



# 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

## ZDOKONALENÍ TEPELNÉHO OKRUHU BIOREAKTORU A JEHO OVĚŘENÍ

IMPROVEMENT OF THE THERMAL CIRCUIT OF THE BIOREACTOR AND ITS VERIFICATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Lapčík

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2021

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

**Student:** David Lapčík

**ID:** 214038

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2020/21

## NÁZEV TÉMATU:

### Zdokonalení tepelného okruhu bioreaktoru a jeho ověření

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je navázat na existující řešení konstrukcí bioreaktorů a provést revizi kritických míst, navrhnout zlepšení a realizovat novou verzi funkčního prototypu. Součástí bude práce se řídicím systémem AMINI, měření tepla a teplot.

Doporučená osnova práce:

1. zhodnocení dosavadních zkušeností s konstrukcemi bioreaktorů,
2. řídicí systém AMINI a jeho využití při měření a řízení reaktoru,
3. zdokonalení aerace reaktoru a implementace měřicí techniky,
4. vyhodnocení energetického potenciálu testovacího zařízení,
5. měření na funkčním vzorku.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího bakalářské práce

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 1.6.2021

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

## 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.

## **ABSTRAKT**

Hlavním myšlenkou této bakalářské práce je na rešerši dosavadních řešení bioreaktorů navázaná jejich praktická realizace s odlišným řešením konstrukcí, složením biomasy, úpravami aerace a tepelného výměníku k odběru tepla z procesu aerobního kompostování. Závěrem této práce budou vyhodnoceny výsledky teplotních měření na funkčních prototypech v závislosti na jejich vlastnostech a výpočty teoretické tepelné bilance včetně jejich srovnání.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

bioreaktor, biomilíř, aerobní kompostování, řídicí systém AMiNi2DS, obnovitelné zdroje energie, kondenzační výměník, odběr tepla

## **ABSTRACT**

The main idea of this bachelor thesis is a research of existing bioreactor solutions related to their practical implementation with different design, biomass composition, aeration modifications and heat exchange to recover heat from the process of aerobic composting. The conclusion of this work will be evaluation of the results of temperature measurements on functional prototypes depending on their properties and calculations of theoretical heat balance including their comparison.

## **KEYWORDS**

bioreactor, compost heat recovery system, aerobic composting, AMiNi2DS control system, sustainable energy, condenser-type heat exchanger, heat recovery

LAPČÍK, David. *Zdokonalení tepelného okruhu bioreaktoru a jeho ověření*. Brno, 2021, 63 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Zdokonalení tepelného okruhu bioreaktoru a jeho ověření“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu **doc. Ing. Petru Baxantovi Ph.D.** za odborné vedení, konzultace, trpělivost, podnětné návrhy k práci i do života. Dále bych chtěl poděkovat **Pile Bystrc** v Brně, **Pile Gretes** v Kudlovicích a sousedům pana vedoucího za poskytnutí biomasy, bez které by nebylo možné všechny prototypy bioreaktorů realizovat.

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Biomasa</b>	<b>11</b>
1.1 Druhy biomasy	11
1.2 Bioenergie – energetické využití biomasy	11
<b>2 Kompostování</b>	<b>13</b>
2.1 Aerobní kompostování	13
2.2 Fáze kompostování	13
2.2.1 Mezofilní fáze	15
2.2.2 Termofilní fáze	15
2.2.3 Druhá mezofilní fáze	15
2.2.4 Fáze zrání	16
2.3 Faktory ovlivňující proces kompostování	16
2.3.1 Poměr uhlíkatých a dusíkatých složek	16
2.3.2 Vlhkost	17
2.3.3 Vzduch	18
2.3.4 Homogenizace a velikost částic biomasy	18
2.3.5 Teplota	18
2.4 Tepelná bilance kompostu	19
<b>3 Dosavadní řešení bioreaktorů</b>	<b>22</b>
3.1 Historie	22
3.2 Konstrukce kompostovacích bioreaktorů	23
3.3 Metody získávání tepla	25
3.3.1 Přímé využití tepla	26
3.3.2 Konduktivní odběr tepla	26
3.3.3 Kondenzační odběr tepla	26
<b>4 Řídicí systém</b>	<b>29</b>
4.1 AMiNi2DS	29
4.2 Teplotní snímače	30
<b>5 Realizace bioreaktoru – prototyp č.1</b>	<b>31</b>
5.1 Chronologie prací na bioreaktoru	31
5.2 Původní bioreaktor	31
5.2.1 Vyprazdňování a oprava částí	32
5.3 Realizace nových úprav	34

5.3.1	Aerace . . . . .	34
5.3.2	Izolace dřevěných částí stěn . . . . .	35
5.4	Plnění biomasou . . . . .	36
5.5	Tepelný výměník . . . . .	36
5.5.1	Zapojení výměníku do teplovodního okruhu objektu . . . . .	36
5.6	Implementace měření . . . . .	38
5.7	Výsledky měření . . . . .	38
5.7.1	Výsledky teoretického výpočtu tepelné bilance bioreaktoru . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Realizace bioreaktoru – prototyp č.2</b>	<b>42</b>
6.1	Chronologie prací na bioreaktoru . . . . .	42
6.2	Realizace nových úprav . . . . .	42
6.3	Implementace měření . . . . .	44
6.4	Výsledky měření . . . . .	44
6.4.1	Výsledky teoretického výpočtu tepelné bilance bioreaktoru . . . . .	45
<b>7</b>	<b>Vyhodnocení prototypů bioreaktorů</b>	<b>48</b>
7.1	Výhledové řešení a náměty k problematice bioreaktorů . . . . .	49
	<b>Závěr</b>	<b>50</b>
	<b>Literatura</b>	<b>51</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>55</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>58</b>
	<b>A Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.1</b>	<b>59</b>
	<b>B Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.2</b>	<b>60</b>
	<b>C Naměřená data na bioreakoru (prototyp č.1)</b>	<b>61</b>
	<b>D Naměřená data na bioreakoru (prototyp č.2)</b>	<b>62</b>
	<b>E Program pro řídicí systém AMiNi2DS</b>	<b>63</b>

# Seznam obrázků

2.1	Typické parametry a mikrobiální kultivace během kompostování [1]	14
2.2	Grafické znázornění tepelné bilance kompostu	19
3.1	Jean Pain's method – vršení biomilře, kompresní vaky na uskladnění bioplynu vpravo [2]	23
3.2	Jean Pain's method – hotový biomilř vedle vytápěného fóliovníku [2]	23
3.3	ASP metoda kompostování [3]	25
3.4	Kondukční tepelný výměník z polyethylenové trubky [4]	26
3.5	Kondenzační tepelný výměník z polyethylenové trubky [5]	27
3.6	Princip funkce heat pipe Isobar <sup>TM</sup> od firmy Acrolab [6]	28
4.1	Řídicí systém AMiNi2DS od firmy AMiT, spol. s. r. o. [7]	29
5.1	Původní stav bioreaktoru	32
5.2	Nálezový stav výměníku původního bioreaktoru	33
5.3	Opravené vyspádané dno bioreaktoru	33
5.4	Řez bioreaktorem – prototyp č.1	34
5.5	Výkres jedné dřevěné desky obalové vrstvy	35
5.6	Zjednodušené schéma zapojení teplovodního okruhu, 1 – výměník, 2 – ventil, 3 – expanzní nádoba, 4 – bojler, 5 – čerpadlo	37
5.7	Dovršený bioreaktor s instalovaným kondenzačním výměníkem	37
5.8	Umístění čidel v bioreaktoru – prototypu č.1, 1 – teplota 1, 2 – teplota 2, 3 – venkovní	38
5.9	Průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.1	39
5.10	Přiblížení průběhů teplot v bioreaktoru – prototypu č.1 – po zavlažení	39
6.1	Řez biomilřem – prototyp č.2	43
6.2	Hotový biomilř – prototyp č.2 – s měřicí sestavou	43
6.3	Pohled na obrazovku AMiNi2DS v průběhu měření, Teplota 1 odpovídá „venkovní“, Teplota 2 – „Bioreaktor JIH“ a Teplota B – „Bioreaktor ZÁPAD“	44
6.4	Průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.2	46
6.5	Přiblížené průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.2 – s proložením rozdílem „Bioreaktor JIH“ a „Bioreaktor ZÁPAD“	46

## Seznam tabulek

2.1	Stupně „Rottegrad“ [8] . . . . .	14
2.2	Tabulka poměru C:N kompostovaných látek [9] . . . . .	17
2.3	Shrnutí faktorů přesycení a vysušení kompostu [10] . . . . .	18
5.1	Vstupní proměnné pro výpočet tepelné bilance prototypu č.1 . . . . .	41
6.1	Vstupní proměnné pro výpočet tepelné bilance prototypu č.2 . . . . .	47
7.1	Srovnání jednotlivých realizovaných prototypů . . . . .	48

# Úvod

V dnešní době se využívá mnoho způsobů ke zpracování biomasy, případně její energetické přeměny. Důvodem je neodvratitelně nastávající klimatická změna a s tím spojen globálně rostoucí zájem v odvětví obnovitelných zdrojů energie. Nejen výrobci a poskytovatele energií, ale i běžní lidé se začínají více zajímat o ochranu životního prostředí, recyklaci použitých materiálů, soběstačné off-grid systémy. . . Zkrátka se snaží žít udržitelnějším způsobem.

Stále více zemí se připojuje k trendu výroby a spotřebě lokálních energií než k jejich centrální výrobě. Tento sklon by mohl být součástí řešení s cílem snížit 30 % příspěvek Evropského sektoru bydlení GHG emisím. [11]

Biomasa hrála vždy a hraje stále paralelně s existencí lidské populace velkou roli. Její hlavní využití dříve v historii spočívalo primárně k získávání tepla pro vaření, nebo vytápění prostor. Dnes své pole působnosti rozšířila taktéž do globální spotřeby energie. [12]

Méně známou možností získávání bioenergie – energie produkované z biomasy – je za pomoci biodegradčního procesu neboli kompostování. Již dlouhá staletí však lidé vědí, že proces aerobního kompostování uvolňuje velké množství tepla, které se ale za běžných podmínek vytratí do okolí. Existuje proto mnoho komerčních, akademických i individuálních projektů, které se problematice CHRS věnují. Mezi nejznámější z nich se řadí Pain and Pain (Jean Pain's method), která popisuje právě mnohaletou práci stejnojmenného autora ve Francii. Jean Pain's method spočívá v odvádění biotermální energie z kompostovacího procesu pomocí přes 100 metrů dlouhého trubicového výměníku plněného vodou, jako teplovodným médiem a uloženého ve středu daného biomilíře<sup>1</sup>. Biomasa v tomto biomilíři by měla být zejména ve formě dřevěné štěpky o celkové váze cca 50 tun. Výsledkem je pak **6 měsíční** ohřev vody z teploty 10 °C na 60 °C o vydatnosti 4l/min. [13]

V rámci této bakalářské práce budou zhodnoceny dosavadní zkušenosti s konstrukcemi daných bioreaktorů (biomilířů), jejich následné úpravy a praktické realizace funkčních prototypů.

---

<sup>1</sup>Kompostová hromada v kónickém tvaru

# 1 Biomasa

Pojem biomasa sdružuje veškeré látky organického původu tzn. rostliny, živočichové a jejich odpady. Jedná se o obrovský obnovitelný zdroj surovin a energie. Na světě se každým rokem pomocí fotosyntézy vytváří 120 až 220 miliard tun biomasy a její energetický obsah je pět krát vyšší než současná celosvětová spotřeba energie. Rostlinné obnovitelné zdroje se dají pro energetické využití buď přímo pěstovat a nebo využíváme jejich zbytků tzn. odpadní biomasy. [14]

## 1.1 Druhy biomasy

Veškerou energeticky využitelnou biomasu (v rámci dosavadních možností technologií) můžeme rozdělit do třech hlavních typů: lipidy, cukry/škroby, celulózy/lignocelulózy. **Lipidy** – tuky, oleje, vosky – jsou bohatými zdroji energie, nerozpustné ve vodě a často látky odvozené z „ne-dřevnatých“ rostlin. Mezi hlavní zástupce zdrojů lipidů, které se používají v bioenergetice jsou palmy, sójové boby a téměř veškeré semena plodin např. slunečnicové. **Cukry/škroby** jsou zkrátka sacharidy, které se typicky nachází v jedlých potravinách. Nejpoužívanější surovina je např. kukuřice. **Celulóza** se v rámci biomasy nachází v částech rostlin jako jsou listy a stonky, naopak **lignocelulóza** částech dřevnatých. Veškerou takovouto biomasu můžeme získat z: lesních, agrokulturních a vodních hospodářství, v menším objemu poté ze soukromých pozemků/zahrad. [12]

## 1.2 Bioenergie – energetické využití biomasy

Dle [14] jsou způsoby získávání energie z biomasy:

- termochemická přeměna biomasy (suché procesy),
- pyrolýza,
- zplyňování,
- spalování,
- biochemická přeměna biomasy (mokré procesy),
- metanové kvašení,
- alkoholové kvašení,
- chemická přeměna biomasy,
- esterifikace,
- získávání odpadního tepla při zpracování biomasy (při kompostování, čištění odpadních vod apod.).

Nejčastější a nejznámější způsob získávání energie je termochemická přeměna biomasy, což může být například běžné spalování dřeva, kůry, nebo hnědého uhlí. Jedná

se o proces při vysokých teplotách nad 660 °C, kdy dochází k rozkladu organického materiálu na hořlavé plyny, destilační produkty, uhlí, oxid uhličitý a vodu. [14]

Tento způsob získávání energie ovšem velmi urychluje klimatickou změnu. V moderních spalovnách může sice dosahovat až 80 % účinnosti, ale množství oxidu uhličitého, které se do ovzduší dostane velmi rychle, nově vysazené stromy nebudou schopny absorbovat ještě několik desetiletí. Dle Williama Gilletta, ředitele programu EASAC pro energetiku: „Lesní biomasa je oslavována jako magické řešení výhodné pro politiky, lesníky i energetické společnosti, protože současná pravidla umožňují, aby byla bez rozdílu dotována jako obnovitelná energie. Ale s ohledem na změnu klimatu je to, jako bychom skočili z rozpálené pánve do ohně.“ S cílem snížit co nejrychleji přírůstky globálního oteplování se vysokoteplotní spalování biomasy jakožto obnovitelný zdroj energie v podstatě vůbec neslučuje. [15]

Tím méně známým způsobem je získávání odpadního tepla při nízkoteplotním spalování biomasy např. kompostování, který bude popsán detailněji v nadcházející samostatné kapitole.

## 2 Kompostování

Kompostování je **anaerobní** proces (bez přístupu kyslíku) za účelem vzniku methanu a následně tepelné a elektrické energie (bioplynné stanice), nebo **aerobní** proces s primárním účelem získání kvalitního kompostu, což je hnojivo obsahující humózní složky dodávající poté živiny rostlinám a živočichům v půdě. Obecně lze říci, že se jedná o proces rozkladu organických hmot na jakousi houbovitou hmotu s pórovitou strukturou. Díky vysokému obsahu humusu v půdě dochází k mnohem účinnějšímu zadržování vody, zvyšuje kyprosti soudržnost a také stabilizuje její hodnotu pH. Při kompostování se snažíme vytvořit ideální podmínky pro kultivaci mikroorganismů, které se na rozkladu podílejí. Nejedná se zkrátka o nic jiného než napodobení a **urychlení** autoregulačních a samočisticích procesů vyskytujících se běžně v přírodě. [16]

### 2.1 Aerobní kompostování

Jak již vyplývá z úvodu této kapitoly, aerobní kompostovací proces je rozklad za přístupu kyslíku. Vzdušný kyslík má na kultivaci mikroorganismů a s nimi spojenou přeměnu zakládky<sup>1</sup> značně pozitivní vliv. Přísun kyslíku do zakládky se řeší mnoha způsoby. Ten nejčastější z nich je řešení překopáváním, poté to můžou být tlaková aerace nebo odsávání vzduchu.

Suroviny vhodné pro kompostování by měly projít určitou úpravou, a to alespoň rozdrcením a následnou homogenizací (promícháním). [16]

### 2.2 Fáze kompostování

Během fází kompostování různorodé mikroorganismy vykonávají komplexní metabolické procesy, při kterých vylučují jejich vlastní mikrobiální biomasu za přítomnosti kyslíku, adekvátní vlhkosti, dusíkatých a uhlíkatých složek. Jako vedlejší produkt tyto mikroorganismy vytvářejí citelné teplo a pórovitou stabilní hmotu – kompost. Citelné teplo pochází právě z rozmanitých metabolických aktivit mikroorganismů, z toho důvodu se teplota během fází kompostování mění. [10]

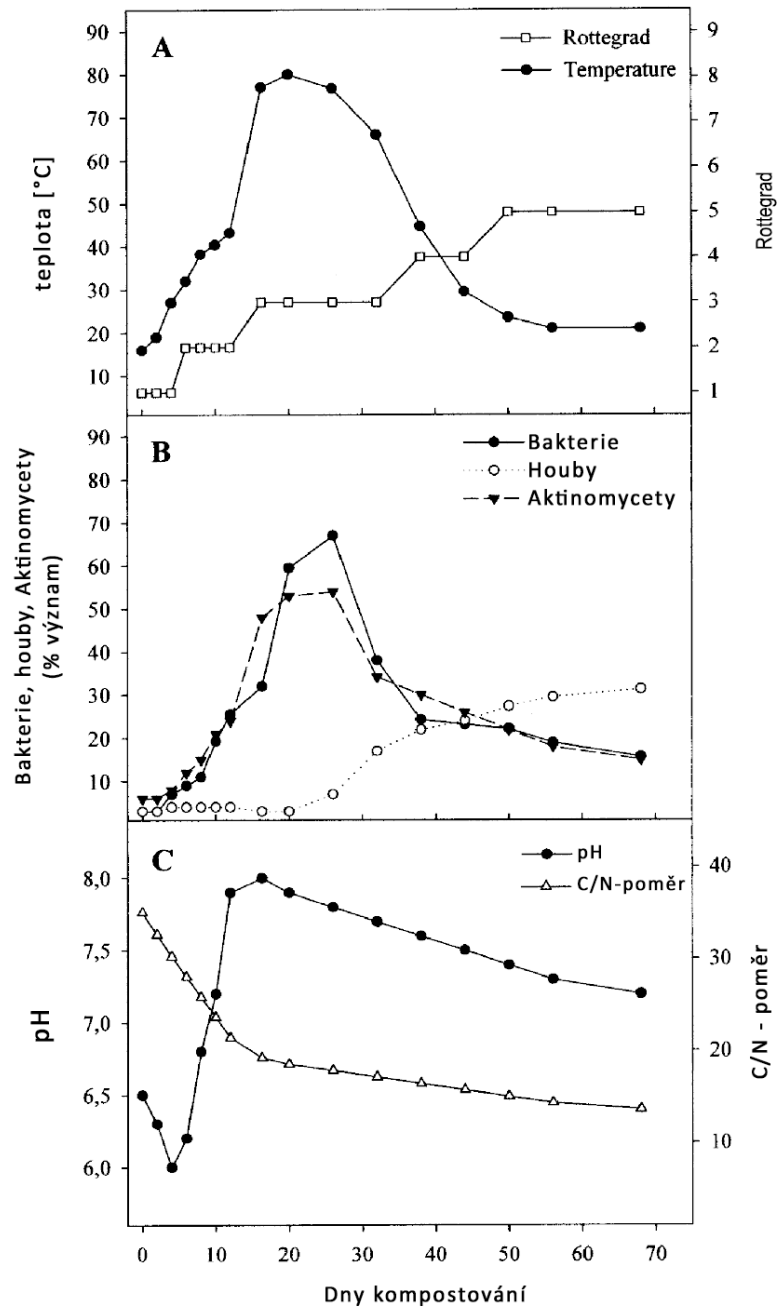
Při rozdílných technologických postupech, ale za to správně dodržovaných základních zásadách je proces kompostování obdobný. Ten se dá rozdělit do čtyřech hlavních fází: mezofilní, termofilní, druhá mezofilní a fáze zrání. [16], [1] Stupeň stádia kompostu může být vyjádřen výrazem „Rottegrad“ (viz tabulka 2.1), který je založen na potenciální schopnosti vlastního vyhřívání aerobního kompostu. [8]

---

<sup>1</sup>Zakládkou se rozumí hromada biomasy založená ke kompostování např. také obsah bioreaktoru

Tab. 2.1: Stupně „Rottegrad“ [8]

Rottegrad	$\vartheta$ [°C]	Stádium zakládky
I	> 60	Syrový
II	50–60	Čerstvý
III	40–50	Čerstvý/Zralý
IV	30–40	Zralý
V	< 30	Zralý



Obr. 2.1: Typické parametry a mikrobiální kultivace během kompostování [1]

### 2.2.1 Mezofilní fáze

Středně-teplotní fáze, která začíná na okolní teplotě v vydrží jen několik prvotních dní. V této fázi jsou nejdominantnější mezofilní mikroorganismy, bakterie a aktinomyceity činné do cca 45 °C. Doba trvání závisí hlavně od složení dané biomasy, okolní teplotě, s tím pojící se tepelnou izolací<sup>2</sup> a dále aerací a vlhkostí zakládky/vsázky. Metabolická aktivita různých skupin mikroorganismů vede ke zvýšení teploty, protože tyto mikroby využívají dusíkaté a uhlíkaté složky organické hmoty k asimilaci<sup>3</sup> jejich těla. Rozkladem sloučenin obsahujících cukr se vytváří organické kyseliny, a proto může pH rozkládající se biomasy klesnout až na hodnotu 4. [10]

Mezofilní organismy se vyskytují taktéž v termofilní fázi a to v krajních oblastech, kde nepůsobí teploty vyšší jak 45 °C, tedy pokud se biomasa nenachází v bioreaktoru s velmi účinnou izolací, ale je založena jako hromada na volném prostranství. [17]

### 2.2.2 Termofilní fáze

Jakmile teplota kompostu vystoupá nad 45 °C, nastává termofilní fáze, kdy jsou mezofilní mikroorganismy nahrazeny termofilními (nejčastěji jen termofilními bakteriemi). [10]

Dle [18] **termofilní bakterie** jsou teplomilné bakterie, které mohou být dvojího druhu, a to striktně termofilní (stenotermofilní) nerostoucí pod 30 °C s optimem růstu 55 °C a maximem 80 °C; a fakultativně termofilní (eurytermofilní) s optimem růstu 45–55 °C a maximem růstu 75 °C a rostoucí i při teplotách pod 30 °C.

V této fázi dochází k degradaci (mineralizaci) polysacharidů, bílkovin a tuků zapříčiněním hub, bakterií a především **termofilních** mikroorganismů. [16] Ze stránky budoucí kvality a hygienizace kompostu jsou teploty nad 60 °C velmi důležité. Takto vysoké teploty spolehlivě zabíjí zárodky virů a různých dalších kontaminantů, a dokonce i semen plevelů. [10]

Z předešlého tedy vyplývá, že termofilní fáze bude nabývat teplot cca 45–70 °C. Může vydržet několik dní až týdnů, pokud se jedná o odpadní biomasu z domácnosti. V případě velkého objemu a tuhé biomasy např. dřevní štěpky, může termofilní fáze vydržet i několik měsíců. [1]

### 2.2.3 Druhá mezofilní fáze

V ideálním případě po vyčerpání uhlíkatých a dusíkatých složek začne teplota v kompostu klesat pod 45 °C a tím nastává druhá mezofilní fáze, která ve většině případů

<sup>2</sup>Platí v případě bioreaktoru, kdy je biomasa vsázkou

<sup>3</sup>Přijímání a přeměna látek organizmem, který tyto látky používá pro výstavbu svého těla

vydrží po několik týdnů. V této fázi nadále pokračuje degradace některých polymerů – polysacharidů, např. celulózy a je možné spatřit některé druhy aktinomycet puhým okem. [10]

#### 2.2.4 Fáze zrání

Při teplotách pod 20-30 °C začíná kompost dozrávat. Přesněji dochází ke kondenzaci uhlíkatých sloučenin a zpětné polymerizaci, která napomáhá k formulaci fulvových a huminových kyselin.<sup>4</sup> [10]

Během této fáze by již kompost neměl nijak zapáchat spíše vůni připomíná lesní rašelinu a má tmavě hnědé, někdy dokonce až černé zbarvení. Tyto vlastnosti značí, že jej můžeme použít jako lokálně „vyrobené“ organické hnojivo.

### 2.3 Faktory ovlivňující proces kompostování

Jelikož se jedná o přirozený přírodní proces, který je u konce i začátku cyklu života, tak vše v něm souvisí se vším. Proto podmínky vně i uvnitř kompostu pro kultivaci, reprodukci mikroorganismů hrají kritickou roli. Nelze určit faktor s nejmenším či největším dopadem na proces. Vyvození jakéhokoliv z nich z „rovnováhy“ může mít na proces fatální důsledky. Dle [10] těmi nejzásadnějšími faktory jsou

- **Poměr uhlíkatých a dusíkatých složek (C:N)**
- **Vlhkost**
- **Aerace**
- **Homogenizace biomasy**
- **Teplota (okolní i uvnitř)**

#### 2.3.1 Poměr uhlíkatých a dusíkatých složek

Uhlíkaté složky (**C**) se dají představit jako vše suché nebo dřevnaté – dřevo, štěpka, sláma, suché listí, papír, piliny. K těm dusíkatým (**N**) naopak řadíme všechny zelené čerstvé organické hmoty, například posekaná tráva, plevel, ovoce kuchyňský odpad, trus a moč zvířat i lidí, dokonce i těla mrtvých zvířat. [20]

Jak bylo psáno již výše, kompostovat se dá prakticky každá organická hmota. Je však třeba dbát na poměr použitých složek. Ideální poměr uhlíku k dusíku (**C:N**) je 20-30:1. Pokud máme více máme v kompostu více uhlíkatého materiálu (>35 dílů), veškeré pochody se zpomalují a dochází k úniku CO<sub>2</sub> a tzv. „rašelinatění“ směsi. Při nadbytku dusíku kompost zahrňuje a unikají z něj plyny jako je čpavek

<sup>4</sup>Huminové a fulvonové látky vznikají rozkladem organických hmot a jen obtížně podléhají dalšímu rozkladu. [19]

a methan. V případě, že bychom kompost navršili pouze z dusíkatých materiálů, k čemuž v realitě často dochází, bude hmota trpět nedostatkem kyslíku a téměř bychom následný proces mohli označit jako anaerobní. [9]

V tabulce č. 2.2 můžete vidět poměry jednotlivých druhů organických hmot.

Tab. 2.2: Tabulka poměru C:N kompostovaných látek [9]

Materiál	C:N
Piliny	až 500:1
Papír, lepenka	350:1
Kůra	120:1
Sláma (např. pšenice, ječmen)	100:1
Sláma (např. žito, oves)	60:1
Listí	50:1
Hovězí, koňský hnůj	25:1
Tráva	20:1
Drůbeží podestýlka	15:1
Slepičince	10:1
Močůvka	2:1

### 2.3.2 Vlhkost

Mikrobiální aktivita a vlhkost jsou v kompost velmi blízce provázány. Voda obsažená v organické hmotě slouží především jako transportní médium živin skrze buněčné stěny mikroorganismů. [10] Procentuální vlhkost kompostu je ovlivněna velikostí částic biomasy. Kompost navršený např. z dřevní štěpky o větší velikosti jednotlivých částic bude více strukturovaný, bude mít větší obsah kyslíku, a proto mnohem rychleji vysychá. Naopak vodou přesycená hromada, či z malých částic složená kyslík vytlačuje a může se uchylovat k mírně anaerobnímu procesu – hnilobě. Vysušením kompostu přecházejí mikroorganismy do klidového stádia a tedy veškeré mikrobiální procesy a pochody se zastavují. Navíc se mohou vytvořit pro kompost nebezpečné plísně produkující antibiotika a mohou bakterie usmrtit, tzn. nedojde k vytvoření humusu. [9]

Ideální hodnota vlhkosti v kompostu se pohybuje od 45 % do 60 %. Hodnoty vlhkostí, jejich důsledky a řešení jsou shrnuty v tabulce č.

Tab. 2.3: Shrnutí faktorů přesycení a vysušení kompostu [10]

Procentuální vlhkost	Důsledek	Řešení
<45 %	Nedostatečná vlhkost. Postupný úpadek celého procesu.	Zavlažení kompostu, přidání vysoce dusíkaté biomasy, např. močůvka, bylinný zákvas, zbytky zeleniny a ovoce. . .
>60 %	Příliš vysoká vlhkost. Vnik anaerobních zón.	Zastřešení, přidání vysoce uhlíkatých složek, nejlépe pilin, které vodu nasáknou.

### 2.3.3 Vzduch

Veškeré organismy uvnitř totiž k životu potřebují velké množství kyslíku. Provzdušnění se úzce pojí s vlhkostí, jelikož voda a postupné sedání kompostu zapříčiněné gravitací kyslík vytěsňují, může se aerobní proces začít měnit v anaerobní (zahnívat a zapáchat). Tomuto se dá předejít přehozením/překopáním kompostu nebo aeračním systémem např. v podobě vertikálních ventilačních otvorů nebo alespoň „kráterem“ ve vrchní části hromady. [9], [20]

### 2.3.4 Homogenizace a velikost částic biomasy

Homogenizací se rozumí důkladné promíchání uhlíkatých a dusíkatých složek. Nepravidelné vrstvení/promíchání by mohlo mít za následek vytvoření „nevyhořených“ zón.

Velikost jednotlivých částic dokáže velmi ovlivnit jejich biodegradační dobu:

- **malé částice** → málo strukturovaná směs → méně kyslíku → lepší homogenizace → větší náchylnost k překročení mezí vlhkosti
- **velké částice** → více strukturovaná směs → více kyslíku → horší homogenizace → větší náchylnost k vysoušení kompostu

### 2.3.5 Teplota

Z technického a vědeckého hlediska je kompostování velmi složitý proces, který má mnoho ovlivňujících faktorů, tudíž je velmi nestabilní. Teplota je dalším z nich. Jedná se jak o teplotu okolí kompostu, tak teplotu uvnitř. [21]

Pro kompost volně ložený (bez izolace) může být **okolní teplota** kritická zvláště, pokud je kompost zakládán/přehazován – jádro může být natolik ochlazeno, že se

biodegradační procesy zpomalí/úplně zastaví (teploty pod 0 °C), nebo pokud se jedná o kompost menšího objemu (např. 1 m<sup>3</sup>).

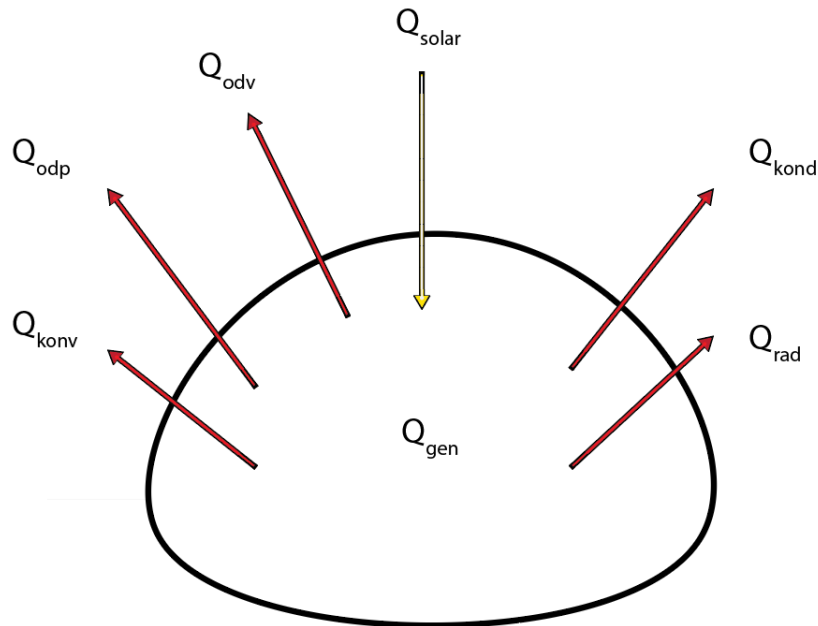
## 2.4 Tepelná bilance kompostu

Doposud bylo provedeno několik experimentů zabývajících se výpočty množství tepla generovaného biomasou, ovšem výsledky a proměnné jednotlivých autorů se od sebe lišily. Je to hlavně z důvodů zmíněných výše. Proto dle [21] byly stanoveny tyto předpoklady pro teoretický výpočet tepelné bilance modelu:

- Systém udržuje konstantní tlak.
- Průtoky vzduchu na vstupu a výstupu kompostové hromady jsou stejné.
- Použitá směs biomasy je co nejvíce homogenní.
- Při zakládání je známé přesné složení organické hmoty (C, N, voda, kyslík)
- Doba kompostování je vyjádřena jako doba biodegradace organické hmoty.

Grafické znázornění tepelné bilance je možno vidět na obrázku č. 2.2. Rovnice tepelné bilance kompostu je dána součtem tepla dodaného a odebraného a můžeme ji zapsat jako:

$$Q = Q_{\text{gen}} + Q_{\text{solar}} - Q_{\text{odp}} - Q_{\text{konv}} - Q_{\text{kond}} - Q_{\text{rad}}. \quad (2.1)$$



Obr. 2.2: Grafické znázornění tepelné bilance kompostu

Energii generovanou  $Q_{\text{gen}}$  během rozkladu organické hmoty lze určit jako energii vzniklou při spalování stejného materiálu o stejné hmotnosti, viz rovnice 2.2. [22]

$$Q_{\text{gen}} = h_s \frac{dm_s}{dt}, \quad (2.2)$$

kde  $h_s$  [kJ·dkg<sup>-1</sup>] je energie uvolněná spalováním suché biomasy a  $m_s$  [kg] její hmotnost. Derivaci hmotnosti  $m_s$  podle času můžeme zapsat jako:

$$\frac{dm_s}{dt} = K(m - m_s), \quad (2.3)$$

kde  $K$  [den<sup>-1</sup>] je míra rychlosti rozkladu o lokální teplotě a vlhkosti a  $m$  [kg] je celková hmotnost kompostu. [21],[23], [24]

Procentuální vlhkost kompostované biomasy je možné vypočítat dle [25] z hmotnosti dané biomasy ve vysušeném stavu  $m_s$  a hmotnosti stejné biomasy v čerstvém stavu:

$$h = \frac{m - m_s}{m} \cdot 100 \%. \quad (2.4)$$

Solární záření emitované sluncem kompostu dodává energii ve formě tepla. K jejímu určení můžeme použít rovnici 2.5. [21] Prakticky však závisí na umístění, zakrytí hromady.

$$Q_{\text{solar}} = \Psi k_s \left( \frac{D}{D_0} \right) \cos \Phi_z, \quad (2.5)$$

kde  $\Psi$  je koeficient „čistoty“ záření,  $k_s$  [kJ·den<sup>-1</sup>] solární konstanta,  $D$  [km] vzdálenost mezi Zemí a sluncem,  $D_0$  [km] střední vzdálenost mezi Zemí a sluncem a  $\Phi_z$  [°] úhel dopadu záření na hromadu.

Odpařování vody z organické hmoty je způsobené jejím zvýšením teploty. Tohle odpaření s sebou odnáší taktéž část energie, která se dá vypočítat dle rovnice 2.6. [21]

$$Q_{\text{odp}} = Q_{\text{gen}} - (\dot{m}_p \cdot L_p), \quad (2.6)$$

kde  $\dot{m}_p$  [kg·den<sup>-1</sup>] je hmotnostní průtok odpařené vody a  $L_p$  [kJ/kg] latentní teplo páry.

Ztráty energie způsobené konvekcí  $Q_{\text{konv}}$  jsou dány rozdílem celkové entalpie vzduchu mezi vstupem a výstupem kompostu.

$$Q_{\text{konv}} = \dot{m}_{v1} c_{v1} (T_{\text{povrch}} - T_0) - \dot{m}_{v2} c_{v2} (T_{\text{okolni}} - T_0) \quad (2.7)$$

$\dot{m}_{v1}$  [kg·den<sup>-1</sup>]... hmotnostní průtok vzduchu(vstup)

$\dot{m}_{v2}$  [kg·den<sup>-1</sup>]... hmotnostní průtok vzduchu(výstup)

$c_{v1}$  [kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]... měrná tepelná kapacita vzduchu (vstup)

$c_{v2}$  [kJ·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>]... měrná tepelná kapacita vzduchu (výstup)

$T_{\text{povrch}}$  [K]... absolutní teplota povrchu

$T_{\text{okolni}}$  [K]... absolutní teplota okolního vzduchu

$T_0$  [K]... absolutní průměrná teplota (cca 298 K  $\approx$  24,85 °C, [26])

Ztráty tepelné energie kondukcí  $Q_{kond}$  většinou závisí na izolaci kompostu, tedy teplo se ztrácí nejvíce po okraji celé hromady. Můžeme je vypočítat dle rovnice:

$$Q_{kond} = \alpha A (T_{povrch} - T_{okolni}), \quad (2.8)$$

kde  $\alpha$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je součinitel přestupu tepla a  $A$  [ $\text{m}^2$ ] je povrch kompostové hromady.

S povrchem kompostu a jeho teplotou taktéž souvisí tepelné ztráty radiací  $Q_{rad}$ . Pokud se zvětšuje poměr povrchu ku objemu, zvětšují se ztráty. Jejich výpočet se odvozuje ze Stefan-Boltzmannova zákona pro nedokonalý zářič. [23] Rovnice pro výpočet tepelných ztrát radiací [21]:

$$Q_{rad} = \sigma A F_e F_r (T_{povrch}^4 - T_{okolni}^4), \quad (2.9)$$

kde  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ] je Stefan-Boltzmannova konstanta,  $F_e$  [-] emisní faktor záření a  $F_r$  [-] konfigurační radiační faktor.

## 3 Dosavadní řešení bioreaktorů

Hlavním úkolem bioreaktorů je vytvoření ideálních podmínek pro kultivaci mikroorganismů. Existuje jich mnoho druhů a nejčastěji se s pojmem bioreaktor setkáváme hlavně v biotechnologickém průmyslu. V této práci bude ovšem popsán tzv. kompostovací bioreaktor s ohledem na odvedení a využití tepla z jeho vnitřní části. Jak bylo zmíněno již v části o kompostování, při rozkladu biomasy vzniká teplo produkované mikroorganismy, které v tomto případě chceme odvést a vytápět s ním například objekt v blízkosti.

### 3.1 Historie

Již před 2000 lety obyvatelé severní Číny dokázali využívat obnovitelný zdroj tepelné energie z biodegradačních procesů pro vyhřívání záhonů. Tento systém byl konstruován jako 1 m hluboký příkop plněný vrstvami hnoje a zeminy, na kterou poté vysázeli své plodiny. Tlející hnůj jim dokázal zajistit dostatek živin pro osazené rostliny a taktéž prodloužit sezónu o 1-2 měsíce. [13], [4]

Systém využití tepla z kompostování biomasy byl upraven ve Francii počátkem 17. století. Jednalo se o stejnou podstatu využití koňského hnoje, avšak záhony byly zcela zakryty skleněnou konstrukcí. Pro optimalizaci teploty uvnitř takového „skleníku“ se míchal čerstvý hnůj s uleželým, jelikož pouze čerstvý dokázal vytvořit enormně vysoké teploty pro růst rostlin. Výhoda tohoto systému byla zcela jistě v mnohem menších tepelných ztrátách, tím pádem i menší spotřeby hnoje a hlavně možnosti pěstování rostlin taktéž v zimních měsících, kdy si půda držela teplotu kolem 10-13 °C. [13]

S myšlenkou i řešením odvádění tepla z kompostu pro vytápění objektů přišel až roku 1972 Jean Pain v jeho knize *The methods of Jean Pain: Another kind of garden*. Tato kniha i její pozdější edice v první části popisují využití lokální lesní biomasy ke zpracování v kompostu k organickému hnojení v udržitelném zemědělství. V části druhé rozebírá jeho experiment na výrobu energie v kalorické formě (horká voda), kterou využívá k vytápění, nebo přímému použití, např. sprchování. Tento experiment ukázal, že 50 tunová hromada dřevní štěpky (impregnovaná vodou) dokáže ohřívat vodu z 10 °C na 60 °C o vydatnosti 4l/min po dobu 6 měsíců aniž by se do kompostu zasahovalo. To znamená vytápění 5-pokojového domu o rozloze 100 m<sup>2</sup> a ohřevu užitkové vody pro jeho obyvatele přes celou zimu. [2] Systém odběru tepla byl schopen odvádět 50,115 kJ/hod nebo 4330 kJ/kg<sub>biomasy</sub>. [13]



Obr. 3.1: Jean Pain's method – vršení biomilíře, kompresní vaky na uskladnění bioplynu vpravo [2]



Obr. 3.2: Jean Pain's method – hotový biomilíř vedle vytápěného fóliovníku [2]

## 3.2 Konstrukce kompostovacích bioreaktorů

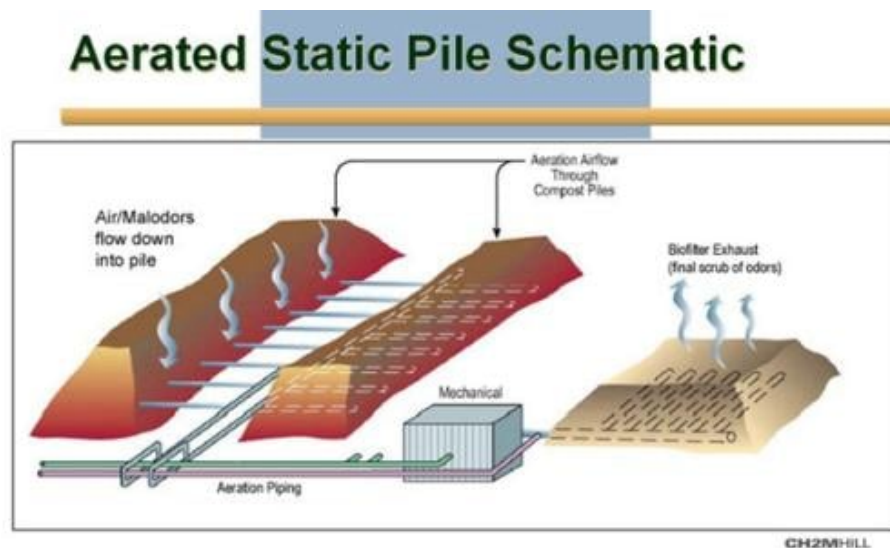
Bioreaktor může být tvořen nádobou, která je následně plněna biomasou, nebo jako tzv. biomilíř. Nádoba by měla být dobře izolována jak zvenčí kvůli tepelným ztrátám,

tak zevnitř z důvodu ochrany obalu (pokud je tvořen taktéž organickým materiálem). Na druhou stranu biomilíř je konstruován bez vnějšího obalu, má mnohem větší tepelné ztráty, ale také mnohem větší objem, který z části slouží jako vlastní izolace.

Některé realizované experimenty s konstrukcemi bioreaktorů dle [13]:

1. Výše zmíněná **Jean Painova metoda (1972)**, tedy konstrukce formou biomilíře.
2. **CHRS (Vemmelund a Bertelsen, 1979)** – systém v menším měřítku, cca 1 m<sup>3</sup>. Tento objem biomasy složené převážně z zemědělských odpadů ve formě hnojů byl umístěn ve dvoustěnné nádobě. Přičemž prostor mezi stěnami byl protékán vodou, která se ohřívala teplem z biomasy na cca 40 °C o tepelném odběru 2304 kJ/hod.
3. **BTEC concept (Schuchardt, 1984)** – systém dokázal vyhřívat skleník o rozloze 110 m<sup>2</sup> pomocí cirkulace vody 2,5 km dlouhým potrubím, které bylo z jedné části zakopáno v 197 m<sup>3</sup> biomilíři a zbylá část v půdě pod záhony. Voda kolísala mezi 30 °C a 40 °C po dobu 9 měsíců. Jádro dosahovalo teploty přes 60 °C po dobu 20 měsíců i přesto, že byl experiment předčasně ukončen z důvodu poškození výměníku sedajícím kompostem. Během daných 9 měsíců vytápění vycházel tepelný odběr na 12 222 kJ/hod, což v té době odpovídalo ušetření 3140 l palivového oleje a navíc vyprodukování 140 m<sup>3</sup> kvalitního organického hnojiva.
4. **CHRS (Viel a kolegové, 1987)** – bioreaktor o objemu 100 l plněný kapalnou biomasou (čistírenským kalem s pilinami) během počátečních 50 hodin vydal max. 837 kJ/kg<sub>biomasy</sub>, což ale vzhledem ke spotřebě energie pro mixování a provzdušňování vsázky mělo zápornou účinnost.
5. **CHRS (Tucker, 2005)** – jeden z prvních komerčních velko-plošných projektů. Odhadem 544-726 tun odpadní biomasy ze zemědělství bylo zpracováno najednou do jedné hromady, která byla provzdušňována kompresorem pomocí sítě trubek zakopaných uvnitř – ASP metoda kompostování (viz obrázek č. 3.3). Teplo kondenzovalo na teplovodných trubkách (Heat pipe viz sekce 3.3.3), konkrétně na systému Isobar<sup>TM</sup>, které byly naletovány přímo do vnějšího oběhu dvouplášťové nádrže. Vnitřní nádrž měla objem 189 l a vstupní teplota vody dosahovala maximálně 7 °C, výstupní poté kolem 55 °C. Odběr tepla byl určen na 211 011 kJ/hod. Bezespornou výhodou této metody byla možná regulace procesu kompostování pomocí aerace kompresory. [27]
6. **CHRS (Brown 2014)** – Galean Brown popsal a modifikoval v jeho knize *The Compost-Powered Water Heater* Jean Painovu metodu, tak aby ji lidé dokázali co nejlépe replikovat. Výstupem jeho experimentu byl odběr tepla 10 550 kJ/hod z kompostu složeného z impregnované dřevní štěpky o objemu

31 m<sup>3</sup>. Daný odběr tepla si biomilíř udržel téměř 18 měsíců. Jako tepelný výměník sloužila 280 metrů dlouhá polyethylenový trubka rozložená do sedmi vrstev v podobě propojených spirál. [4]



Obr. 3.3: ASP metoda kompostování [3]

### 3.3 Metody získávání tepla

Rozklad organické hmoty uvolňující teplo zahřívá okolní hmotu, vzduch a vodu. Vzduch spolu s částí odpařené vody – páry – stoupají pilřem vzhůru. To znamená, že teplo v kompostu má dvě formy: **citelné** teplo (spojené se zvýšením teploty látky) a **latentní** teplo (spojené se změnou skupenství látky, např. voda → pára). Celková energie látky, tedy citelné a latentní teplo dohromady, je charakterizována entalpií  $h$  [kJ/kg]. Vzduch „proudící“ kompostem odvádí přirozenou nebo v některých případech nucenou konvekci teplo uvolněné během kompostování. Celková entalpie se zvyšuje, díky zvyšování citelného tepla rostoucí teplotou vzduchu a latentního kvůli zvyšování vlhkosti. Množství energie obsažené ve vzduchu je poté závislé na změně entalpie ( $\Delta h$ ) a hmotnostního průtoku vzduchu ( $\dot{m}$ ), viz rovnice 3.1,

$$Q = \dot{m}\Delta h = \dot{m}(h_2 - h_1), \quad (3.1)$$

kde  $h_1$  je entalpie vzduchu, který do kompostu vstupuje (okolní vzduch) a  $h_2$  je entalpie vzduchu na výstupu z kompostu. Průměrná hodnota entalpie vzduchu na vstupu je kolem 50 kJ/kg, na výstupu cca 272 kJ/kg. Rozdílem těchto hodnot je množství energie odebrané vzduchem z kompostování, z čehož 86 % zastupuje latentní teplo, tzn. vodní pára je dominantním přenašečem tepla z procesu. [13]

Některé metody používané k odvádění tepla z biodegradačního procesu byly popsány již v sekci realizovaných experimentů výše. Zde budou popsány více detailněji.

### 3.3.1 Přímé využití tepla

Tato metoda spočívá v umístění biomilíře přímo uvnitř vytápěného objektu (nejčastěji skleníku). Není třeba izolace kompostu, ani systém odvádění tepla, vše se děje přirozeně. Při umístění ve skleníku není pro rostliny výhodná pouze následná příznivá teplota, ale taky produkce oxidu uhličitého, který je důležitý pro jejich biochemické procesy – fotosyntézu. [13]

Možná regulace tohoto systému by mohla být podobná jako u metody kompostování ASP (viz obrázek č. 3.3), a to nucenou aerací pomocí kompresoru, který by přiváděl vzduch dospod hromady.

### 3.3.2 Konduktivní odběr tepla

Metoda odvádění tepla z biomilíře, kterou jako první popsal Jean Pain ve své knize *The methods of Jean Pain: Another kind of garden*. Často jde o stovky metrů trubky smotané do tvaru válce jako lze vidět na obrázku č. 3.4. Voda v takovém výměníku je ohřívána citelným teplem předaným kondukcí (vedením) z rozkládající se biomasy a je možné ji využít cyklicky pro přímé vytápění (pomocí radiátoru) nebo průtokově pro přímé užití (sprchování, umývání nádobí). [2], [4], [13]



Obr. 3.4: Kondukční tepelný výměník z polyethylenové trubky [4]

### 3.3.3 Kondenzační odběr tepla

Jak bylo zmíněno v úvodu této sekce (3.3), celková entalpie vzduchu na výstupu z kompostu je tvořena z 86 % latentním teplem a ze 14 % citelným teplem. Aby bylo možné odchytnout co největší část tepelné energie, používá se kondenzační výměník (viz obrázek č. 3.5). Ten, jak již z jeho názvu vyplývá, funguje na principu kondenzace vodní páry, která proudí vzhůru kompostem. Mimo to dokáže částečně odvést teplo

i kondukcí. Podobně jako kondukční výměník je kondenzační nejčastěji realizován pomocí polyetylenové trubky. [4], [5], [13]



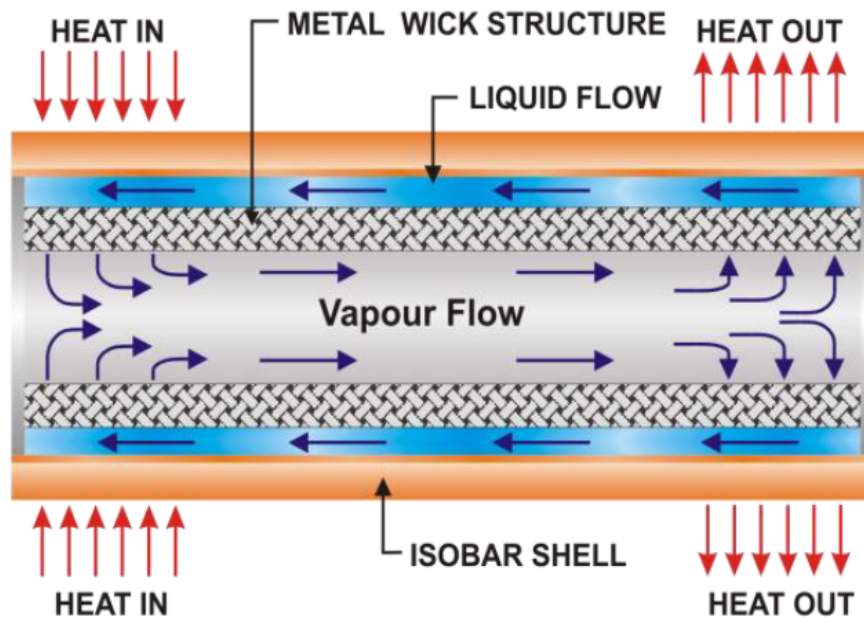
Obr. 3.5: Kondenzační tepelný výměník z polyetylenové trubky [5]

Dalším efektivnějším způsobem fungujícím na principu kondenzace vodní páry, zmíněným již v experimentu CHRS (Tucker, 2005) výše, je odběr tepla pomocí teplovodných trubek tzv. heat pipes.

### **Teplovodná trubka – Heat pipe**

Princip teplovodných trubek pochází z funkce smyčkového termosyfonu. Termosyfon je vakuová trubice s velmi malým množstvím tekutiny (vody nebo např. efektivnějším acetone). Při zahřívání jednoho konce trubice se tekutina zahřívá, odpařuje a putuje ke chladnějšímu konci, kde předá latentní teplo – kondenzuje – a jako kondenzát se vrací zpět. Termosyfon ovšem může fungovat pouze ve vertikální poloze, oblast výparníku musí být níže než kondenzátor. [6]

Heat pipe má v základu princip stejný, ale navíc oproti termosyfonu využívá kapilárního vztlínání tekutiny v kovovém knotu (drátěnce) umístěného uvnitř úzké vakuové trubice. Díky tomu si dokáže teplovodná trubka udržet funkci v jakékoli poloze. Na obrázku č. 3.6 je možné vidět schéma principu teplovodné trubky Isobar<sup>TM</sup>. [6]



Obr. 3.6: Princip funkce heat pipe Isobar™ od firmy Acrolab [6]

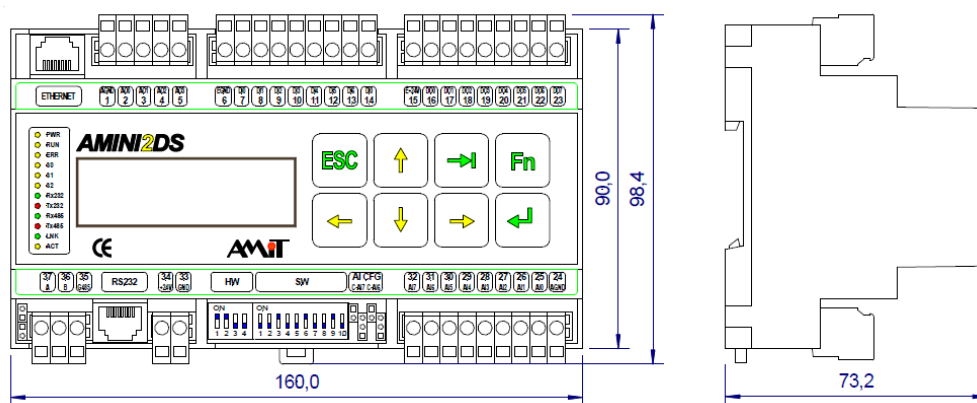
## 4 Řídicí systém

Ve většině menších experimentů s odebráním tepla z kompostování řídicí systém nebývá použit. Často se jedná jen o použití analogových teploměrů, nebo digitálních s „loggerem“ hodnot. Pokud ovšem chceme proces nějakým způsobem regulovat, je použití řídicího systému na místě. Jeho využití v oblasti kompostování je všestranné, od zaznamenávání teploty, až po regulaci aerace, vlhkosti apod.

### 4.1 AMiNi2DS

AMiNi2DS je malý kompaktní řídicí systém uložený v plastovém krytu. Výraznou část přední strany tvoří podsvícený LCD displej a 8 ovládacích tlačítek. Jeho podobu je možno vidět na obrázku č. 4.1. Základní vlastnosti tohoto systému jsou [7]:

- 8 galvanicky oddělených číslicových vstupů
- 8 galvanicky oddělených číslicových výstupů
- 8 analogových vstupů
  - 6 × Ni1000 / Pt1000
  - 2 × U / I / Ni1000 / Pt1000
- 4 analogové výstupy
- Sériové rozhraní RS232
- Sériové rozhraní RS485 s galvanickým oddělením
- Rozhraní Ethernet 10 Mbps
- Montáž na lištu DIN 35 mm
- Grafický černobílý LCD 122 × 32 bodů
- 8 tlačítek



Obr. 4.1: Řídicí systém AMiNi2DS od firmy AMiT, spol. s. r. o. [7]

AMiNi2DS je kompatibilní s vývojovým prostředím DetStudio, ve kterém je možno systém programovat. Propojení stanice s PC je realizováno skrze rozhraní Ethernet, sériové rozhraní RS232, nebo RS485 s galvanickým oddělením.

## 4.2 Teplotní snímače

Typy teplotních snímačů kompatibilních s tímto řídicím systémem jsou Ni1000 a Pt1000. Jedná se o odporové snímače, které lze využít ke kontaktnímu měření teploty pevných látek, kapalin i plynů. Skládají se z nerezového pouzdra, čidla teploty uvnitř a přívodního kabelu. Výhodou je poměrně velký rozsah měřených teplot a to obvykle  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Fungují na principu změny odporu kovu při změně teploty. Označení Pt1000 značí, že se jedná o platinový teploměr a číslo udává hodnotu odporu při  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [28]

## 5 Realizace bioreaktoru – prototyp č.1

S přípravou bioreaktoru bylo nutné začít co nejdříve tzn. ihned na podzim po zadání semestrální práce, jelikož je to ideální doba pro dostupnost odpadní biomasy v daném místě bioreaktoru.

### 5.1 Chronologie prací na bioreaktoru

Pro lepší přehlednost a představu uvádím jednotlivé práce uskutečněné na bioreaktoru v následujícím seznamu.

- 16. 10. 2020** Seznámení s původním bioreaktorem a možnostmi pozemku.
- 17. 10. 2020** Analýza původního bioreaktoru, počátek vyprazdňování, odpojení výměníku.
- 22. 10. .2020** Vyprazdňování bioreaktoru, oprava a vyspádování dna, vytvoření spodních ventilačních průduchů.
- 23. 10. .2020** Vytvoření nosné mříže bioreaktoru, přidání obalové vrstvy, první plnění hrubší biomasou.
- 28. 10. 2020** Vrstvení obalu, plnění biomasou.
- 03. 11. 2020** Vrstvení obalu, plnění biomasou, počátek měření.
- 05. 11. 2020** Vrstvení obalu, plnění biomasou.
- 10. 11. 2020** Vrstvení obalu, plnění biomasou.
- 12. 11. 2020** Vrstvení obalu, plnění biomasou, instalace a izolace výměníku.
- 30. 11. 2020** Doplnění biomasou, nová izolace výměníku, zavlažení.

### 5.2 Původní bioreaktor

Původní bioreaktor se nacházel na severně-západní straně objektu – jurty, kterou měl zásobovat teplou vodou. Jak lze vidět na obrázku č. 5.1, byl z části zastřešen přesahující krytinou z vedlejšího objektu. Tomu odpovídal i stav biomasy vevnitř bioreaktoru – nezastřešená část byla mnohem více „vyhořená“, rozložená.

Na povrchu bioreaktoru se nacházel nerozložený organický materiál, nejspíše přidáný během letních měsíců. Dále vidíme, že některé desky tvořící obvodní stěny bioreaktoru mají popraskané spojovací kolíky a tudíž nedrží „kruhový tvar“. V okrajové části obsahu byla vložena teplotní čidla a heatpipe<sup>1</sup> s nerezovým obalem, ale již nevyzařovala téměř žádné citelné teplo.

<sup>1</sup>Teplovodná trubka. Popis principu v části č.3.3.3



Obr. 5.1: Původní stav bioreaktoru

### 5.2.1 Vyprazdňování a oprava částí

Před realizací nového bioreaktoru bylo samozřejmě zapotřebí vyprázdnit ten původní. Jednalo se o cca 2,5 m<sup>3</sup> biomasy. Ta se vytrídila z 40 % na kompost, který se použil na hnojení záhonů na pozemku, a 60 % na nerozloženou biomasu, která se s výhodou použije při plnění nového bioreaktoru. Po odebrání vrchní vrstvy biomasy se obnažil původní výměník viz obrázek 5.2. Z jeho stavu byla zjevně vidět deformace pod tíhou „sedajícího“ kompostu. Výměník použitý v původním bioreaktoru se skládal ze 100 m polyetylenové trubky stočené do spirály o průměru cca 2,2 m. Aby se spirála samovolně nerozmotala byla vrstva trubky přidrátována na dřevěný kříž. Jakmile byl bioreaktor vyprázdněn, začalo se s opravou dnové části. U dna bioreaktoru je třeba dbát na správné spádování povrchu pro zajištění odtoku přebytečné vody doprostřed, odkud vede zakopaná odtoková hadice s vývodem do domovní ČOV, a kvalitní izolaci. Spádování dna původního reaktoru bylo vyřešeno vystláním slámou a dřevěnými deskami viz obrázek 5.3. Do části výstelky v průběhu roka zatékalo, a to se značně projevilo na jejím rozkladu. Tato část se vyměnila za slámu novou. Aby došlo k zamezení průtoku vody do výstelky byly k izolaci dna použity gumové pásy překládané přes sebe.



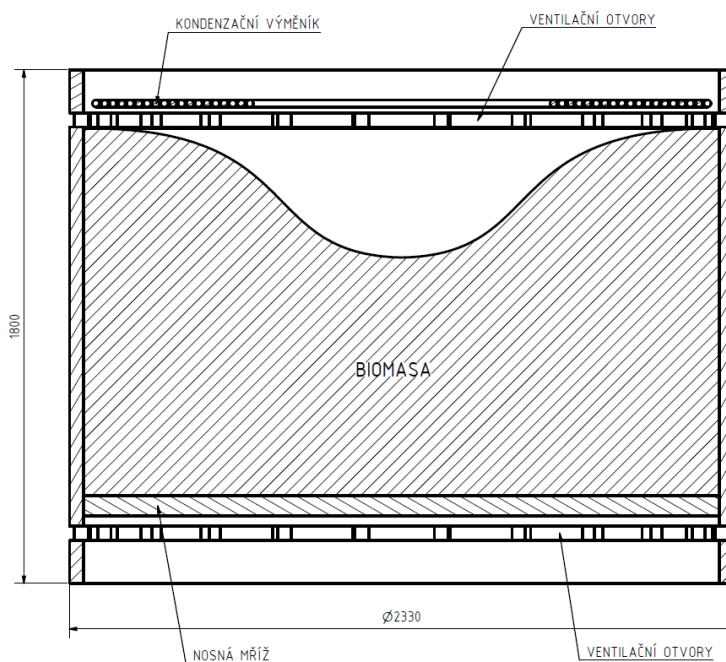
Obr. 5.2: Nálezový stav výměníku původního bioreaktoru



Obr. 5.3: Opravené vyspádované dno bioreaktoru

## 5.3 Realizace nových úprav

Hlavní podstatou nového bioreaktoru bylo, abychom co nejvíce materiálu z předšlého reaktoru recyklovali a nebo popřípadě použili nové, co nejudržitelnějším způsobem a s ohledem na přírodu. Náměty na konstrukci se postupem vršení biomasy měnily, ale podstata zůstala podobná. Na obrázku č.5.4 můžete vidět řez výsledným bioreaktorem a umístění jednotlivých částí, které budou následně detailněji popsány.

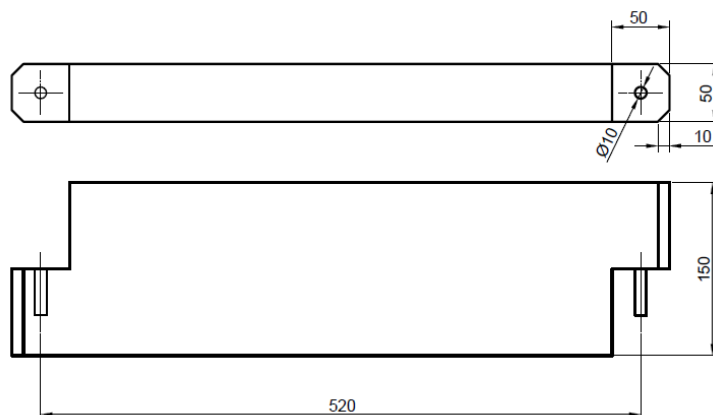


Obr. 5.4: Řez bioreaktorem – prototyp č.1

Na obrázku č.5.5 řezané dřevěné desky, které tvoří vnější obal celého bioreaktoru. Ty jsou mezi sebou propojeny dřevěnými kolíky o průměru 10 mm. Dohromady jsou sestaveny do tvaru mnohoúhelníku o 14 stranách (deskách). Takto sestavené vrstvy se naskládají na sebe a vytvoří „válec“ o průměru 2,33 m a výšce 1,8 m včetně ventilačních průduchů, z čehož prostor pro vsázku biomasy měří na výšce 1,4 m. To znamená, že tento bioreaktor je schopný pojmout cca 5,1 m<sup>3</sup>. Jedinečnost této konstrukce spočívá v použití materiálů jen z obnovitelných zdrojů – dřeva, jednoduchosti a variabilnosti. Je možno sestavit obal dle možností v libovolné velikosti.

### 5.3.1 Aerace

Jedním ze základů kopmostovacího procesu je vysoká koncentrace kyslíku v bioreaktoru. Proto je důležitá řádná ventilace. V novém bioreaktoru bylo učiněno pár experimentálních ventilačních technik.



Obr. 5.5: Výkres jedné dřevěné desky obalové vrstvy

Jak můžete vidět na obrázku 5.4, ventilační průduchy jsou tvořeny jednoduše vložením krychlových odřezků o délce strany 50 mm z přípravy desek na obal bioreaktoru mezi vrstvy 1-2 a 10-11 (zespodu).

Vertikální ventilace skrze reaktor je zajištěna prstencovým vrstvením biomasy, tzn. uprostřed vzniká sloupec z minimálního množství organické hmoty, která se sesypala ze stran. Počáteční myšlenkou bylo vložení dutého válce z kovového pleťva doprostřed reaktoru, avšak z pohledu udržitelnosti bylo upřednostněno použití obnovitelných zdrojů. Sesyp se eliminoval nahuštěním rozvětvených větví. Nezamezí na 100% spadání biomasy doprostřed ventilace, ale eliminují ho natolik, aby byla ventilace zajištěna. K regulaci proudění vzduchu biomasou byly použity přesahující pryžové pásy pouze ve vrchní části obalu.

### Nosná mříž

S ventilací samozřejmě souvisí dobře prodyšná mříž nesoucí celý objem bioreaktoru. Na její výrobu byly použity nařezané dřevěné větve, které se nacházely na pozemku.

Do každé z desek první vrstvy obalu se vyřezaly díry o průměru 50 mm, do těchto děr se vložily hlavní nosné tyče a na ně byly naskládány menší. Zkrátka se jednalo o napodobení struktury pavoučí sítě bez použití spojovacích materiálů.

### 5.3.2 Izolace dřevěných částí stěn

Abychom předešli rozkladu dřevěné konstrukce obalu bioreaktoru je třeba stěny izolovat od biomasy uvnitř. Tím docílíme mnohem delší životnosti celého reaktoru. K izolaci dřevěných částí nám posloužily gumové pásy z čisté přírodní pryže použité již v původním bioreaktoru.

## 5.4 Plnění biomasou

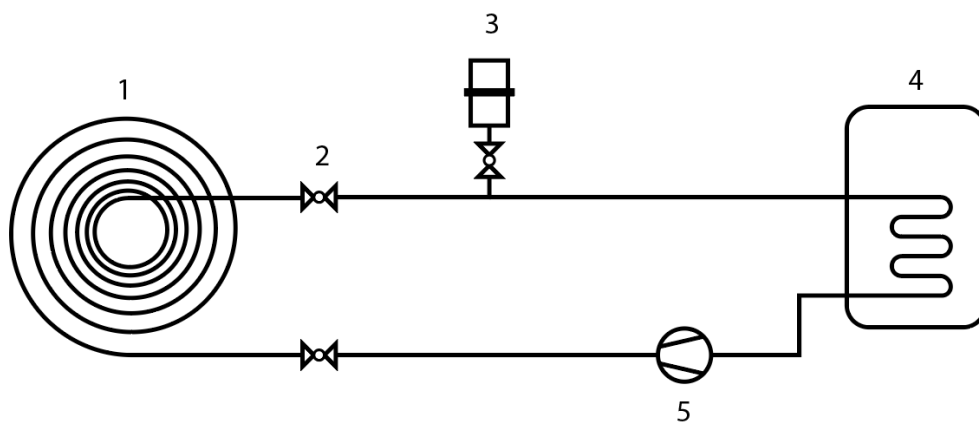
Biomasy k naplnění bioreaktoru bylo dostatek i lokálně. Použil se veškerý organický odpad, který byl nalezen na zahradě pana vedoucího i jeho sousedů, avšak s důrazem na dodržení ideálního poměru C:N (uhlíkaté složky ku dusíkatým) viz sekce č.2.3.1. Zástupcem uhlíku bylo v našem případě nejčastěji spadané listí a dřevěná štěpka. Tím dusíkatým byl biologický odpad z kuchyně, čerstvě posečená tráva, nebo například čistírenský kal z domovní ČOV. Vršení probíhalo postupně a trvalo 16 dní. Během toho již bioreaktor vykazoval známky citelného tepla, teplota se zvýšila z okolní na 55 °C viz obrázek č.5.9. Veškerá organická hmota uvnitř nebyla hutněna.

## 5.5 Tepelný výměník

Tepelný výměník byl ponechán stejný jako v původním bioreaktoru. Konstrukce se pouze vyrovnala po újmě způsobené „sedající“ biomasou. Po domluvě s vedoucím jsme zvolili kondenzační odběr tepla s možností doplnění biomasy pod výměník. To bylo možné díky tomu, že byl výměník umístěn na podpůrné dřevěné mříži. Přirozený úbytek objemu při degradaci organické hmoty poté vytvořil mezeru, kterou bylo možné skrze ventilační otvory postupně doplňovat. Další výhodou tohoto řešení bylo „samozavlažování“, tedy vodou odpařenou vlivem růstu uvolňování tepla z rozkladu organické hmoty, která kondenzuje při předání latentního tepla výměníku. Pohled na dovršený bioreaktor s instalovaným výměníkem můžete vidět na obrázku č.5.7. Vrchní strana výměníku se nakonec zaizolovala jemnější biomasou a následně balíky slámy. Celkem cca 30 cm izolace.

### 5.5.1 Zapojení výměníku do teplovodního okruhu objektu

Realizovaný bioreaktor se nachází těsně vedle vytápěného objektu, tím dochází k minimalizování tepelných ztrát při přenosu teplovodního média. Výměník je zapojen pomocí plastových hadic do teplovodního okruhu, který byl realizován již v minulých letech. Voda ohřátá ve výměníku bude vedena skrze vodní filtr do bojler vodním čerpadlem. Zapojení soustavy můžete vidět na obrázku č.5.6.



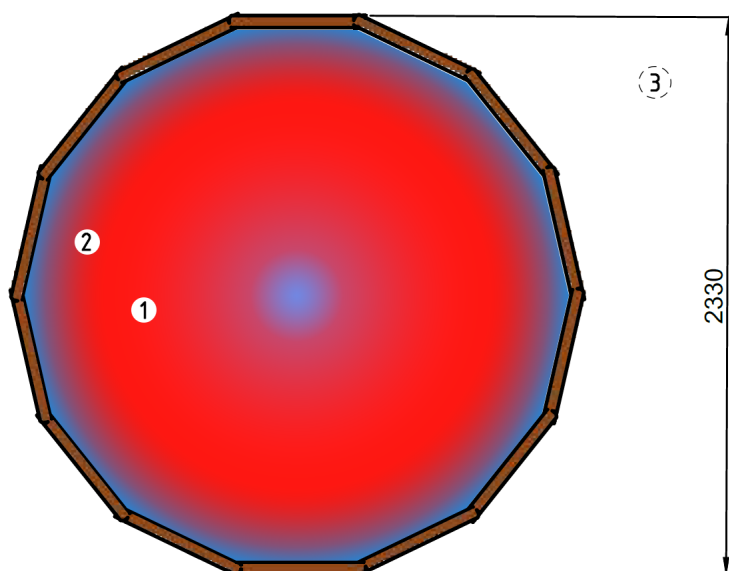
Obr. 5.6: Zjednodušené schéma zapojení teplovodního okruhu, 1 – výměník, 2 – ventil, 3 – expanzní nádoba, 4 – bojler, 5 – čerpadlo



Obr. 5.7: Dovršený bioreaktor s instalovaným kondenzačním výměníkem

## 5.6 Implementace měření

K měření teplot byly využity dva zapichovací (cca 1 m dlouhé) odporové snímače Ni1000 a již zaběhlý centrální systém AMiNi2DS v jurtě pana vedoucího. Umístění čidel v bioreaktoru jsme volili pod výměníkem poměrně blízko u sebe k ověření naměřených hodnot, viz obrázek č. 5.8.

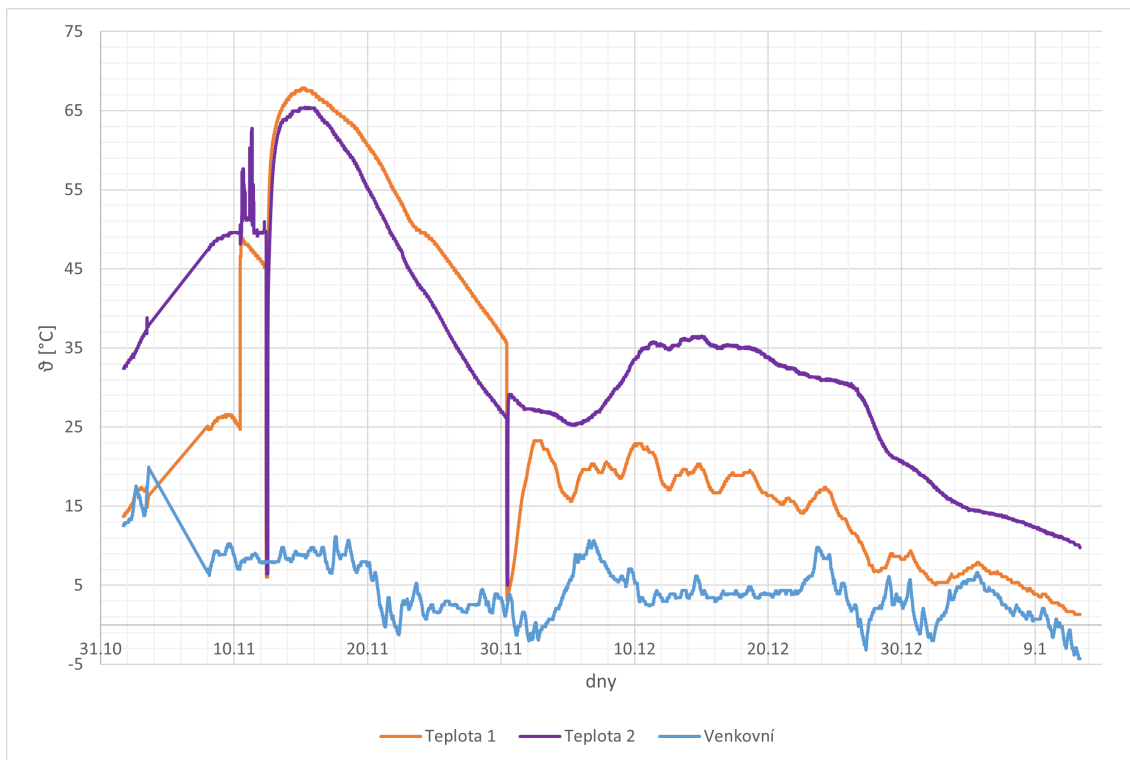


Obr. 5.8: Umístění čidel v bioreaktoru – prototypu č.1, 1 – teplota 1, 2 – teplota 2, 3 – venkovní

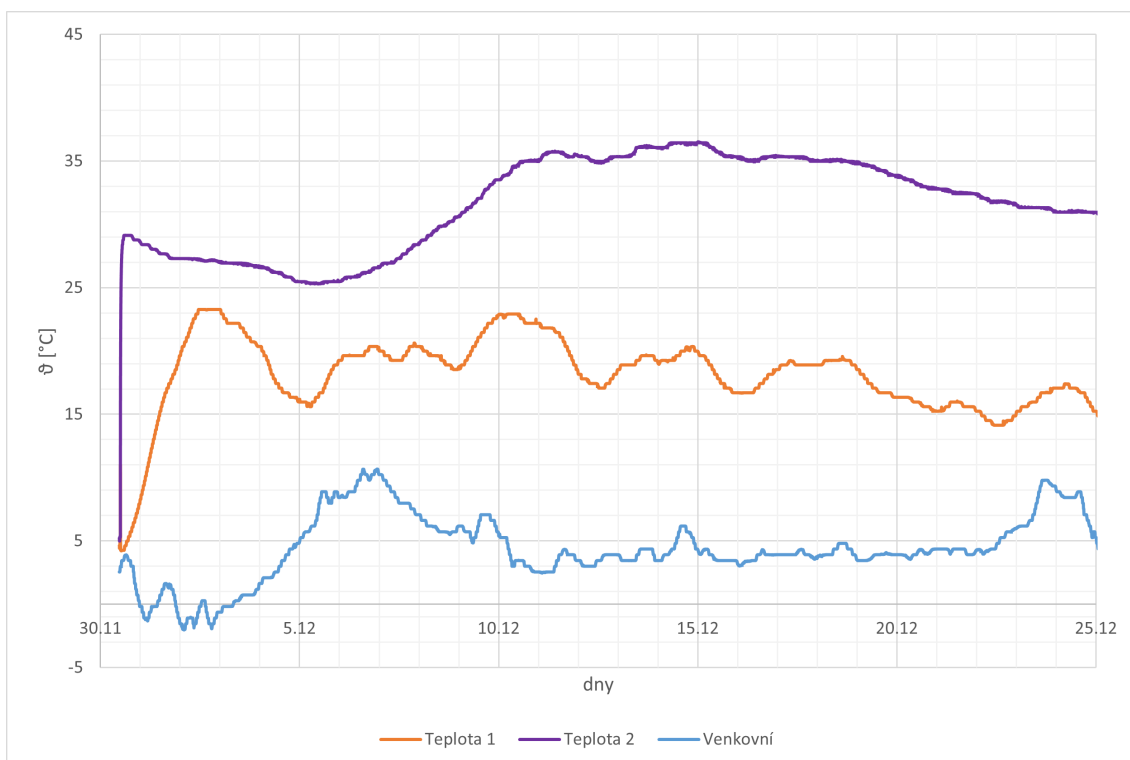
## 5.7 Výsledky měření

Naměřené hodnoty teplot v závislosti na čase jsou vyneseny do grafu na obrázku č.5.9. Doba měření použitého v této práci trvala od 3. 11. 2020 do 12. 1. 2021, poté teplota v bioreaktoru pomalu klesala téměř na teplotu okolní. Některé z nepřesností vynesných průběhů teplot vznikaly nejčastěji „přepicháváním“ čidel z důvodu doplnění biomasy, zavlažení apod.

Z naměřených hodnot lze v rámci procesu kompostování rozeznat jeho jednotlivé fáze. Mezofilní fáze (do 45 °C) trvala od počátku měření cca 5-6 dní, poté proces přešel do fáze termofilní, která vydržela 16 dní. V této fázi teploty dosahovaly hodnot 45 °C-68 °C při průměrné okolní teplotě okolo 8 °C. V závislosti na objemu použité biomasy se jedná o běžné hodnoty a taky délku termofilní fáze ve srovnání s předšlými experimenty, např. [5], [23].



Obr. 5.9: Průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.1



Obr. 5.10: Přiblížení průběhů teplot v bioreaktoru – prototypu č.1 – po zavlažení

Dne 30. 11. 2020 bylo uskutečněno experimentální zavlažení (kolem 100l vody o teplotě 5 °C), za účelem podpoření biodegradačních procesů. Tento úkon je možno vidět na obrázku č.5.10 zastoupeným rapidním poklesem teploty na obou čidlech v daném čase. Po cca 6 dnech ovšem kompost zareagoval zvýšením teploty z 26 °C na téměř 38 °C viz „Teplota 2“.

Měření teploty vody ve výměníku a jeho spuštění se bohužel neuskutečnilo z důvodu chybějícího čidla. Aby však bylo známo, zda se teplo k výměníku dostalo, byl od 30. 11. 2020 přemístěn odporový snímač s označením „Teplota 1“ (viz obrázek č.5.10) na vrchní stranu výměníku pod 30 cm vysokou slaměnou izolací. Měření ukázalo, že i při venkovních teplotách kolem 5 °C izolace výměníku relativně fungovala. Rozdíl mezi „Teplota 2“ (uvnitř biomasy) a „Teplota 1“ byl v době po zvýšení teploty zavlažením průměrně 17 °C. Nejvíce tepelné energie nejspíše unikalo pomocí nadměrné aerace, i když byly uzavřeny vrchní ventilační otvory. Kolísání „Teploty 1“ na výměníku na obrázku č.5.10 mohlo být způsobeno rozkladem jemnější biomasy (velmi bohaté na dusíkaté složky) spolu se slaměnou izolací.

### 5.7.1 Výsledky teoretického výpočtu tepelné bilance bioreaktoru

Pro výpočet všech druhů tepelných ztrát v rámci tepelné bilance bohužel nebylo dostatek validních hodnot, proto se jednotlivé ztráty vynesly v součtu do ztrát celkových  $Q_{zcelk}$ . Výpočet počítal s odhadnutou 40 % vlhkostí kompostované biomasy a byl proveden pomocí vytvořeného programu v Excelu (příloha B), který vychází z teoretické sekce č.2.4. Jelikož je kompostovací proces velmi nestabilní a komplexní, výsledné hodnoty jsou pouze teoretické a mohou se lišit reálných. Pro přehled vstupních proměnných byla vytvořena tabulka č5.1.

Energie potřebná pro ohřátí biomasy ( $m = 3315 \text{ kg}$ ,  $c_b = 2,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) z 35 °C na 68 °C je  $Q = 253199,7 \text{ kJ}$ . Pokud vezmeme v potaz, že interval ohřívání biomasy v daném rozmezí teplot byl 14 dní (3. 11. - 17. 11.), výkon odpovídá  $P = 0,209 \text{ W}$ . Teplo generované biodegradačními procesy v celém bioreaktoru bylo vypočteno dle rovnice 2.2 a vychází  $Q_{gen} = 6844,81 \text{ MJ}\cdot\text{den}^{-1}$ , generovaný výkon poté odpovídá  $P = 79,22 \text{ W}$ . Průměrné teplo přijaté ze slunečního záření je během intervalu  $Q_{solar} = 487,94 \text{ MJ}\cdot\text{den}^{-1}$ . Z rovnice tepelné bilance 2.1 byly poté určeny celkové ztráty jako rozdíl přírůstků tepla a tepla potřebného pro ohřátí biomasy. Celkové ztráty  $Q_{zcelk} = 7314,67 \text{ MJ}$ , tzn. celkové výkonové ztráty  $P_{zcelk} = 84,66 \text{ W}$ .

Tab. 5.1: Vstupní proměnné pro výpočet tepelné bilance prototypu č.1

<b>Značka</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Zdroj</b>
$\rho$	650	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[29]
$V$	5,1	$\text{m}^3$	
$m$	3315	kg	
$h$	40	%	
$m_s$	1989	kg	
$A$	4,15	$\text{m}^2$	
$c_b$	2,01	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	[21]
$h_s$	17800	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
$K$	0,29	$\text{den}^{-1}$	[30]
$k_s$	117576	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$	[31]
$\Psi$	1	-	[21]

## 6 Realizace bioreaktoru – prototyp č.2

Po domluvě s panem vedoucím a zkušenostech z předchozích bioreaktorů padlo rozhodnutí zkonstruovat ještě jeden, větší, s jinou konstrukcí a biomasou. Díky odpadní biomase poskytnuté od Pily Bystrc bylo možné zkonstruovat biomilíř o objemu cca 8 m<sup>3</sup>. Cílem tohoto prototypu bylo prakticky vyzkoušet jiné dostupné vstupní proměnné a zaznamenat jejich vliv.

### 6.1 Chronologie prací na bioreaktoru

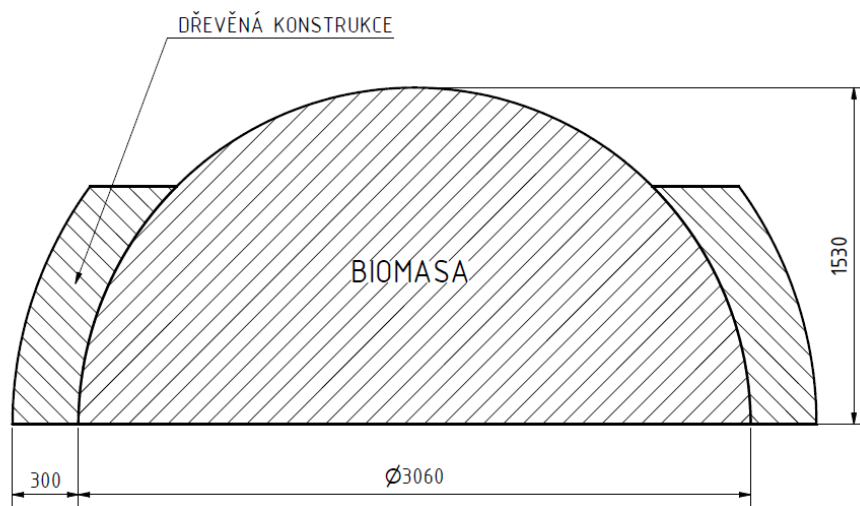
Vzhledem k dobré dostupnosti organické hmoty, jsme byli schopni navržit poměrně velké množství za krátkou dobu, viz rozpis níže.

- 17. 2. 2021** Navážení biomasy na místo biomilíře.
- 9. 3. 2021** Navážení biomasy na místo biomilíře, stavba konstrukce.
- 22. 3. 2021** Impregnace hromady vodou.
- 23. 3. 2021** Počátek měření.

### 6.2 Realizace nových úprav

Změn oproti prvnímu bioreaktoru je více, jelikož nás zajímal právě kontrast mezi prototypy. Těmi změnami jsou:

1. Nový biomilíř byl umístěn na volné ploše. Díky tomu je schopný pojmout velké množství tepla ze slunečního záření, které by mohlo udrželo teplotu uvnitř např. při nižší okolní teplotě.
2. Jako uhlíkatá složka byla zvolena dřevní kůra s poměrem C:N cca 120:1. Ta se vrstvila s koňským hnojem (reprezentantem dusíkaté složky), který má poměr C:N cca 20:1. Dohromady biomasa tvoří objem kolem 8 m<sup>3</sup> a poměr C:N cca 90:1.
3. Opěrná konstrukce bude velmi jednoduchá, tak aby ji dokázal popřípadě kdokoliv replikovat sám doma. Ke stavbě budou využity odpadní dřevěné odřezky (cca 30 cm dlouhé) naskládané přes sebe kolem kompostové hromady (viz obrázek č.6.2), které nám byly darovány s biomasou z výše jmenované pily.
4. Obal (opěrná konstrukce) musí být velmi prodyšný, jelikož nebudou realizovány žádné vertikální otvory skrze zakládku zajišťující aeraci. Předpokládali jsme, že natolik strukturovaný organický materiál jako je dřevní kůra bude i po navržení obsahovat velké množství vzduchu. Pro tuto myšlenku jsme vycházeli z poznatků z předešlých experimentů na bioreaktorech.



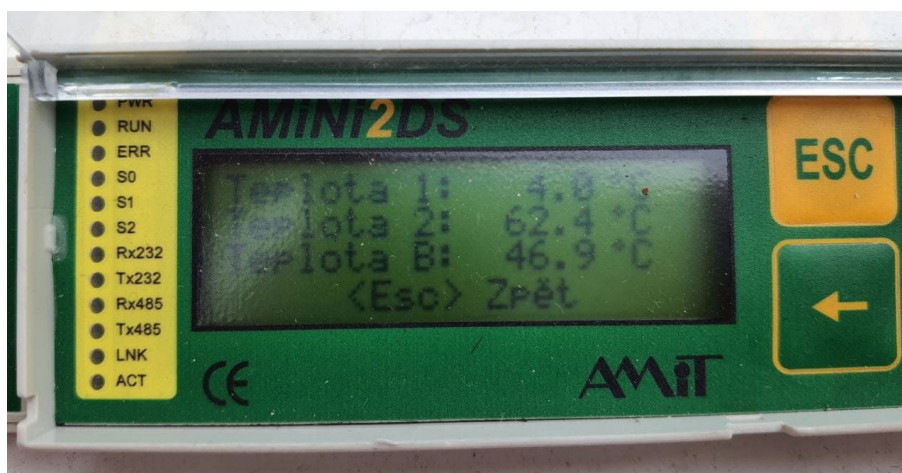
Obr. 6.1: Řez biomilířem – prototyp č.2



Obr. 6.2: Hotový biomilíř – prototyp č.2 – s měřící sestavou

## 6.3 Implementace měření

Měření teploty se realizovalo pomocí sestavy skládající se ze třech čidel Ni1000 a řídicího systému AMiNi2DS. Tato sestava byla využita již zkonstruovaná z předešlých let. V rámci programování bylo využito základního programu, který byl upraven jen pro účely na daném bioreaktoru, a to: 2x měření teploty bioreaktoru, 1x měření okolní teploty a archivace teplot. Program naleznete v příloze E.



Obr. 6.3: Pohled na obrazovku AMiNi2DS v průběhu měření, Teplota 1 odpovídá „venkovní“, Teplota 2 – „Bioreaktor JIH“ a Teplota B – „Bioreaktor ZÁPAD“

První snímač (v průběhu na obrázku č.6.4 označení „Bioreaktor JIH“) byl umístěn z jižní strany co nejbližší ke středu hromady. Druhý snímač „Bioreaktor ZÁPAD“ se nacházel v okrajové části na západní straně.

## 6.4 Výsledky měření

Průběhy naměřených teplot lze vidět na obrázku č.6.4. Doba vyneseního průběhu je 56 dní (od 23. 3. do 18. 5.), z toho počáteční mezofilní fáze trvala 16 dní a termofilní 21 dní. Maximální naměřená teplota v termofilní fázi byla 62,47 °C při okolní teplotě 3,4 °C. Viditelný skok ze dne 12. 4. byl způsoben přemístěním čidla. Jelikož jdou oba průběhy z počátku paralelně, je možné odvodit, že by střed bioreaktoru dosáhl maximální teploty kolem 65 °C dne 18. 4. .

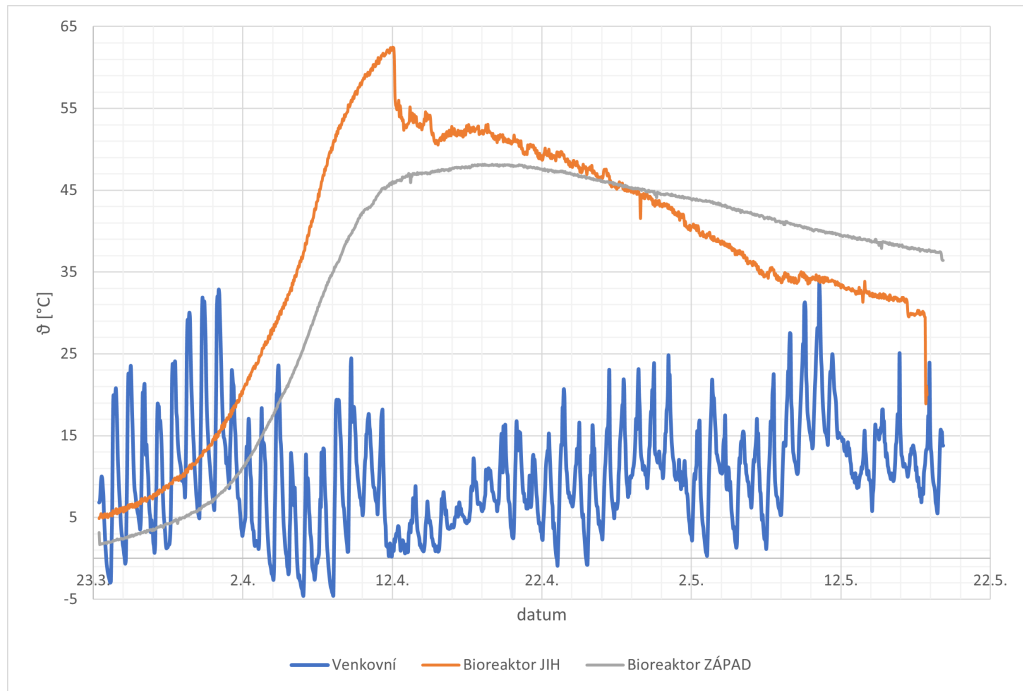
Rychlý pokles teploty na snímači „Bioreaktor JIH“) mohl být způsoben tím, že se čidlo přemísťovalo vyhloubením otvoru do hromady a následně se teplo z daného místa bylo schopné odvádět rychleji. Průběh teploty „Bioreaktor ZÁPAD“) dosáhl sice maximálně 47 °C, ale jelikož čidlo zůstalo po čas celého měření na stejném místě je výsledný průběh mnohem spojitější.

Detail na rozdíl mezi teplotami blíže ke středu a v okrajové části bioreaktoru je vyneseno v grafu na obrázku č.6.5. Nárůst teploty v bioreaktoru je z počátku takřka exponenciální a rozdíl mezi teplotami na čidlech stoupá téměř lineárně. Na pokles vyneseno rozdílu má značný vliv pokles okolní teploty. Pokud by venkovní teplota byla volatilní mezi stejnými hodnotami, je možné, že by rozdíl teplot více odpovídal lineárnímu proložení (viz černá lineární spojnice trendu na obrázku č.6.5).

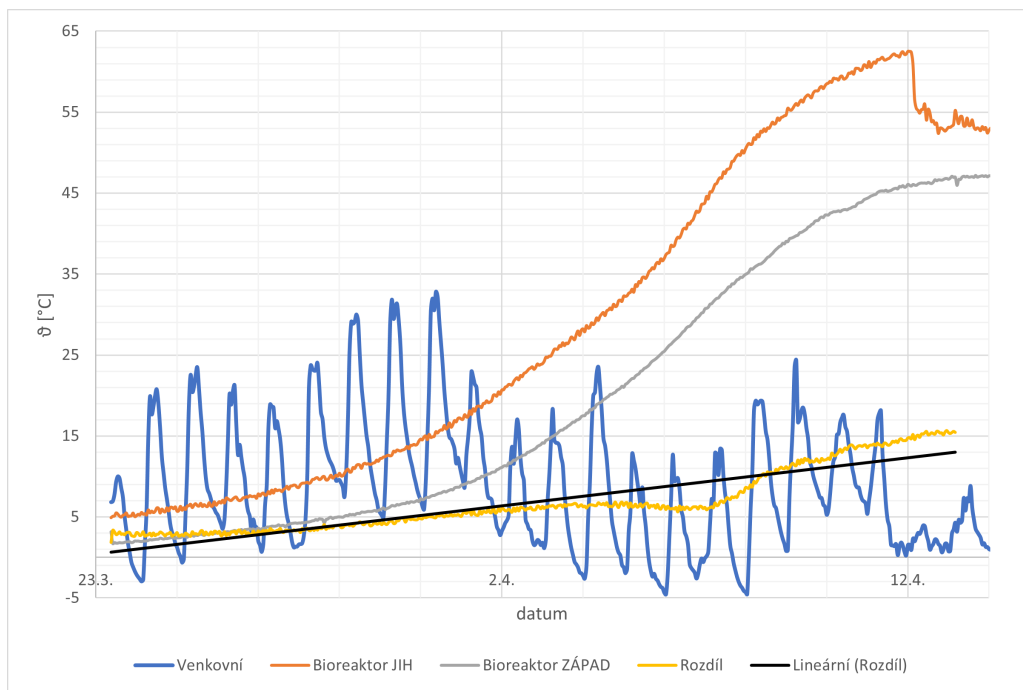
### 6.4.1 Výsledky teoretického výpočtu tepelné bilance bioreaktoru

Výpočet tepelné bilance bioreaktoru (prototypu č.2) byl proveden stejně jako v rámci prvního prototypu v programu Excel a vycházel taktéž z odhadnuté 40% vlhkosti kompostované organické hmoty. Hustota použité biomasy byla odvozena od hustoty volně ložené mulčovací kůry tj. cca  $500 \text{ kg/m}^3$  (viz [32]). Pro přehled vstupních proměnných byla vytvořena tabulka č.6.1.

Aby bylo možné porovnat výsledky výpočtů jednotlivých prototypů, byl pro výpočet celkového tepla potřebného k ohřátí biomasy zvolen interval teplot od  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  do  $62,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Tento teplotní interval v prototypu č.2 trval 8 dní (4. 4. -12. 4.). Výsledné teplo vychází  $Q = 261,30 \text{ MJ}$ , což za daný časový interval odpovídá  $P = 0,378 \text{ W}$ . Teplo generované biodegradačními procesy v celém bioreaktoru bylo vypočteno opět dle rovnice 2.2 a vychází  $Q_{\text{gen}} = 8259,20 \text{ MJ}\cdot\text{den}^{-1}$ , generovaný výkon poté odpovídá  $P = 95,59 \text{ W}$ . Teplo přijaté ze slunečního záření je během časového intervalu vychází  $Q_{\text{solar}} = 1728,37 \text{ MJ}\cdot\text{den}^{-1}$ . Z rovnice tepelné bilance 2.1 byly stejně jako v případě prototypu č.1 určeny celkové ztráty jako rozdíl přírůstků tepla a tepla potřebného pro ohřátí biomasy. Celkové tepelné ztráty odpovídají  $Q_{\text{zcelk}} = 9954,90 \text{ MJ}$ , tzn. celkové výkonové ztráty  $P_{\text{zcelk}} = 115,22 \text{ W}$ .



Obr. 6.4: Průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.2



Obr. 6.5: Přibližné průběhy teplot v bioreaktoru – prototypu č.2 – s proložením rozdílem „Bioreaktor JIH“ a „Bioreaktor ZÁPAD“

Tab. 6.1: Vstupní proměnné pro výpočet tepelné bilance prototypu č.2

<b>Značka</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Zdroj</b>
$\rho$	500	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	[32]
$V$	8	$\text{m}^3$	
$m$	4000	kg	
$h$	40	%	
$m_s$	2400	kg	
$A$	14,70	$\text{m}^2$	
$c_b$	2,01	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	[21]
$h_s$	17800	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	[24]
$K$	0,29	$\text{den}^{-1}$	[30]
$k_s$	117576	$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{den}^{-1}$	[31]
$\Psi$	1	-	[21]

## 7 Vyhodnocení prototypů bioreaktorů

Bylo ověřeno, že oba realizované prototypy generují tepelnou energii, kterou je možné odebrat. Tepelný kondenzační výměník byl nainstalován do prototypu č.1, ale nebylo možné naměřit potřebná data k vyčíslení odebraného tepla. Avšak v rámci měření na výměníku byla změřena teplota jeho povrchu, která při teplotě „jádra“ cca 35 °C dosahovala maximální teploty kolem 22 °C (teplota okolí prototypu byla kolem 2,5 °C). Rozdíl těchto teplot byl způsoben únikem tepla skrze ventilační otvory pod výměníkem a mezerou vzniklou „sedající“ biomasou. I přesto, že se experiment nevydařil dle očekávání, budou získané data použity v navazujících výzkumech.

Taktéž bylo ověřeno, že kultivaci mikroorganismů a bakterií je možné i v druhé mezofilní fázi opět podpořit zvýšením vlhkosti biomasy. Výsledkem byl nárůst teploty uvnitř bioreaktoru o 12 °C.

Dle srovnávací tabulky č.7.1 lze usoudit, že objemově větší bioreaktor dle teoretického výpočtu generoval o cca 17 % více tepla než první prototyp a jeho termofilní fáze vydržela o 5 dní déle.

Tab. 7.1: Srovnání jednotlivých realizovaných prototypů

	<b>Prototyp č.1</b>	<b>Prototyp č.2</b>
objem biomasy [m <sup>3</sup> ]	5,1	8
druh biomasy	zahradní (listí, tráva, bioodpad)	dřevěná kůra, koňský hnůj
konstrukce obalu	dřevěná obruč (neprodyšná)	dřevěné desky (prodyšná)
izolace dna, víka	dřevo, sláma	žádná
izolace obalu	dřevo, gumové pláty	žádná
aerace	vertikální tunel z nezhutněné biomasy	žádná
$n_{\text{mezo}}$ [dny]	13	16
$n_{\text{termo}}$ [dny]	16	21
$t_{\text{m,max}}$ [°C]	68,00	62,70
$t_{\text{m,avg}}$ [°C]	55,76	51,12
$t_{\text{m,avg,amb}}$ [°C]	6,48	8,52
$Q_{\text{gen}}$ [MJ·den <sup>-1</sup> ]	6844,81	8259,20
$P_{\text{gen}}$ [W]	79,22	95,59
$Q_{\text{zcelk}}$ [MJ·den <sup>-1</sup> ]	7314,67	9954,90
$P_{\text{zcelk}}$ [W]	84,66	115,22

Bioreaktor (prototyp č.2) s větším obsahem uhlíkatých složek než dusíkatých má delší „rozběhovou“ mezofilní fázi oproti opačnému případu, ale má poté také delší

termofilní fázi, která je z hlediska energetiky důležitější. Jelikož byl biomilř umístěn na volném prostranství bez jakékoliv spodní tepelné izolace, považují výsledky měření za velmi dobré. Z rozdílů obou prototypů je možné vyvodit, že i když u prototypu č.2 nebyla realizována vertikální aerace, má velmi dobré výsledky.

Vzhledem k velkým vypočteným tepelným ztrátám z tepelné bilance je zřejmé, že izolace bioreaktoru je velmi důležitým faktorem pro celý proces. Důkladná izolace by však znamenala mnohem složitější konstrukci, která by často vedla k použití jednorázových materiálů a celkově by nemusela být udržitelná.

## 7.1 Výhledové řešení a náměty k problematice bioreaktorů

Z nabytých zkušeností a po konzultaci s panem vedoucím bylo vyvozeno nové řešení bioreaktoru. Následující bioreaktor by měl mít opět co nejjednodušší opěrnou konstrukci, tak aby bylo možné vytvořit válec s větším průměrem než výškou, ideálně v poměru 3:2.

**Biomasa** by se měla skládat minimálně 30 dílů uhlíkatých složek a maximálně z 1 dílů dusíkatých, například dřevní štěpka a koňský hnůj, nebo jen dřevní štěpka impregnovaná velkým množstvím vody. Mělo by se dbát na ideální **vlhkost** biomasy, a to 40 %- 60 %. Výhodou by bylo využití řídicího systému s vlhkoměrem a zavlažovací soustavou, tak by se spustila pokud by vlhkost klesla pod kritickou mez.

**Tepelný výměník** by přijímal teplo kondukci. Ovšem nebyl by ve formě smotané polyetylenové trubky, ale jako nerezová nádoba tepelně izolovaná od země ve tvaru vejce, z důvodu vyšší odolnosti při vertikálním zatížení než například tvar kvádru (výhodou vejčitého tvaru je taktéž minimální odpor při přirozené cirkulaci vody související s rozdíly teplot [33]). Tímto řešením by se taktéž vyvarovalo běžné deformaci výměníku, kterou můžete vidět například na obrázku č.5.2. Vejčitá nádoba by mohla také sloužit jako akumulární zdroj tepelné energie při poklesu okolních teplot, tím by se zamezilo možnému zpomalení biodegradačních procesů.

# Závěr

Tato práce se zabývala tepelnou energií generovanou při rozkladu biomasy. Hlavním cílem bylo zkonstruování funkčního prototypu bioreaktoru na základě poznatků vzešlých z předešlých experimentů na téma biomilíř, bioreaktor, odběr tepla z kompostovacího procesu apod.

V rámci teoretické části práce byly shrnuty základní informace ohledně biomasy, kompostování, důležitých faktorů ovlivňující daný proces, teoretických tepelných výpočtů a dosavadních řešení bioreaktorů. Dle těchto poznatků byla vyvozena budoucí konstrukce a vlastnosti realizovaných prototypů s ohledem na udržitelnost použitých materiálů a jednoduchost.

Praktická část této práce obsahuje popis dvou realizovaných funkčních prototypů a jejich výsledků. Součástí je postup prací a řešení určitých kritických vlastností jako je např. aerace, konstrukce tepelný výměník. Na konci každé kapitoly o prototypu je popsáno měření teplot a vyneseno jeho grafické zpracování spolu s výsledky teoretických výpočtů tepelné bilance v příložených Excel tabulkách (příloha A a příloha B), které jsou založeny na teoretické části o tepelné bilanci bioreaktoru.

V kapitole č.7 je provedeno vyhodnocení prototypů bioreaktorů a sepsáno výhledové řešení jejich problematiky. Z pohledu udržitelnosti se jedná o velmi atraktivní zdroj tepelné energie, ale je třeba ještě dalších experimentů, nabytí dalších poznatků, které by dokázali efektivně a ohleduplně vyřešit dosavadní nedostatky.

Popisované prototypy bioreaktorů jsou v době odevzdávání této práce stále funkční a pokračuje na nich měření. Jejich teplo momentálně slouží jako vyhřívání pro sazenice dýní a cuket k jejich optimálnímu růstu.

# Literatura

- [1] Jaak Ryckeboer, J Mergaert, K Vaes, S Klammer, Deborah De Clercq, J Coosemans, Heribert Insam, and Jean Swings. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology*, 53:349–410, 01 2003.
- [2] Ida Pain and Jean Pain. *The methods of Jean Pain*. Ancienne Imprimerie NEGRO, Villecroze, France, 7th ed. edition, 1980.
- [3] Aerated static pile composting: An introduction to asp. URL: <https://urbanwormcompany.com/~aerated-static-pile-composting-an-introduction-to-asp/>.
- [4] Gaelan Brown. *The compost-powered water heater : how to heat your water, greenhouse, or building with only compost*. The Countryman Press, Woodstock, 2014.
- [5] Jaroslav Bajko, Jan Fišer, and Miroslav Jícha. Condenser-type heat exchanger for compost heat recovery systems. *ENERGIES*, 12(8):1–15, 2019. URL: <http://hdl.handle.net/11012/180472>, doi:10.3390/en12081583.
- [6] Section l: *Isobars*. URL: <https://www.acrolab.com/wp-content/uploads/2018/08/Acrolab-Catalogue-Section-L-Isobars.pdf>.
- [7] AMiT, spol. s r.o. *AMiNi2S / AMiNi2DS - návod na obsluhu*, 03 2008.
- [8] Bruno De Wilde, Nike Mortier, and Jan Peuckert. Work package 6 managed end-of-life options. *Open-Bio: Opening bio-based markets via standards, labeling and procurement*, 2013-2016. URL: <https://www.biobasedeconomy.eu/app/uploads/sites/2/2017/07/centralized-composting.pdf>.
- [9] Petr Dostálek. *Česká biozahrada*. Fontána, Olomouc, 2000.
- [10] Amrit Meena, Minakshi Karwal, Debashis Dutta, and Rajan Mishra. Composting: Phases and factors responsible for efficient and improved composting. *AGRICULTURE & FOOD*, 01 2021. doi:10.13140/RG.2.2.13546.95689.
- [11] Edouard Walther, Renaud Ferrier, Rachid Bennacer, Sa De, and Eloise Thierry. Heat recovery in compost piles for building applications. *Thermal Science*, 21(2):775–784, 2017. URL: <http://www.doiserbia.nb.rs/Article.aspx?ID=0354-98361600299W>, doi:10.2298/TSCI160411299W.

- [12] Carol L. Williams, Anju Dahiya, and Pam Porter. Chapter 1 - introduction to bioenergy and waste to energy. In Anju Dahiya, editor, *Bioenergy (Second Edition)*, pages 5–44. Academic Press, second edition edition, 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154977000014>, doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00001-4>.
- [13] Matthew Smith, John Aber, and Robert Rynk. Heat recovery from composting: A comprehensive review of system design, recovery rate, and utilization. *Compost Science & Utilization*, 25:1–12, 10 2016. doi:10.1080/1065657X.2016.1233082.
- [14] Jan Moudrý and Jana Kalinová. *Pěstování speciálních plodin*. JCU, Zemědělská fakulta, České Budějovice, 2010. URL: <http://www2.zf.jcu.cz/~moudry/skripta/>.
- [15] Jana Trnková and Alice Horáčková. Vědci varují: Spalování dřevěných pelet přispívá ke změně klimatu. URL: <https://www.avcr.cz/cs/o-nas/aktuality/Vedci-varuji-Spalovani-drevenych-pelet-prispiva-ke-zmene-klimatu/>.
- [16] Kamila Karafiátová. *Analýza moderních technologií ekologického kompostování*. Diplomová práce, Mendelova univerzita v Brně, Brno, 2010. URL: [http://is.mendelu.cz/zp/portal\\_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=37151;download\\_prace=1](http://is.mendelu.cz/zp/portal_zp.pl?prehled=vyhledavani;podrobnosti=37151;download_prace=1).
- [17] Nancy Trautman and Elaina Olynciw. Compost microorganisms. *CORNELL Composting*, 2009. URL: <http://compost.css.cornell.edu/microorg.htm>.
- [18] Jana Ambrožová Říhová. *Encyklopedie hydrobiologie*. VŠCHT Praha, Praha, 1.0 edition, 2007. URL: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_es-006/ebook.html?p=B007](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-006/ebook.html?p=B007).
- [19] Huminové látky, 2001-. URL: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Huminov%C3%A9\\_l%C3%A1tky](https://cs.wikipedia.org/wiki/Huminov%C3%A9_l%C3%A1tky).
- [20] Jaroslav Svoboda and Lada Svobodová. *Zelenina z ekozahrady*. Smart Press, Praha, 2018.
- [21] Elsayed Khater. Mathematical model of compost pile temperature prediction. *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*, 4, 01 2014. doi:10.4172/2161-0525.1000242.

- [22] N.O. Moraga, F. Corvalán, M. Escudey, A. Arias, and C.E. Zambra. Unsteady 2d coupled heat and mass transfer in porous media with biological and chemical heat generations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25-26):5841–5848, 2009. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931009004530>, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.07.027.
- [23] Bára Dokoupilová. *Využití energie kompostu pro přípravu teplé vody*. Bachelor thesis, FEKT VUT v Brně, Brno, 2017. URL: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/66741/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>.
- [24] Nickolas J. Themelis. Control of heat generation during composting. *BioCycle*, 46(No. 1), 2005. URL: <https://www.biocycle.net/extracting-thermal-energy-from-composting/>.
- [25] Pavel Zemánek, Patrik Burg, Mária Kollárová, Karolina Marešová, and Petr Plíva. *Biologicky rozložitelné odpady a kompostování*. Výzkumný ústav zemědělské techniky, Praha, 2010. URL: <http://www.vuzt.cz/svt/vuzt/publ/P2010/040.PDF>.
- [26] Roger T. Haug. The practical handbook of compost engineering. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203736234/practical-handbook-compost-engineering-roger-haug>, doi:10.1201/9780203736234.
- [27] Molly Farrell Tucker. Extracting thermal energy from composting. *BioCycle*, 47(No. 8), 2006. URL: <https://www.biocycle.net/extracting-thermal-energy-from-composting/>.
- [28] Renata Wagnerová and Jiří Tůma. *Základy automatizace*. Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Ostrava, [2008]. URL: [http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta\\_text.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/Zaut/Skripta_text.pdf).
- [29] Zdenka Kotoulová and Jaroslav Váňa. *Příručka pro nakládání s komunálním bioodpadem*. Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 2001.
- [30] K. Das and H. M. Keener. Numerical model for the dynamic simulation of a large scale composting system. *Transactions of the ASAE*, 40(4):1179–1189, 1997. doi:10.13031/2013.21339.
- [31] Solar constant, 2001-. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_constant](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_constant).

- [32] Ceník mulčovací kůry. URL: <https://www.taormina.cz/cenik-mulcovaci-kury-10>.
- [33] The ovoid shape. URL: <https://www.vitbot.com/the-ovoid-shape>.
- [34] G. Irvine, E. R. Lamont, and B. Antizar-Ladislao. Energy from waste. *International Journal of Chemical Engineering*, 2010:1–10, 2010. URL: <http://www.hindawi.com/journals/ijce/2010/627930/>, doi:10.1155/2010/627930.
- [35] Mollierův h,x diagram vlhkého vzduchu. URL: <https://www.qpro.cz/Data/Fotografie/73-diagram1.jpg>.
- [36] A. de Guardia, C. Petiot, J.C. Benoist, and C. Druilhe. Characterization and modelling of the heat transfers in a pilot-scale reactor during composting under forced aeration. *Waste Management*, 32(6):1091–1105, 2012. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X12000049>, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.12.028>.

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

ČOV	čistírna odpadních vod
GHC	greenhouse gas – skleníkový plyn
CHRS	compost heat recovery system – systém rekuperace tepla z kompostu
BTEC	Biothermal Energy Center (Portland, Maine USA)
C	uhlíkatá složka organické hmoty
N	dusíkatá složka organické hmoty
$Q$	celkové teplo potřebné k ohřátí biomasy, [kJ]
$Q_{\text{gen}}$	teplo generované biomasou, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{solar}}$	teplo přijaté ze slunečního záření, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{zcelk}}$	celkové tepelné ztráty bioreaktoru, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{odp}}$	tepelné ztráty bioreaktoru odpařením vlhkosti z biomasy, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{konv}}$	tepelné ztráty bioreaktoru konvekcí, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{kond}}$	tepelné ztráty bioreaktoru kondukcí, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{rad}}$	tepelné ztráty bioreaktoru radiací, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$Q_{\text{odv}}$	teplo odvedené z bioreaktoru výměníkem, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$P_{\text{gen}}$	výkon generovaný biomasou, [W]
$P_{\text{solar}}$	výkon přijatý ze slunečního záření, [W]
$P_{\text{zcelk}}$	celkové výkonové ztráty bioreaktoru, [W]
$P$	celkový výkon potřebný k ohřátí biomasy, [W]
$h_s$	energie uvolněná spalováním suché biomasy, [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
$m_s$	hmotnost suché biomasy, [kg]
$m$	hmotnost čerstvé biomasy, [kg]
$K$	míra rychlosti rozkladu o lokální teplotě a vlhkost, [-]
$h$	procentuální vlhkost kompostované biomasy, [%]

$\Psi$	koeficient „čistoty“ slunečního záření, [-]
$k_s$	solární konstanta, [kJ·den <sup>-1</sup> ]
$D$	vzdálenost mezi Zemí a sluncem, [km]
$D_0$	střední vzdálenost mezi Zemí a sluncem, [km]
$\dot{m}_p$	hmotnostní průtok odpařené vody, [kg·den <sup>-1</sup> ]
$L_p$	latentní teplo páry, [kJ·kg <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}_{v1}$	hmotnostní průtok vzduchu vstupující do hromady, [kg·den <sup>-1</sup> ]
$\dot{m}_{v2}$	hmotnostní průtok vzduchu vystupující z hromady, [kg·den <sup>-1</sup> ]
$c_{v1}$	měrná tep. kapacita vzduchu vstupující do hromady, [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$c_{v2}$	měrná tep. kapacita vzduchu vystupující z hromady, [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$T_{\text{povrch}}$	absolutní teplota povrchu, [K]
$T_{\text{okolni}}$	absolutní teplota okolního vzduchu, [K]
$T_0$	střední absolutní teplota, [K]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla, [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$A$	velikost povrchu kompostové hromady, [m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Stefan-Boltzmanova konstanta, [W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$\mathbf{F}_e$	emisní faktor záření, [-]
$\mathbf{F}_r$	konfigurační radiační faktor, [-]
$\rho$	objemová hustota biomasy, [kg·m <sup>-3</sup> ]
$V$	celkový objem biomasy, [m <sup>3</sup> ]
$c_b$	měrná tepelná kapacita biomasy o vlhkosti 40 %, [kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
$n_{\text{mezo}}$	doba trvání mezofilní fáze, [dny]
$n_{\text{termo}}$	doba trvání termofilní fáze, [dny]
$t_{m,\text{max}}$	maximální naměřená teplota, [°C]
$t_{m,\text{avg}}$	průměrná naměřená teplota v bioreaktoru během mezofilní fáze, [°C]

$t_{m,avg,amb}$  průměrná naměřená okolní teplota během mezofilní fáze, [°C]

## Seznam příloh

A	Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.1	59
B	Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.2	60
C	Naměřená data na bioreaktoru (prototyp č.1)	61
D	Naměřená data na bioreaktoru (prototyp č.2)	62
E	Program pro řídicí systém AMiNi2DS	63

# **A Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.1**

Tato příloha obsahuje výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru (prototypu č.1) ve vytvořeném programu v Excelu. x

## **B Výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru – prototyp č.2**

Tato příloha obsahuje výpočet denní tepelné bilance bioreaktoru (prototypu č.2) ve vytvořeném programu v Excelu.

## **C Naměřená data na bioreakoru (prototyp č.1)**

Tato příloha obsahuje naměřená data na bioreakoru (prototypu č.1) v Excel tabulce.

## **D Naměřená data na bioreakoru (prototyp č.2)**

Tato příloha obsahuje naměřená data na bioreakoru (prototypu č.2) v Excel tabulce.

## **E Program pro řídicí systém AMiNi2DS**

Tato příloha obsahuje program pro řídicí systém AMiNi2DS kompatibilní s vývoje-  
vým prostředím DetStudio.