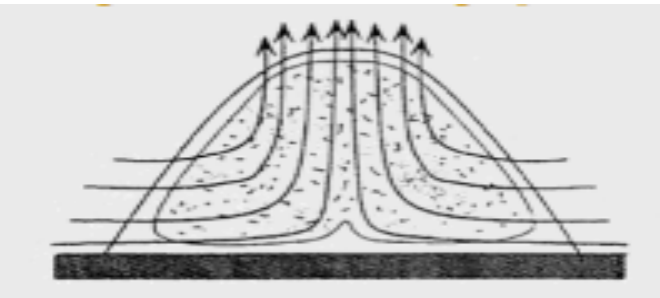
Optimální poměr C:N je nezbytný, jak pro kvalitní hnojivo, tak především pro správné prostředí pro mikroorganismy. Uhlík slouží jako zdroj energie pro mikroorganismy, dusík pak produkuje protein a podílí se na stavbě buněk – ovlivňuje tak kvalitu výsledného kompostu. Ideální poměr C:N je 30:1. Při vyšším množství dusíku dochází k rychlejšímu rozkladu, naopak při vyšším podílu uhlíku (cca 50:1) dochází ke zpomalení procesu. [11]

Před samotnou realizací jímání tepla z kompostu je nutné zvolit vhodný typ založení kompostu. Z hlediska získávání tepla se jako vhodné technologie ke kompostování ukazují:

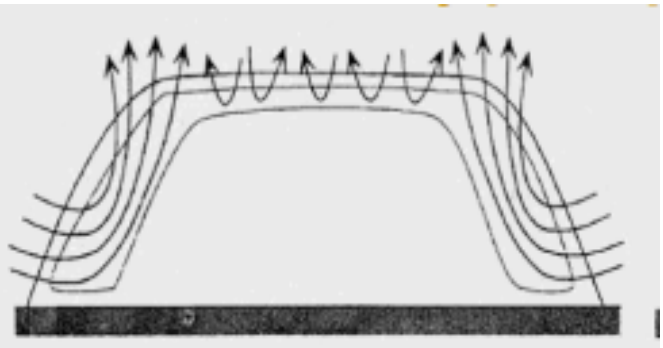
- Kompostování v pásových základkách
- Kompostování v bioreaktorech
- Kompostování v kompostovacích boxech

3.2.1.1 Kompostování v pásových základkách

Při použití této technologie se kompostovaný materiál naváží do pásových hromad buďto trojúhelníkového průřezu anebo lichoběžníkového. Při použití prvně zmiňovaného, tedy trojúhelníkového, dochází k dobrému uplatnění tzv. komínového efektu, což má za následek dobrý odvod tepla z kompostu. Naopak při použití lichoběžníkového profilu nedochází k takovému provětrávání profilu (nutnost překopávat), dochází ale k lepší akumulaci tepla uvnitř kompostu. [12]



Obrázek 3-1 Odvod tepla z trojúhelníkového profilu [12]



Obrázek 3-2 Odvod tepla z lichoběžníkového profilu [12]

3.2.1.2 Kompostování v bioreaktorech

Jedná se o intenzivní kompostovací technologii, při níž se dosahuje vyšších teplot vlivem provzdušňování zakládky. Vlivem toho však dochází ke zkrácení celé fáze kompostování.

Bioreaktory jsou izolované, uzavřené kontejnery ve tvaru boxu či válce. Přívod kyslíku je zajištěn ze spodu. Typy bioreaktoru:

- Věžové bioreaktory
- Tunelové bioreaktory
- Uzavřené kompostovací boxy
- Rotační biostabilizátory

Věžové bioreaktory

Válcové nádoby, které se plní se shora, ze spodu se pak provádí vyprazdňování. Na dně válce je rovněž mechanismus, který slouží k správnému provzdušňování. [10]

Tunelové bioreaktory

Ve spodní části tohoto bioreaktoru jsou umístěny kanály pro rozvod vzduchu. Tento bioreaktor pracuje v kontinuálním režimu, posun kompostovaného materiálu pak probíhá pomocí pohyblivého dna nebo čelního pohyblivého štítu. [10] [12]

Uzavřené kompostovací boxy

Jde o tzv. vsádkový bioreaktor, jenž má tvaru kovového (plastového) kontejneru. Uvnitř bioreaktoru však nedochází k žádnému pohybu materiálu a přiváděný vzduch si může vytvořit kanálky, kterými uniká. [12]

Rotační biostabilizátory

Kompost je uložen v uzavřeném prostoru. Provzdušňování je zajištěno pomalým otáčením bubnu, do kterého je přiváděn vzduch. Kompost je v bubnovém biostabilizátoru jen několik dnů k dosažní stabilizace. [12]

3.2.1.3 Kompostování v kompostovacích boxech

Jedná se o polouzavřené boxy, které jsou umístěny pod střechou. Při tomto způsobu musí být zajištěn přístup vzduchu, což je zaručeno ventilátory, které zespodu vhání vzduch. Dále jsou zde umístěna zavlažovací zařízení pro zajištění optimální vlhkosti. Bývá zde též instalován mechanismus na překopávání materiálu. [12]

3.2.2 Výzkumy a metody získání a přenosu tepla při biodegradaci

Nejznámějším průkopníkem využívání tepla, které vzniká při kompostování, je francouzský agronom Jean Pain, kterému se podařilo zrealizovat systém pro jímání tepla a metanu z kompostu. Dle jeho metody byl minimální objem kompostovací haldy asi 4 m^3 a předpoklad k uspěnému procesu bylo správné vyvážení surovin v kompostu. Podle jeho výzkumu bylo možné z 50 tunového kompostovacího materiálu získat 60 °C vodu, která teče rychlostí 4 litry za minutu, po dobu až 6 měsíců.

Moravská Třebová

V České republice ve městě Moravská Třebová využívají Technické služby teplo, vznikající při biodegradaci materiálu. K vytápění slouží kompost o velikosti cca 80m^3 , který je ze 70 % tvořen dřevní štěpkou, zbývající část je tvořena organickým odpadem. K přenosu tepla je v kompostu uložena PE hadice, kterou proudí voda. Tak pak předávala své teplo okolí, prostřednictvím radiátoru. Průměrná teplota kompostovaného materiálu za 170 dní byla 51 °C

Živočišná farma ve Vermontu

Na této farmě využívají teplo z kompostu k vytápění podlahy hospodářských budov a ohřívání mléka pro telata. Jedná se tak o první komerčně využívaný systém získávání tepla vznikajícího při kompostování (viz kap. 3.2.4.1).

University of New Hampshire

Rovněž na univerzitě ve Spojených státech byl v roce 2013 uveden do provozu systém na získávání tepla při biodegradačních procesech. Tento způsob získávání tepla je podrobněji popsán v kap. 3.2.4.2

3.2.3 Transport tepla

Způsobů transportu tepla, které vzniká při výše popsaných biodegradačních procesech, je několik. Jedná se především o druh použitého média k přenosu tepla, což může být například voda nebo vzduch.

Přenos tepla vodou

Jedná se o pravděpodobně nejsnadnější způsob transportu tepla z kompostu, a proto v domácích podmínkách tento způsob převažuje. Funguje na principu tepleného výměníku, kde teplosměnnou plochou tvoří vhodně stočená hadice (v závislosti na typu kompostéru), která je umístěna uvnitř kompostu.

Teplo z kompostu je tak prostřednictvím teplosměnné plochy odevzdáno vodě, která je následně odčerpána a využita buďto přímo, zde se nabízí například využití ke sprchování či umývání nádobí, nebo dále voda ohřeje vzduch vytápěné místnosti (opět prostřednictvím tepelného výměníku), v tomto případě to jsou nejčastěji hospodářské budovy či skleníky.

Hlavním problémem tohoto vytápění je množství tepla, které můžeme odvést resp. teplo, které kompost musí mít, aby byly mikroorganismy schopny své činnosti, v případě, že teplota klesne pod určitou hodnotu, dojde k „umrtvení“ kompostu – zastavení biodegradačních procesů (viz kapitola 3.2). Jedním z problému je také ztížená manipulace s kompostem, respektive jeho průběžné překopávání vlivem natažených hadic (trubek). Průběžným překopáním kompostu se předchází zastavení procesu v důsledku špatného okysličování a nerovnoměrného rozložení tepla. Dalším problémem v domácích podmínkách může být regulovatelnost čerpadla, tedy k nastavení, při jaké teplotě kompostu má čerpadlo sepnout, popř. jakou rychlostí má voda téci.

Obrázek 3-3 Příklad umístění hadice k transportu tepla v kompostu [15]

Přenos tepla vzduchem

Tento způsob přenosu tepla je náročnější (nákladnější) na samotnou realizaci než výše popsaný přenos tepla vodou. Tato metoda vyžaduje uzavřené boxy nebo bioreaktory. Z horní části bioreaktoru bude odsáván teplý vzduch, kterým již může být objekt rovnou vytápěn – odpadá tak nutnost použití dalšího výměníku, tedy i menším ztrátám. Ze spodu bioreaktoru je pak přiveden okolní vzduch, dochází tak k nucenému provětrávání, a proto již není nutné kompostovaný materiál překopávat.

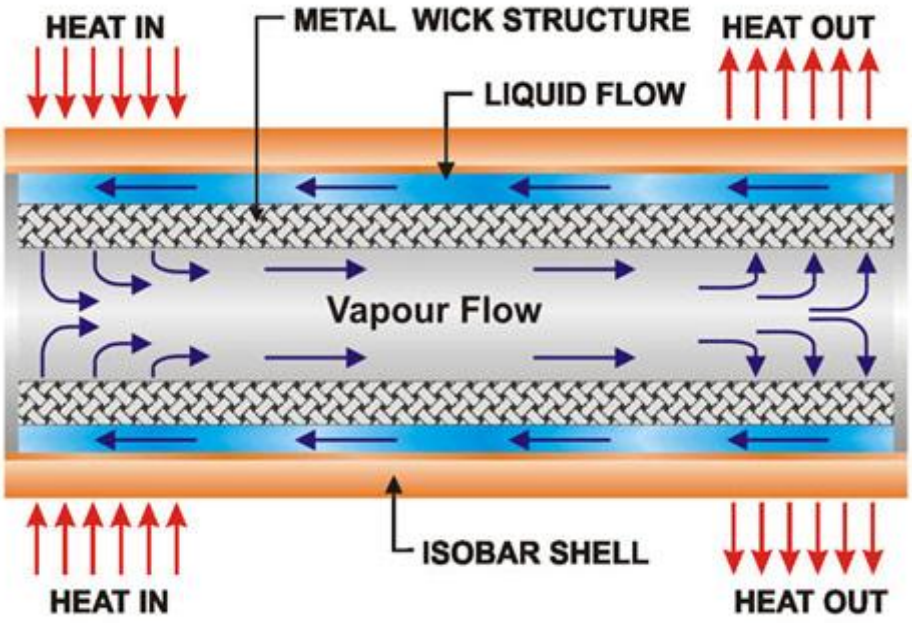
3.2.4 Komerčně využívané systémy

Přestože proces kompostování a při něm vznikajícího tepla je znám již desítky let, komerčně využívaných systémů není mnoho. Celá řada systémů k jímání a transportu tepla má především experimentální charakter, nicméně ve světě lze již nalézt systémy, které jsou plnohodnotnými zdroji tepelné energie. Jedná se především o farmy v USA, které využívají teplo např. k vytápění skleníků, chlévu či předehřívání potravy pro dobytek.

Významnou firmou, která se podílí na výstavbě a inovaci takových systémů je Agrilab Technologies, která se získávání tepla vznikajícího při kompostování věnuje od roku 2007. Ve svých systémech využívá moderních technologií i materiálů, především v oblasti potrubí a výměníků.

Acrolab's Isobar®

Jedná se o potrubí, které využívá principu samotížné cirkulace. V takovém systému je pracovní kapalina umístěna ve vakuové trubici, která se při dodání tepla přemění na páru a následně putuje do chladnější části trubice, kde dojde k odevzdání tepla, pára zkondenzuje a gravitací se vrátí zpět na začátek trubice. Použití takového systému je však omezeno, neboť potrubí musí být umístěno ve vertikální poloze. Isobar potrubí však využívá speciálního materiálu, jedná se o tzv. kovový knot, který umožňuje vrátit pracovní kapalinu také při vodorovném uložení trubice. [17]



Obrázek 3-4 Schéma trubice isobars

3.2.4.1 Kompostovací systém na farmě ve Vermontu

Tento systém využívá tepla vodní páry vznikající při biodegradačních procesech v kompostu. Tato pára dosahuje teploty od 55 °C do 65 °C a při běžném kompostování by byla odvedena do okolí. Při použití systému, který je na této farmě instalován, tak dochází pouze k využití odpadní páry a zmenšuje se tak riziko zastavení procesu samotné biodegradace vlivem ztráty potřebné teploty a vlhkosti.

Hospodářská budova určena ke kompostování je tvořena dvěma místnostmi, které jsou asi 15 m široké a 20 m dlouhé. Zároveň obě místnosti jsou ještě rozděleny na čtyři menší ohrady. Při výstavbě byl kladen důraz na izolaci, aby nedocházelo k příliš velkým ztrátám. Proto byla podlaha postavena v několika vrstvách – udusaný písek, na kterém je vrstva izolace zalitá železobetonem. Do betonu jsou udělány žlaby, v kterých jsou usazeny kolektory vodní páry. Žlaby jsou poté pokryté roštem, aby nedocházelo k poškození trubek vlivem případné manipulace s kompostem, např. navážení kompostu či jeho promíchávání.

Dále jsou v centrální chodbě uložena čtyři dmychadla, která odčerpávají vzduch z kompostovací části stodoly. Ten se průchodem zakládky ohřívá vodní párou a je dále vháněn do 16 m dlouhého potrubí, které je izolováno pomocí fólie. Toto potrubí se skládá z šesti výše popsaných nerezových Isobars trubek, prostřednictvím kterých získané teplo ohřeje vodu v nádrži. Ve špičce je systém schopen vyprodukovat 120 000 BTU[1] za hodinu, což odpovídá 126,6 MJ za hodinu.

Aby byl zajištěn rovnoměrný pohyb páry je tato pára kontrolována manometrem – při větším tlaku je odvedena do ovzduší nebo se vrací zpět do kompostu. Dále jsou zde instalována čidla, které zaznamenávají data z 35 bodů v systému – v základkách, potrubí, nádrži s vodou atp. Na základě těchto dat je pak řízeno jak samotné kompostování, tak přenos tepla. [13]

3.2.4.2 University of New Hampshire

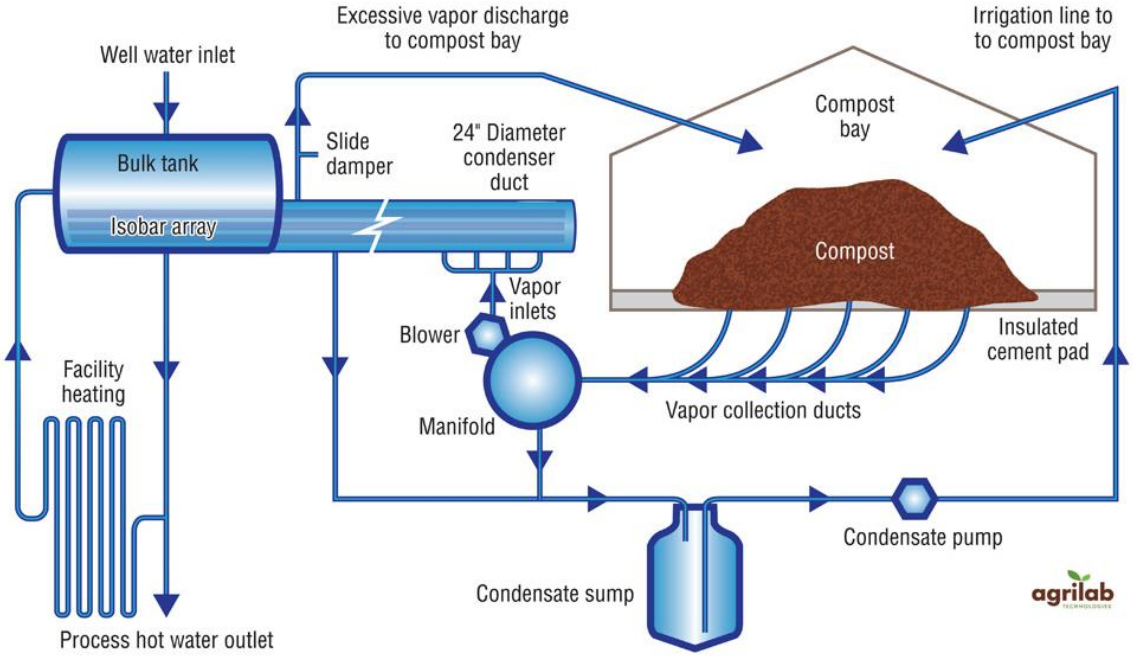
Tento rekuperační kompostovací systém se skládá z osmi hromad, které jsou provzdušňovány, jedná se o tzv. aerated static piles (ASP) systém a dohromady je schopen pojmout až 90 tun materiálu. Součástí je také technická místnost, kde je monitorován celý průběh biodegradace a zároveň proces jímání tepla. Také jsou zde mechanismy k jejich řízení, např. ventily k regulaci proudění vzduchu.

Systém instalovaný na UNH je schopen využít tepelnou energii jak z horkého vzduchu, tak při vypařování vody z biodergradovaného materiálu, což výrazně zvyšuje využití tepelného potenciálu při kompostování. Protože pouhých 13,4 % vznikajícího tepla je v podobě horkého vzduchu, zatímco 63% tohoto tepla je obsaženo v horkých výparech.

[1] BTU – British thermal unit je jednotka energie používána v angloamerické měrné soustavě. 1BTU= 1055,056 J

Agrilab systém tedy ohřívá vodu z horkého vzduchu a zároveň využívá latentního tepla, které vzniká při změně skupenství – kondenzace a vypařování, které probíhá uvnitř výměníku. Na konci toho procesu je efektivní využití tepla v podobě horké vody, která již může být použita na další ohřev.

Samotný výměník pracuje s párou, jež se pohybuje v rozmezí teplot od 43 °C do cca 75 °C. Trubky, které slouží k rozvodu tepla, umožňují tepelnou rovnoměrnost po celé délce (při zahřátí jednoho konce se energie rovnoměrně rozloží). Zachycené teplo z kompostu se prostřednictvím parního potrubí dostane do rozdělovacího potrubí, odkud je vytlačeno do isobars trubek. Odtud pára putuje do nádrže s vodou, kde ji ohřívá. Ta již, pomocí výměníku, odevzdá tepelnou energii vytápěnému objektu. Následně se, již chladná voda, vrací zpět do nádrže. [14]



Obrázek 3-5 Schéma přenosu tepla z kompostu [14]

Podle [14] byla před uvedením do provozu provedena řada testů, které především zjišťovaly kvalitu potrubí, těsnění apod. Po 6 měsících od uvedení do provozu byla průměrná teplota v nádrži 37°C. Přičemž je odčerpáváno 23 l/min teplé vody k předehřívání mléka pro telata, tato hodnota však kolísá v závislosti na denní spotřebě mléka. Uvedená data však byla shromažďována v první fázi kompostování a podle odhadů by tak měla teplota vody v nádrži stoupnout na cca 50°C. Pro porovnání teplota vody v nádrži, která je instalovaná na farmě ve Vermontu má teplotu cca od 35 °C- 60 °C, avšak při 3x větším obejmu kompostu. [14]

4 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části bakalářské práce jsem se věnoval návrhu bioreaktoru, jeho sestrojení a následnému měření. Přípravy a následně stavba bioreaktoru probíhala na zahradě doc. Baxanta v Brně – Medlánkách.

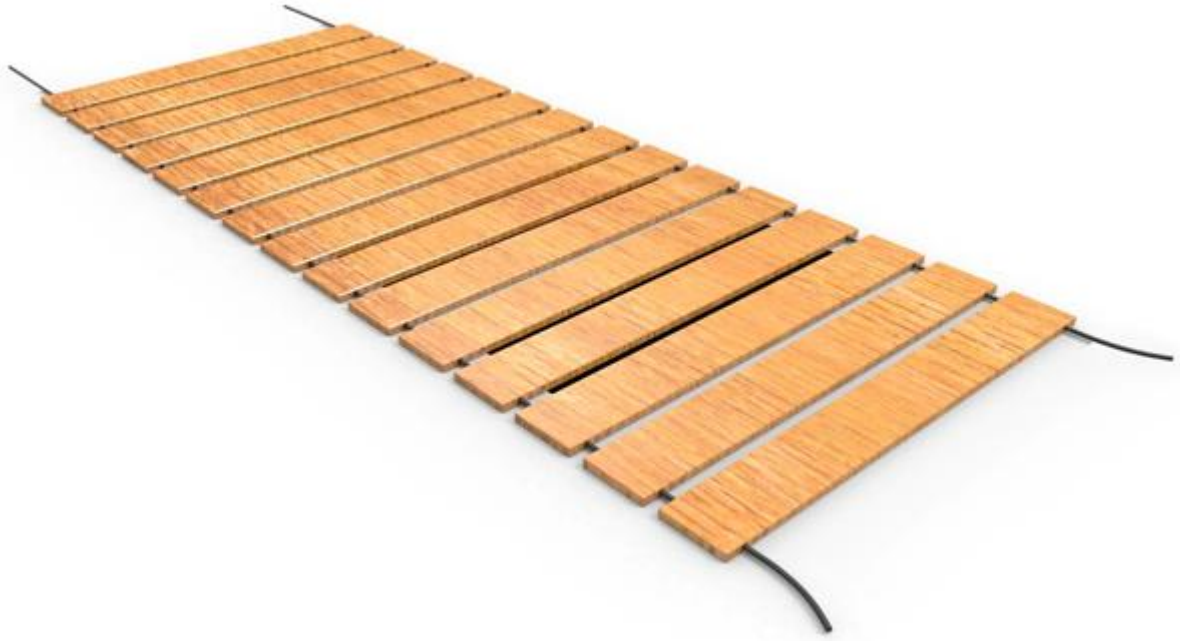
4.1 Návrh bioreaktoru

Jak jsem již uvedl v teoretické části, je několik způsobů kompostování. Z finančního hlediska jsem se však rozhodoval mezi kompostováním v pásových základkách – tedy kompostovací hromadou, která by ale nebyla nikterak izolována, nebo zjednodušeným modelem kompostovacího boxu. Nakonec byla vybrána druhá varianta, a to právě z důvodu částečné izolace, která alespoň zčásti zabrání unikání tepla do okolí. Zároveň však bylo důležité, aby byl zajištěn přístup vzduchu a nedošlo tak k anaerobnímu prostředí. Důraz byl též kladen na co největší ekologičnost celého projektu, proto byly zavrhnuty běžně dostupné plastové kompostéry.

Původní návrh bioreaktoru byl sestaven z metrových desek, uspořádaných do šestiúhelníku, mezi jednotlivými deskami měly pak být 2-3 cm mezery, jež měly zajistit dobré provzdušnění (viz obr. č. 4-1). Od tohoto modelu bylo nakonec opuštěno, a to především z důvodu finanční nákladnosti – na předpokládanou velikost by bylo třeba přibližně 72 metrových desek. Druhým důležitým důvodem byl fakt, že takto sestrojený kompostér by nebyl snadno rozebíratelný, což by přineslo obtíže při jeho naplňování a především při vyprazdňování.

Obrázek 4-1 Původní návrh bioreaktoru

Při druhém návrhu byl kladen důraz na odstranění nedostatků předchozího modelu. V tomto modelu kostru tvoří 50 cm dlouhé latě, které jsou 5 cm od každého okraje provrtány na šířku a poté navleknuty na drát – (viz obr. č 4-2). Takto navléknuté latě utvoří jeden segment. Z několika takových částí lze snadno sestavit libovolný tvar, který je možno následně zvětšovat do výšky. Výhoda takového bioreaktoru je ve snadné manipulaci, kde je možně jakkoliv zvětšovat či zmenšovat objem, což zároveň zaručuje snadnou manipulaci s kompostovacím materiálem.



Obrázek 4-2 Návrh jednoho segmentu bioreaktoru

4.2 Realizace bioreaktoru

Na začátku realizace byl důležitý výběr vhodného místa, kde bude bioreaktor umístěn. Hlavní požadavek bylo umístění v blízkosti vytápěného objektu, aby tak docházelo k minimálním ztrátám při přenosu tepla. Nakonec bylo vybráno místo v těsné blízkosti daného objektu, nicméně zde bylo omezení existující plochou, z tohoto důvodu byl vybrán válcový tvar, jehož další výhodou je absence ostrých či pravých úhlů, kde by mohlo docházet ke zpomalování biodegradačních procesů. Určené místo bylo dále upraveno – terén musel mít mírný spád, aby přebytečná voda mohla odtéct a nezpůsobovala tak vysokou vlhkost v kompostéru.

Při stavbě bioreaktoru se tedy postupovalo výše uvedeným způsobem. Použité latě byly v podstatě již odpadním materiálem z jiné stavby, tudíž šlo o velice levnou variantu. To se však ukázalo jako drobná nevýhoda, neboť latě měly různou šířku a často nepravidelný tvar, což způsobovalo problémy při vrtání. Následně byly tyto latě navléknuty na klasický napínací drát od pletiva, čímž byla vytvořena dílčí část. Takový to segment byl 2,15 metru dlouhý a 0,5 m vysoký (Obr. 4-3).

Obrázek 4-3 Dílčí část bioreaktoru

Poté byly tyto tři segmenty spojeny do jednoho válce, který tak tvořil jedno patro (obr. 4-4)., Ten měl obvod 6,45 m a výšku 0,5 m. Celkem pak byly vyrobeny tři patra, na výšku tedy bioreaktor měřil 1,5 m. Objem takového bioreaktoru je pak 3,3 m^3.

Obrázek 4-4 Spodní část bioreaktoru

Obrázek 4-5 Kompletní bioreaktor

4.2.1 Plnění bioreaktoru

Jak již bylo uvedeno v teoretické části, pro správný průběh biodegradace je důležitý optimální poměr uhlíku k dusíku (30:1). Uhlíkatá část byla v tomto případě reprezentována dřevní štěpkou, které tak bylo třeba vyrobit dostatečné množství. Dusíkatá část byla naopak tvořena zeleninovým odpadem z jídelního závodu a ovocným či zeleninovým odpadem z vlastní spotřeby. Do bioreaktoru byla také přidána koňská mrva, což je směs jak uhlíku, tak dusíku.

Při plnění bioreaktoru se postupovalo následovně. Nejprve se naspod umístily různé větve malého průřezu, které tak plnily funkci roštu, přebytečná voda tedy mohla odtéct, avšak kompostovaný materiál se nedostal ke kontaktu s plachtou, která by mohla procesy biodegradace zpomalovat. Poté byla naplněna půlka prvního patra, kde byl umístěn tepelný výměník. Ten představovaly hadice, jež původně sloužily k solárnímu ohřevu (obr 4-6). Na výšku měl tento výměník 1 m, byl tak umístěn přes všechny patra. Po umístění výměníku byly přidány další dvě patra a doplněn kompostovací materiál.

Obrázek 4-6 Umístěni výměníku do bioreaktoru

Doprostřed výměníku byla umístěna konstrukce (obr. 4-7), která byla tvořena z pletiva, stočeného do válce. Ten byl ještě vyztužen dřevní části, aby nedocházelo k deformaci tlakem. Tato konstrukce měla za cíl doprostřed vpouštět vzduch a popř. bioplyn, který měl být odváděn komínovým efektem drenážní trubkou, umístěnou uprostřed této konstrukce.

Obrázek 4-7 Konstrukce k jímání bioplynu

4.2.2 Způsob jímání tepla

Pro maximální využití tepla bylo důležité zajistit efektivní přestup tepla do vytápěného objektu, kde byl umístěn kalorifer, což je výměník tepla voda-vzduch. Zde se také nabízí varianta využít teplo pro ohřev vody, což by znamenalo zapojení bojleru do topného okruhu. Pravděpodobně by se jednalo o lepší využití, neboť na ohřev vody by postačilo méně tepla, než je potřeba na vytopení místnosti.

Problému při zapojení topného okruhu bylo několik. Jedním z nich byly rozdílné průřezy hadic v bioreaktoru, kalorfieru a čerpadla. V prvotním řešení byly použity novodurové spojky, konkrétně o T-kus, do kterých byly našroubovány hadice z bioreaktoru (jednalo o stejný průřez). Na druhé straně této spojky bylo víčko, do kterého byl vyvrtán otvor, do něhož byl našroubován hadičník[2]. Zde byla napojena PVC hadice, která vedla do kalorfieru, z něho pak vedla PVC hadice k čerpadlu a za čerpadlem byl opět umístěn novodurový T-kus, které byl řešený stejně jako v prvním případě.

Zároveň do těchto T-kusů byla třetím otvorem vpravena teplotní čidla a to tak, že do víčka byl vyvrtán otvor a pak se běžnou průchodkou protáhly čidla dovnitř. Nicméně, jak se později ukázalo, toto řešení nebylo správné.

[2] Součástka, která má na jedné straně závit, na druhou stranu je pak možno připojit klasickou PVC hadici

4.3 Vytápění

Po 14 dnech od naplnění bioreaktoru, kdy teplota ve střední části dosahovala teplot až 62 °C se uskutečnil první pokus o jímání tepla. Na jedné straně tak byla z výše popsaného novodurového kusu vytažena hadice, kterou se do topného systému napouštěla voda. Nicméně, po dostatečně dlouhé době napouštění nebylo v systému potřebné množství vody. Po cca 5 minutách od ukončení napouštění začala voda vytékat ven z bioreaktoru. Z tohoto bylo zřejmé, že došlo k poškození hadic umístěných uvnitř bioreaktoru. A tak pro další pokus o vytápění bylo nutno vyměnit výměník, což znamenalo rozebrání a opětovné naplnění bioreaktoru.

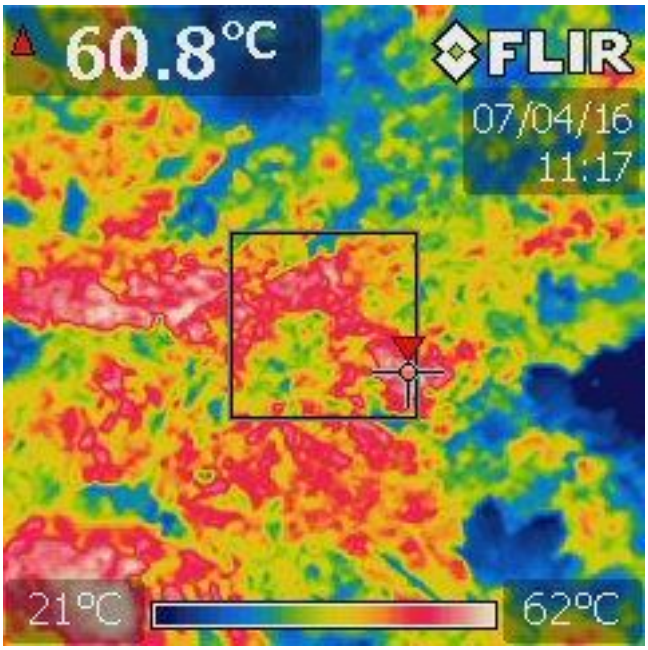
Po vyjmutí výměníku bylo na první pohled zřejmé, že materiál hadic vlivem teploty změknul a při současně působícím tlaku došlo na více místech k prasknutí.

V druhé variantě topného systému byla použita 100 m dlouhá polyethylenová hadice, jejíž výhoda oproti hadicím ze solárního systému je mechanická pevnost. Nemělo tak dojít k deformaci tlakem. Tato polyetylenová trubice byla umístěna do bioreaktoru v kruzích o průměru přibližně 1,2 m. Přičemž byla rovnoměrně rozvrstvena od výšky 0,25 m po vrchní okraj.

Obrázek 4-8 Umístění polyetylenové hadice do bioreaktoru

Při vyjmutí materiálu z celého kompostu byl pořízen záznam tohoto materiálu termokamerou. Jak lze vidět na obr. 4-9 teplota dosahovala hodnoty až 60,8 °C.

Po tomto procesu vyprázdnění a opětovnému naplnění bioreaktoru, došlo k velkému poklesu teplot, nicméně poté teplota rostla poměrně rychle, což bylo patrně způsobeno okysličením, ke kterému došlo při vyjmutí kompostovaného materiálu z bioreaktoru.

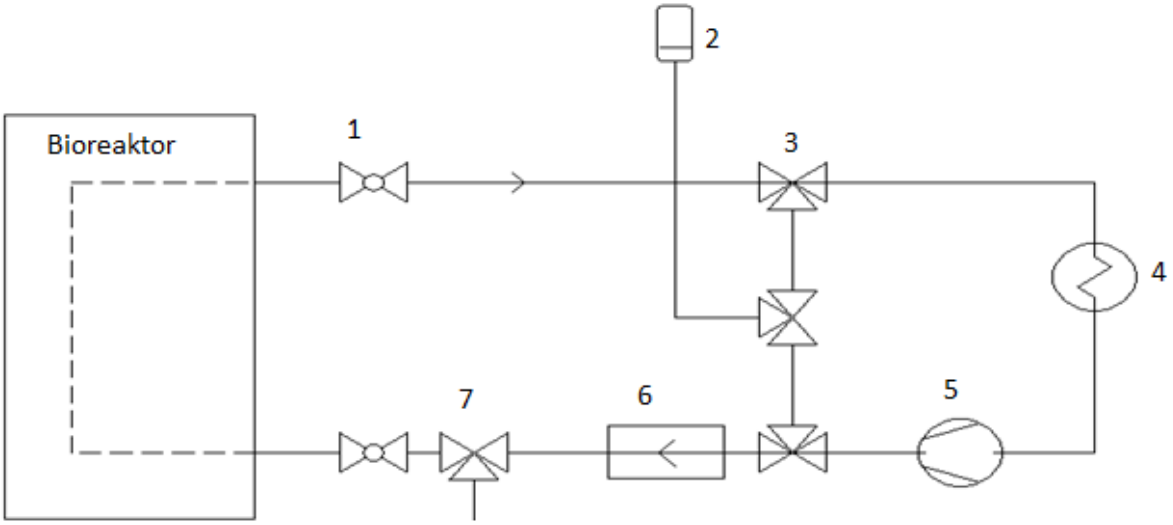


Obrázek 4-9 Teplota kompostovaného materiálu po vyjmutí z bioreaktoru

Druhý pokus se uskutečnil hned den po opětovném naplnění bioreaktoru. Teploty sice ještě nedosahovaly optimálních teplot, v plánu tak bylo pouhé napuštění systému vodou – bez trvalého zapnutí oběhového čerpadla. Nyní byl otopný systém řešen tak, že na obou koncích polyetylenové hadice byla našroubována redukce, tak bylo možno připojit již použité a neporušené hadice z předchozího výměníku, které byly našroubovány na oba novodurové kusy. Po napuštění velké části celého systému však došlo vlivem tlaku k rozpojení v místě novodurového kusu. Po dodatečném zalepení víček voda sice ven netekla. Avšak po zapnutí čerpadla došlo opět k vytrhnutí hadic z novodurových kusů. Po krátké úvaze bylo zřejmé, že je nutné použít jiné zapojení otopného systému.

Po předchozích zkušenostech byla snaha omezit počet redukcí, které jsou potencionálním místem poruchy. Byla tak zakoupená běžná PVC hadice, která měla stejný průměr jako PE hadice vystupující z bioreaktoru. Tato hadice tak byla nasazena na PE hadici a stažena svorkou. V nejvyšším místě (hadice jsou vedeny z bioreaktoru nahoru přes okno a poté dolu do kalorfieru) byl namontován mosazný T-kus, z kterého vedla hadice do expanzní nádoby. Tato nádoba slouží k vyrovnání změn objemu vody, která je způsobena měnící se teplotou vody. Zároveň tato nádoba sloužila k odvzdušnění celého systému.

Čidla na měření teploty vody byla umístěna na vstup i výstup kaloriferu a následně byla zaizolována. Takto umístěná čidla neměřila přesnou teplotu vody, nicméně pro výpočet je rozhodující tepelný spád, nikoliv přesná hodnota.



Obrázek 4-10 Finální schéma otopného systému

1- Kulový kohout, 2- Expanzní nádoba, 3 – Trojcestná armatura (T-kus), 4-Výměník (Kalorifer), 5- oběhové čerpadlo, 6 – Průtokoměr, 7 – Napouštěcí kohout

Takto sestavený systém se již osvědčil, po napuštění systému pomocí spodního kohoutu voda nikde neunikala, a to ani po zapnutí oběhového čerpadla. Čerpadlo bylo naprogramované tak, že bylo v provozu, pokud byla teplota v bioreaktoru větší než 45 °C, v opačném případě dalo pomocné relé popud k jeho vypnutí.

Celý topný systém stál 5992Kč (viz tabulka 3), nicméně není zde započítán kalorifer, neboť byl použitý starší, již nevyužívaný.

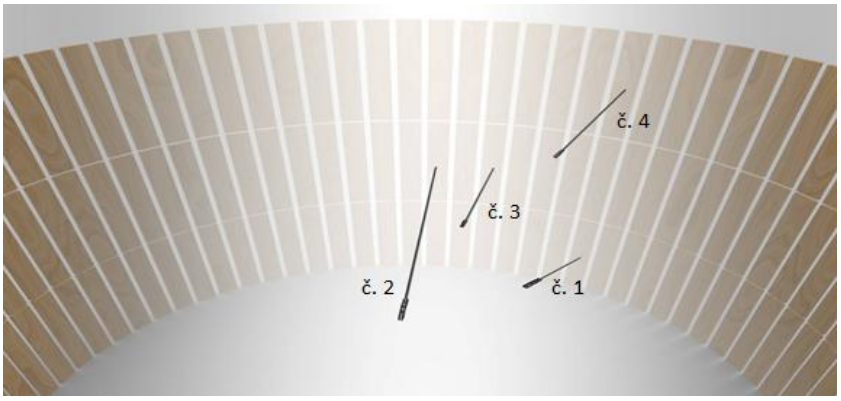
Tabulka 3 – Náklady na topný systém

čerpadlo	2 400,00 Kč
armatury	866,00 Kč
PE hadice	2 200,00 Kč
PVC hadice	254,00 Kč
Pomocné relé	272,00 Kč
Celkem	5 992,00 Kč

5 VYHODNOCENÍ

5.1 Umístění čidel

Neboť byla snaha co nejlépe zmapovat procesy biodegradace a reálné možnosti využití vznikajícího tepla, byla dovnitř bioreaktoru umístěna čtyři teplotní čidla, zakoupená od firmy Smaris. Tato čidla byla zapojena do rozvaděče, zde byl také displej, který ukazoval aktuální teplotu, do paměti se pak ukládaly hodnoty každou minutu. Tři z nich byly umístěny cca 50 cm od okraje, a to ve výšce 0,25 m (spodní okraj výměníku), 0,75 m a 1,25 m. Čtvrté čidlo bylo rovněž umístěno ve výšce 0,75 m, avšak uprostřed výměníku, tj. v jádru bioreaktoru (obr. 5-1).



Obrázek 5-1 Model rozmístění čidel v bioreaktoru

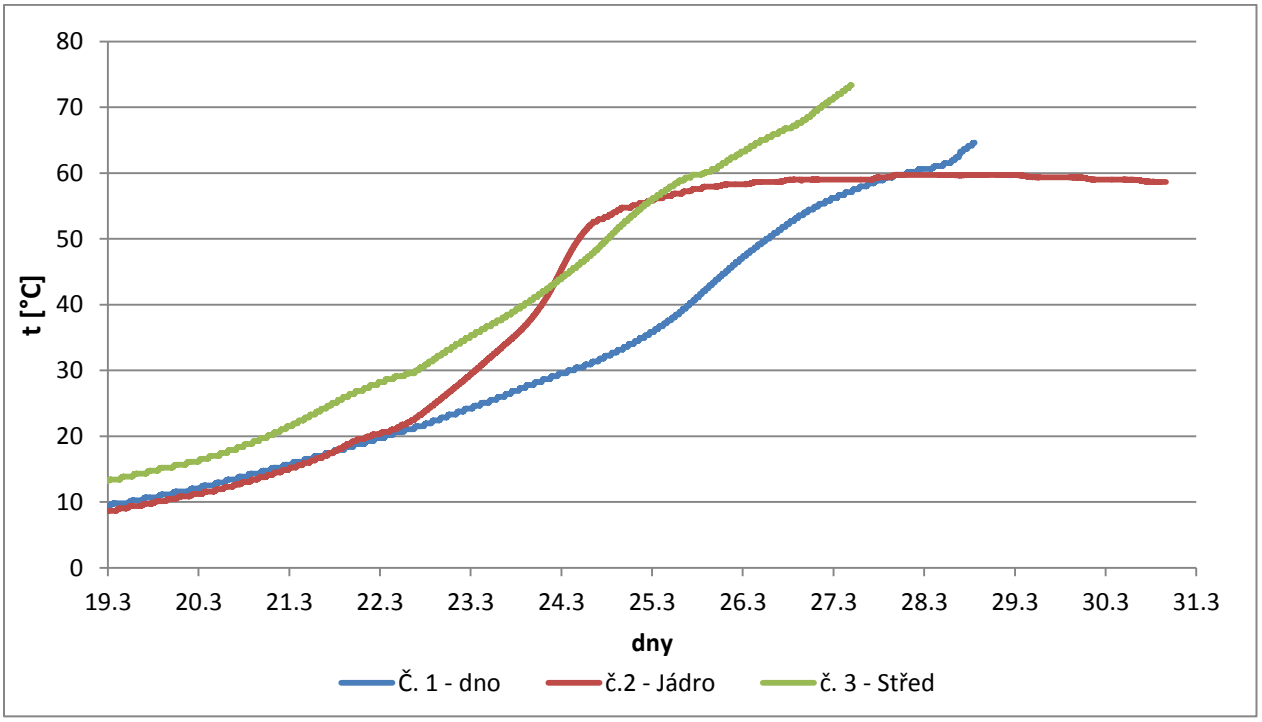
Dále byla měřena teplota venku, tedy teplota okolí jak bioreaktoru, tak vytápěného objektu. Poté byla další dvě čidla umístěna dovnitř vytápěného objektu. Poslední dvě čidla byla určena k měření teploty vody, chladné - vstupující do bioreaktoru, a teplé – vystupující z bioreaktoru.

5.2 Měření

Při samotném měření došlo bohužel k řadě problémů, které značně ovlivňují výsledky měření a jejich interpretaci. Měření začalo probíhat 19.3, avšak po osmi dnech se na displeji čidla umístěného na vrchu bioreaktoru zobrazila chybová hodnota 174,12 °C, což znamená, že čidlo přestalo měřit. Další den přestalo fungovat také druhé čidlo, kterým byla měřena teplota ve střední výšce a 0,5 m od okraje a v stejný den chybovou hodnotu zobrazilo též čidlo č. 1 umístěné na dně, resp. ve výšce 0,25 m. Z toho již bylo patrné, že nejde o náhodnou poruchu a očekávalo se tak porouchání zbývajících čidel.

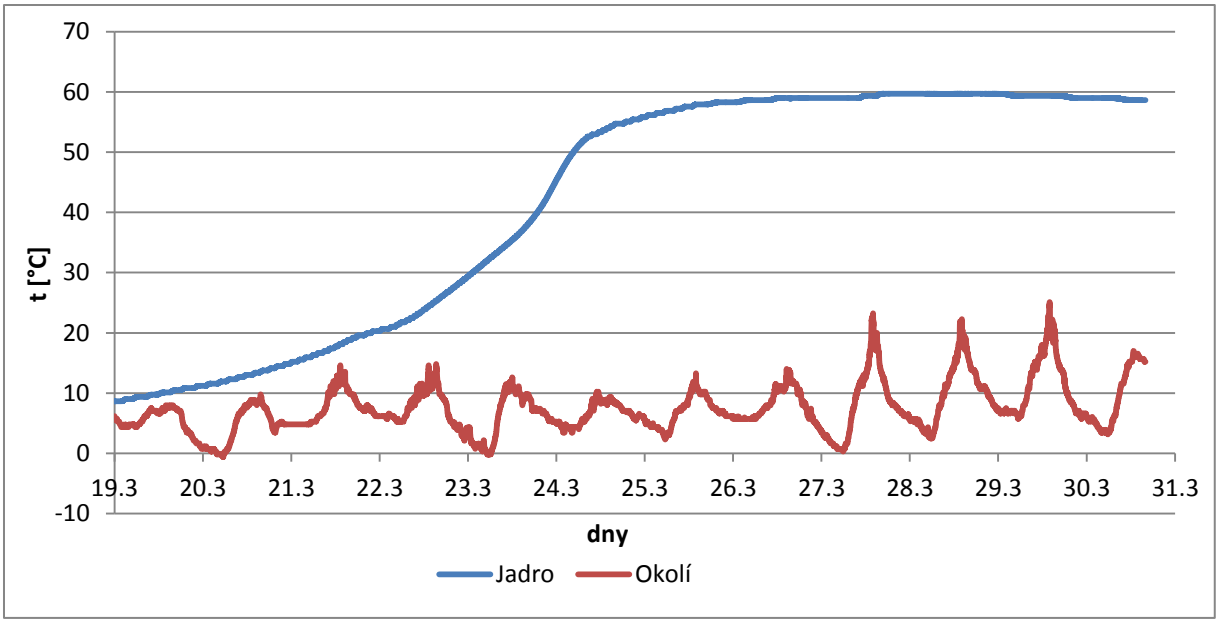
Proto dne 1. 4. byla do bioreaktoru přidána starší čidla a následně naprogramována. Zobrazované hodnoty tedy byly teploty ve střední výšce – čidlo č. 2 a také teploty čidla č. 4 – vrch bioreaktoru. Zároveň byly společnosti Smaris vráceny čidla na reklamaci.

Ze záznamu teplot (příloha A) lze sledovat vývoj teplot v bioreaktoru v prvních dvanácti dnech. Na grafu (obr. 5-2) můžeme vidět, že po 3 dnech pozvolného zvyšování teplot došlo k prudkému nárůstu a to především u čidla č. 2, tedy v jádře. Po dosažení teploty cca 60 °C (70 °C) byla teplota v jádře téměř konstantní. Podobný průběh byl očekáván i u dalších dvou čidel, bohužel v tu chvíli již čidla neměřila.



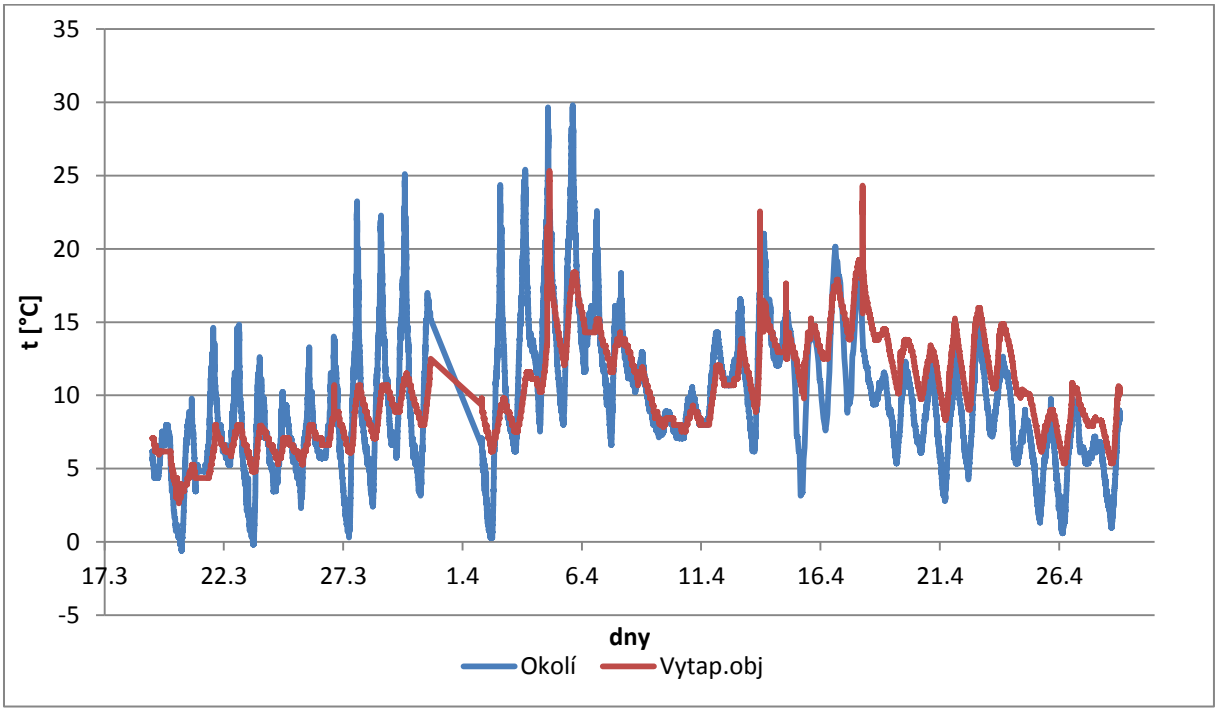
Obrázek 5-2 Zobrazení nárůstu teplot v prvních dvanácti dnech

V druhém grafu (obr. 5-3) je pro představu zobrazena teplota jádra v bioreaktoru a teplota okolí. Lze vidět, že ačkoliv teplota v okolí během dne v počáteční fázi nepřekročila 15 °C a v noci se místy dostala i lehce pod 0 °C, tak došlo k nárustu teploty uvnitř.

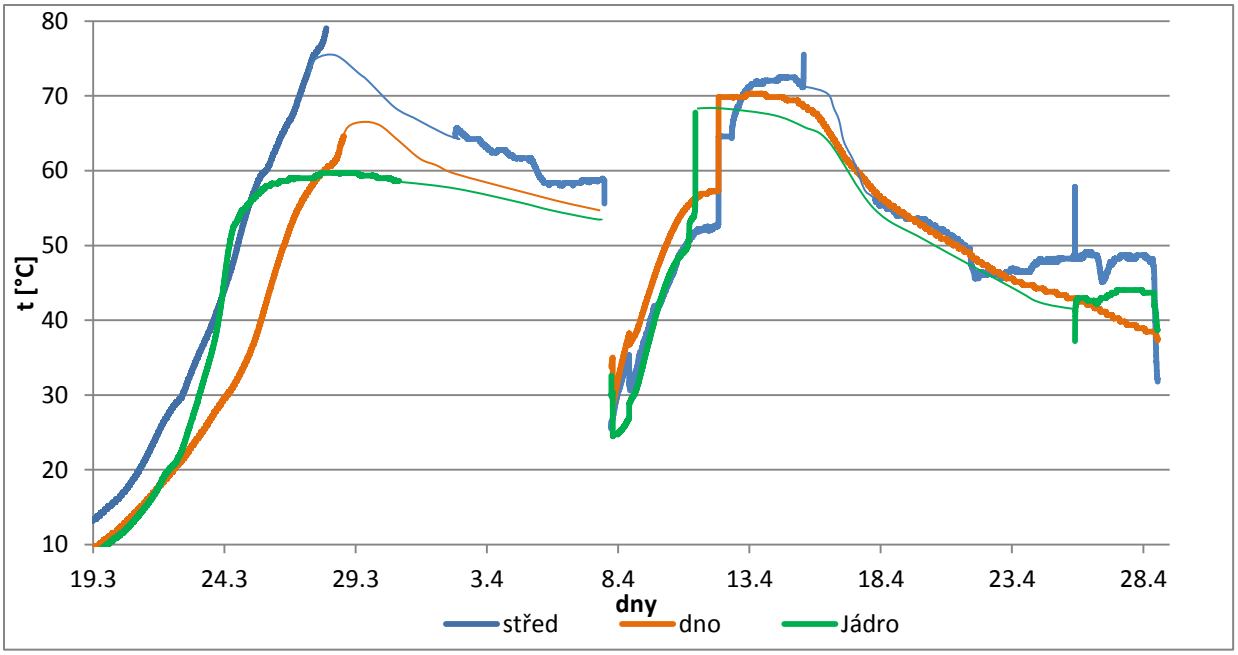


Obrázek 5-3 Průběh teploty v bioreaktoru a teploty okolí v čase

Dne 14.4 bylo zahájeno vytápění (naměřené hodnoty v příloze B). V grafu na obr. 5-4 je zobrazen průběh teplot ve vytápěném objektu a okolí po celou dobu měření, tzn. od 17.3. Na tomto grafu můžeme vidět, že teplota naměřená uvnitř, do doby než bylo spuštěno vytápění, byla většinou nižší (pokud teplota okolí neklesla pod 5°C). Oproti tomu, po zahájení vytápění, teplota uvnitř byla již vždy vyšší než teplota v okolí.



Obrázek 5-4 Průběh teploty okolí a vytápěného objektu v čase

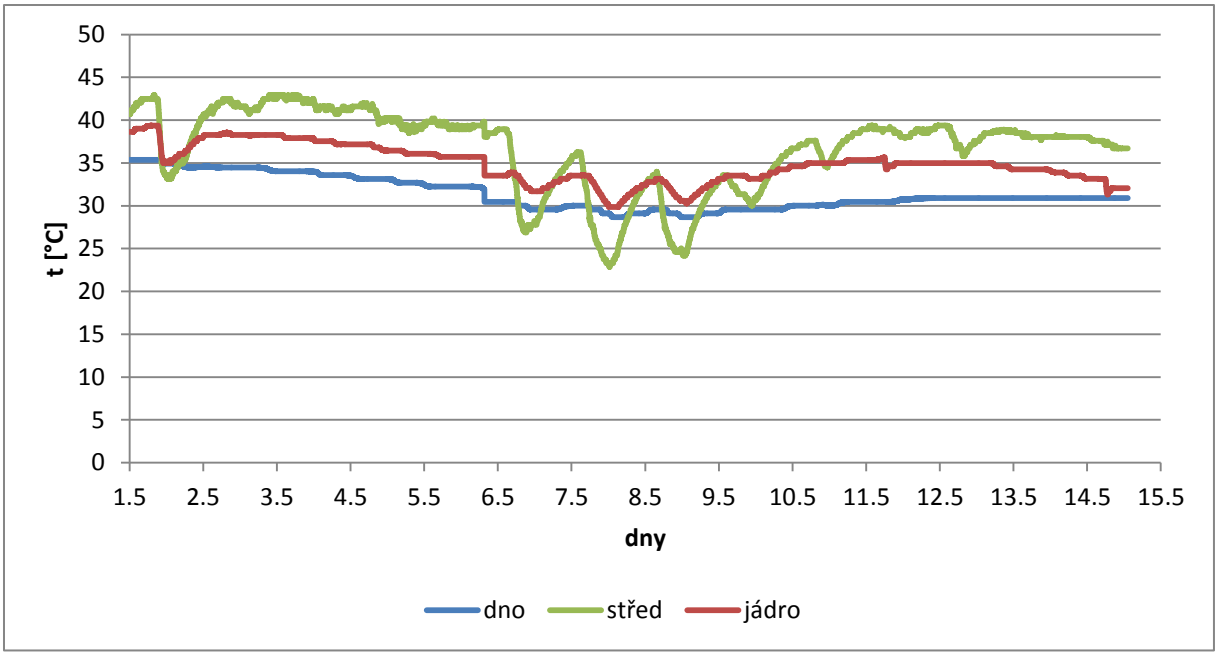


Obrázek 5-5 Průběh teplot v bioreaktoru v čase

V grafu zobrazeného na obr. 5-5 jsou vyneseny průběhy teplot ze všech měřených míst v bioreaktoru. Ve dnech, kdy čidla nefungovala (firma Smaris dodala nová čidla, avšak dvě z nich opět přestala po čase fungovat), je vynesen tenkou čárou předpokládaný průběh dané teploty. Dne 7.4 byl bioreaktor rozebrán a čidla vytažena, tudíž je zde zaznamenána skoková změna teploty. Následně můžeme pozorovat prudký nárůst všech měřených teplot uvnitř bioreaktoru. Poté, co bylo dne 14.4 spuštěno vytápění, nastalo po 3 dnech výrazné ochlazení. Avšak na základě již dříve naměřených teplot (v jiném bioreaktoru) byl mírný pokles teplot předpokládán i v případě, že by nebylo zahájeno vytápění. Neboť v typickém průběhu teploty můžeme sledovat prudký nárůst teploty (až na hodnotu kolem 70 °C), po několika dnech však následuje ochlazení na teplotu okolo 50-55 °C.

Zde se však bioreaktor dostal do své kritické fáze, protože teplota klesla pod 40 °C. Což již není teplota vhodná k vytápění, a to z důvodu úplného vychladnutí materiálu uvnitř. V této fázi experimentu tak byla přidána voda, nicméně materiál se zdál být dost vlhký a k výraznějšímu vzestupu teplot to nevedlo.

V grafu na obrázku 5-6 je zobrazen průběh teplot v bioreaktoru v posledních dnech měření, tedy v době, kdy už bylo vytápění zastaveno. V grafu lze vidět, že teplota již nepřesáhla 45 °C, teplota v jádře a na dně pak klesla pod 35 °C.



Obrázek 5-6 Průběh teploty v bioreaktoru po vytápění

Další možností k zvýšení teploty by bylo promíchání, popř. přidání dusíkatého materiálu (zelenina, tráva atp.) a také provzdušnění. Avšak takovými možnostmi tento bioreaktor nedisponoval.

5.3 Výpočty

5.3.1 Výpočet výkonu

V této části práce je proveden výpočet výkonu bioreaktoru v průběhu vytápění. Pro výpočet bylo nutné znát průtok vody. Bohužel však impulsní průtokoměr zapojený v tepelném oběhu nefungoval – na displeji se zobrazovala nulová hodnota. Bylo tak nutné určit průtok jiným způsobem. Proto byl z manuálu dodanému k čerpadlu, v kterém byl zobrazen graf závislosti průtoku na výšce, odečten průtok q =0,7 $m^3 \cdot h^{-1}$.

Ve výpočtu vyjdeme z kalorimetrické rovnice pro teplo

$$Q = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \text{ (J; kg, J·K}^{-1}\text{·kg}^{-1}\text{, K)}, \tag{5.1}$$

kde m je hmotnost,
c měrná tepelná kapacita a
T_1, T_2 je teplota vody vstupující, resp. vystupující z bioreaktoru.

Rovnice pro výkon bioreaktoru pak popise vztah:

$$P = \frac{Q}{t}\,(\mathrm{W;\ J,\ s}), \tag{5.2}$$

Dosazením tepla Q do rovnice 5.2 dostaneme:

$$P = \frac{m \cdot c \cdot (T_2 - T_1)}{t}, \tag{5.3}$$

přičemž neznáme hmotnost vody, proto musíme vztah upravit $m = V\rho$. Neznáme však ani objem, nicméně můžeme psát, že průtok je objem za čas a tak $Q = \frac{V}{t}$. Po dosazení do rovnice 5.2 dostaneme výsledný vztah pro výkon bioreaktoru

$$P = q \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1). \tag{5.4}$$

Pro první minutu, kdy bylo spuštěno vytápění po dosazení do předchozí rovnice tak platí:

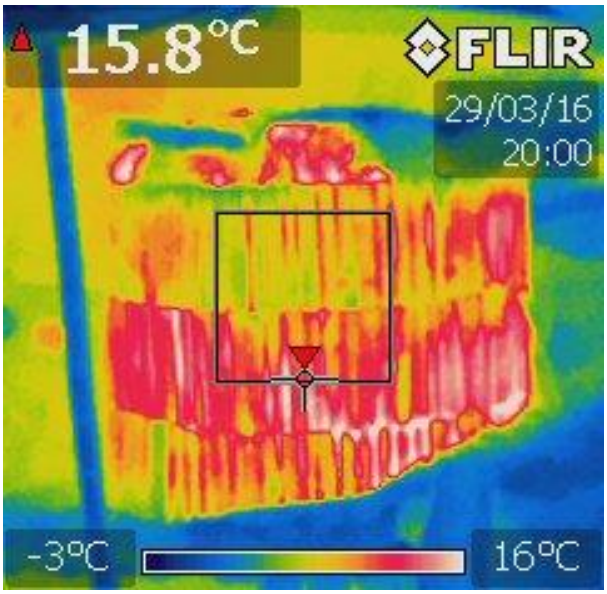
$$P = \frac{0{,}7}{3600} \cdot 992 \cdot 4180 \cdot (22{,}33 - 14{,}65) = 6192{,}2\ \mathrm{W}. \tag{5.5}$$

Takto byly v programu Microsoft Excel vypočteny hodnoty výkonu v jednotlivých minutách v době vytápění, které byly poté zprůměrovány. Celkový výkon bioreaktoru tedy je:

$$P_c = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_i = 4681\ \mathrm{W} \tag{5.6}$$

5.3.2 Výpočet tepelných ztrát

Protože bioreaktor nebyl jakkoliv speciálně izolován (biodegradovaný materiál je od okolí izolován pouze dřevní konstrukcí) vznikaly značné ztráty průchodem tepla do okolí, které by mohlo být využito k vytápění i k udržení procesů. Na obr. 5-7 je zobrazena teplota povrchu bioreaktoru pomocí termokamery, která dosahuje teploty 15,8 °C, z měření teplot je patrné, že v čase pořízení této fotografie je hodnota teploty okolí 8,43 °C a kompostovaný materiál uvnitř má teplotu 59,06 °C. Únik tepla je tak zřejmý.



Obrázek 5-7 Zobrazení teploty konstrukce bioreaktoru pomocí termokamery

Při výpočtu ztrát vyjdeme z Fourierova zákona. Pro vedení tepla rovinnou či válcovou nádobou, je tepelný tok roven:

$$\phi = \frac{S \cdot \Delta T}{\sum \frac{S_i}{\lambda_i}}, \tag{5.7}$$

kde S je povrch pláště válce,
ΔT je rozdíl vnitřní teploty a teploty okolí,
λ součinitel tepelné vodivosti materiálu.

Pro přestup tepla válcovou nádobu tak platí:

$$P_{ztr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (T_2 - T_1) \cdot \lambda}{\sum_i \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{out,i}}{r_{in,i}}} \text{ (W; m, K, W·m}^{-1}\text{· K}^{-1}\text{)}, \tag{5.8}$$

kde T_1, T_2 je teplota okolí, resp. teplota uvnitř,
r_{in}, r_{out} je vnitřní, resp. vnější poloměr válce,
l je výška válce.

Přestože je počítaný bioreaktor válcové nádoby a ztrátový výkon by se tak vypočítal dle vztahu 5.8, bude při výpočtu uvažován přestup tepla rovinnou plochou (5.9). A to z několika důvodu. Prvním důvodem je, že z velké části po dobu vytápění nefungovalo čidlo k měření teploty v jádře. Což znamená, že není k dispozici teplota v místě, která by měla konstantní vzdálenost od stěny bioreaktoru, tudíž nelze využít vztah 5.8.

Druhým důvodem je fakt, že teplo nevzniká pouze v jádře, ale téměř ve všech místech bioreaktoru. Z pozorování však bylo zjištěno, že kolem okraje bioreaktoru se utvořila cca 20 cm vrstva „izolace“. Zde byl materiál poměrně vyschlý a tak zde probíhaly minimální procesy. Proto je pro výpočet ztrát přesnější počítat s teplotou, která byla změřena 50cm od okraje a tedy blíž izolační vrstvě.

$$P_{ztr} = \frac{S_{střed} \cdot \Delta T}{\sum_i \frac{s_i}{\lambda_i}} \tag{5.9}$$

$$P_{ztr} = \frac{S_{střed} \cdot \Delta T}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2}} \text{ (W; m}^2\text{, K, m, W·m}^{-1}\text{· K}^{-1}\text{),} \tag{5.10}$$

Přičemž $S_{střed}$ je dán

$$S_{střed} = \sqrt{S_{vnitř} \cdot S_{vněj}} = 2 \cdot \pi \cdot l \cdot \sqrt{r_{vniř} \cdot r_{vněj}} \tag{5.11}$$

Dosazením do rovnice 5.10 dostaneme pro první minut ztrátový výkon. Součinitel tepelné vodivost pro měkká dřeva je dle [18] roven 0,18 W·m^{-1}· K^{-1}. Avšak určení měrné tepelné vodivosti pro materiál uvnitř bioreaktoru je problematické, neboť se jedná o směs více druhů látek, materiál je už částečně rozložen a především je v něm určité množství vody. Dle [19] a výše uvedeným skutečnostem je ve výpočtu uvažována λ_1 = 0,15 W·m^{-1}· K^{-1}

$$P_{ztr} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1{,}5 \cdot \sqrt{0{,}6 \cdot 1{,}05} \cdot 53{,}94}{\frac{0{,}4}{0{,}15} + \frac{0{,}05}{0{,}18}} = 137{,}04 \text{ W} \tag{5.12}$$

Celkový ztrátový výkon v době vytápění tak opět dostaneme aritmetickým průměrem hodnot v daném období:

$$P_{c,ztr} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{i,ztrat} = 105{,}32 \text{ W} \tag{5.13}$$

Ztrátový výkon podstavami byl zanedbán a to z důvodu dobré izolace. Dolní podstava byla izolována PVC plachtou, která byla mezi kompostovaným materiálem a zemí. Horní podstava pak byla také izolována PVC plachtou, na které byly navíc vyskládány balíky slámy, které mají dobré izolační vlastnosti.

6 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce je zaměřena na využití tepla vznikajícího při biodegradačních procesech. Jelikož se jedná o obnovitelný zdroj, konkrétně biomasu, byl tento zdroj energie v úvodu charakterizován. Podrobněji je v práci popsána bioplynová stanice, jejímž principem je právě biodegradace. Byl popsán princip takové bioplynové stanice a možnost využití odpadního tepla. V současné době jsou bioplynové stanice již velmi vhodnou alternativou ke klasickým zdrojům energie a jejich počet roste jak v České republice, tak ve světě. Hlavní přednosti BPS je ekologický provoz, při kterém se zpracovávají v podstatě již odpadní látky. Po procesu, při němž vzniká také metan, je „odpadní“ látkou tzv. digestát, který je však možné dále využívat jako hnojivo.

Dále se práce zabývá již získáváním a využíváním tepla vznikajícího při biodegradačních procesech. Také zde byly představeny různé typy bioreaktorů a stávajících systémů, které využívají toto teplo. Nicméně stavba těchto systémů je zatím spíše ojedinělou záležitostí. Tyto systémy jsou nejčastěji instalovány na větších farmách, které disponují dostatkem kompostovacího materiálu. V porovnání s BPS tak opadá nutnost dovozu materiálu na výrobu tepla. Při jímání tepla je důležité sledovat jeho odvedeného množství, neboť v případě velkého poklesu teploty v kompostu může dojít k zastavení činnosti mikroorganismů, tudíž k zastavení celého procesu.

V praktické části byl navržen a postaven bioreaktor, který byl s velké části naplněn dřevní štěpkou, zbývající část tvořil zeleninový odpadní materiál. Dovnitř bioreaktoru byla umístěna čtyři teplotní čidla, díky kterým bylo možno lépe určit dobu vhodnou k vytápění objektu. K vytápění byla do bioreaktoru instalována 100 m dlouhá polyethylenová hadice, jíž proudila voda. Ta se uvnitř bioreaktoru ohřála a následně ve vytápěném objektu odevzdala teplo do okolí. Jak lze vidět v grafu na obrázku 5-4, skutečně došlo ke zvýšení teploty. Nicméně poté teplota v bioreaktoru klesla pod 45°C, což znemožňuje další vytápění, neboť by mohlo dojít k úplnému vychladnutí, a tudíž k zastavení biodegradačních procesů.

Hlavní cíl této práce návrh a realizace bioreaktoru byl tedy splněn. Měřením se potvrdilo, že je možné jímat teplo vznikající při biodegradačních procesech (výkon bioreaktoru v době vytápění byl 4681W). Avšak došlo k poměrně rychlému poklesu teplot uvnitř bioreaktoru. Z toho důvodu by byl tento bioreaktor vhodný například k vytápění menšího objektu, např. skleníku.

Na základě výsledků předložené práce by bylo vhodné na ni navázat řešením otázky zdokonalení samotného bioreaktoru (jeho velikosti, izolace); a také by bylo vhodné zajistit promíchávání materiálu uvnitř bioreaktoru. Následně pak opět provést měření, jež může být srovnáno s již získanými hodnotami.

POUŽITÁ LITERATURA

[1] Obnovitelné zdroje. Energostat. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://energostat.cz/obnovitelne-zdroje.html

[2] MASTNÝ, Petr. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.

[3] CENEK, Miroslav. *Obnovitelné zdroje energie*. 2. upr. a dopl. vyd. Praha: FCC Public, 2001, 208 s. ISBN 80-901-9858-9

[4] VÁŇA, Jaroslav. Využití digestátů jako organického hnojiva. *Biom.cz* [online]. 2007-04-25 [cit. 2015-12-16]. ISSN 801-2655. Dostupné z: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-digestatu-jako-organickeho-hnojiva

[5] DOHÁNYOS, Jaroslav. Anaerobní reaktor není černou skříňkou - teoretické základy anaerobní fermentace. *Biom.cz*[online]. 2008-11-17 [cit. 2015-12-16]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace

[6] RUTZ, Dominik, Rita RAMANAUSKAITE a Rainer JANSSEN. *Sustainable Heat Use of Biogas Plants* [online]. s. 81 [cit. 2015-11-13]. ISBN 978-3-936338-29-4. Dostupné z: http://www.biogasheat.org/wp-content/uploads/downloads/2013/04/Handbook-2012-12-14-Final.pdf

[7] Využití odpadního tepla z výroby bioplynu. *Biom.cz* [online]. 2014-4-23 [cit. 2015-12-16]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: http://biom.cz/cz/odborne-clanky/vyuziti-odpadniho-tepla-z-vyroby-bioplynu

[8] Jaroslav Váňa, tematické články. Kompostuj. [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://www.kompostuj.cz/vime-jak/literatura-tematicke-clanky-slovnicek-pojmu/kompostovani-bioodpadu-je-technologii-trvale-udrzitelneho-zivota/

[9] ŠAFAŘÍK, Miroslav. Bioplynové stanice – podmínky a možnosti využití tepla. *Biom.cz* [online]. 2012-03-13 [cit. 2015-12-16]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: http://www.biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-podminky-a-moznosti-vyuziti-tepla

[10] SINGER, Vojtěch. *Moderní metody ekologického kompostování* [online]. Brno, 2008 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://www.is.mzlu.cz/lide/clovek.pl?zalozka=13;id=3117;studium=25465;zp=15167;download_prace=1. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Bořivoj Groda, DrSc

[11] VÍTĚZ, Tomáš. Technika zpracování odpadů. *Mendelu* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://www.web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/210/19557.pdf

[12] Biologické metody zpracování kompostu. *hgf.vsb.* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: *http://www.h1gf0.vsb.cz/546/bmzo/pages/Technologie_kompostovani.html*

[13] TUCKER,Molly Farrell. Extracting Thermal Energy From Composting. *BioCycle* [online]. August 2006 (Vol. 47, No. 8, p. 38) [cit. 2015-12-12]. Dostupné z: http://www.biocycle.net/2006/08/20/extracting-thermal-energy-from-composting/

[14] MATT, Smith a Aber JOHN. Heat Recovery From Compost.*BioCycle* [online]. 2014, (February) [cit. 2015-12-16]. Dostupné z http://www.biocycle.net/2014/02/21/heat-recovery-from-compost/

[15] Composter Heat Exchanger. *Offgridding* [online]. [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: http://www.offgridding.com/compost.html

[16] Ing. Stanislav Piňos, Stavba. *tzb info.* [online]. 7.1.2013 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: *http://voda.tzb-info.cz/9453-energeticke-uspory-a-moznost-vyuziti-energie-pri-uprave-a-cisteni-vod*

[17]Products. *Acrolab.* [online].[cit.2015-12-12].Dostupné z: *http://www.acrolab.com/products/isobars-heat-pipes.php*

[18] Tabulky a výpočty. tzbinfo. [online]. 22.5.2016 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/58-hodnoty-fyzikalnich-velicin-vybranych-stavebnich-materialu

[19] VAN DONK, Simon a Ernest TOLLNER. *Apparent Thermal Conductivity of Mulch Materials Exposed to Forced Convection* [online]. 2000 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1063&context=westcentresext

Příloha A

Z důvodu velkého množství naměřených dat nebylo možné tato data umístit do předložené práce. Data jsou k dispozici elektronicky na přiloženém CD – ROM v programu Microsoft Excel.

Na listu č. 1 jsou všechny naměřené hodnoty, v listu č. 2 jsou zaznamenány hodnoty od doby, kdy bylo zahájeno vytápění, a v listu č. 3 jsou hodnoty zaměřené v poslední fázi.