

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Diplomová práce

**Návrh zpracování pivovarnického mláta technologií
nízkoteplotní pyrolýzy**

Bc. Michal Dojčár

© 2023 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Michal Dojčár

Technologická zařízení staveb
Zařízení v agropotravinářském komplexu

Název práce

Návrh zpracování pivovarnického mláta technologií nízkoteplotní pyrolýzy

Název anglicky

Design of brewing malt processing by low-temperature pyrolysis technologies

Cíle práce

Cílem diplomové práce je vypracovat návrh technologie na zpracování pivovarnického mláta nízkoteplotní pyrolýzou. Cíle práce vycházejí z charakteristiky agroodpadů, způsobů nakládání a předpřípravou těchto odpadů na suroviny vhodné pro energetické využití včetně identifikace jejich vlastností. Metodický postup práce bude vycházet z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců, charakteristiky legislativy v dané oblasti energetického využití tuhých agroodpadů, popisu a návrhu technologie a techniky vhodné ke zpracování a energetického využití pivovarnického mláta na biouhel.

Praktická část práce zahrnuje analýzu technologických zařízení na využití pivovarnického mláta. Bude uskutečněn návrh technologie nízkoteplotní pyrolýzy na využití pivovarnického mláta s ekonomickým posouzením.

Metodika

Diplomová práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Výchozí podmínky řešení
5. Návrh řešení a dosažené výsledky
6. Diskuse a závěry
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

50-60

Klíčová slova

Pivovarnické mláto, biouhel, torrefikace, výhřevnost, elementární složení

Doporučené zdroje informací

- Gálik, R. et al. Technika a technológie spracovania odpadov. Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre, Nitra 2020, Vysokoškolská učebnice – kniha, nakladatelství SPU v Nitre, ISBN 978-80-552-2267-7.
- Jevič, P., Šedivá, Z., Malaták, J., Křížek, J. Termolýzní zpracování zbytkové biomasy, separovaných plastových a celulóзовých podílů tuhého komunálního odpadu pro energetické a surovinové účely. VÚZT 2012, 51 str. ISBN: 978-80-86884-67-7.
- Malaták, J.; Jevič, P.; Vaculík, P.: Účinné využití tuhých biopaliv v malých spalovacích zařízeních s ohledem na snižování emisí znečišťujících látek. 2010, Powerprint, Praha, 240 str., ISBN 978-80-87415-02-3.
- Malaták, J.; Vaculík, P.: Zpracování biologicky rozložitelných odpadů. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 168 s., ISBN: 978-80-213-1747-5.
- Obroučka, K.: Termické zneškodňování odpadů. VŠB Ostrava, Ostrava 1997, 140 s., ISBN 80-248-0009-8.
- Pastorek, Z.; Kára, J.; Jevič, P.: Biomasa – obnovitelný zdroj energie, nakladatelství FCC Public, Praha 2004, 284 str., ISBN 80-86534-06-5.
- Rybín, M., 1985. Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů. SNTL, Praha, 520 s., 04-227-85.
-

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 17. 12. 2021

doc. Ing. Jan Malaták, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 23. 2. 2022

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 19. 07. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci "Návrh zpracování pivovarnického mláta technologií nízkoteplotní pyrolýzy" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31.3.2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu doc. Ing. Janu Malat'ákovi Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Velebilovi za pomoc se zpracováním a analýzou vzorků.

Návrh zpracování pivovarnického mláta technologií nízkoteplotní pyrolýzy

Abstrakt

Cílem práce bylo vypracovat návrh technologie zpracování pivovarského mláta nízkoteplotní pyrolýzou za účelem získání tuhého paliva. Návrh vychází z teoretické části, kde jsou popsány způsoby zpracování bioodpadů pro energetické účely. Nejčastějším výstupem těchto metod jsou paliva v různých skupenství určená k přeměně na tepelnou energii. Dílčím cílem bylo stanovit provozní parametry pyrolýzní jednotky. Toho bylo dosaženo na základě analýzy vyrobených torrefikátů při různých teplotách (250, 300, 350, 450 a 550 °C). S přibývajícím teplotou torrefikát významně ztrácí hmotnost v poměru k původní biomase a čím dál víc se strukturou podobá uhlí. S přibývajícím teplotou roste i spalné teplo až do té míry, než se významně projeví únik vodíku ve formě prchavé hořlaviny. Na základě analýzy doporučuji zpracovávat pivovarské mláto při teplotě 350 °C po dobu 30 minut. Při této teplotě nedochází k výrazné ztrátě hmotnosti a úniku energie a vyrobený biouhel má nejvyšší výtěžnost. Takto vyrobený biouhel může sloužit při dostatečně velké produkci jako náhrada fosilních paliv z důvodu výrazného snížení nákladů na emisní povolenky. V současné době je investice do malé výrobní linky riziková z důvodu vysokých provozních nákladů, které by mohli být budoucím vývojem této technologie sníženy.

Klíčová slova: pivovarnické mláto, biouhel, torrefikace, výhřevnost, elementární složení

Design of brewing malt processing by low-temperature pyrolysis technologies

Abstract

The objective of the work was to develop a proposal for the technology of processing brewer's spent grain by low-temperature pyrolysis in order to obtain solid fuel. The proposal is based on the theoretical part, where the methods of bio-waste processing for energy purposes are described. The most common output of these methods are fuels in various states of matter intended for conversion into thermal energy. A sub-objective was to determine the operating parameters of the pyrolysis unit. This was achieved by analysing the torrefaction products produced at different temperatures (250, 300, 350, 450 and 550 °C). As the temperature increases, the torrefactant loses mass significantly relative to the original biomass and becomes more and more similar in structure to coal. High heating value increases with increasing temperature until hydrogen leakage in the form of volatile combustible material becomes significant. On the basis of the analysis, I recommend processing the brewery mash at 350 °C for 30 minutes. At this temperature, there is no significant loss of mass and no energy leakage and the biochar produced has the highest energy yield. Biochar produced in this way can serve as a substitute for fossil fuels if production is sufficiently high, because of the significant reduction in the cost of emission allowances. At present, investment in a small production line is risky because of the high operating costs, which could be reduced by future development of this technology.

Keywords: brewer's spent grain, biochar, torrefaction, heating value, element analysis

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Cíl práce a metodika	2
2.1 Cíl práce	2
2.2 Metodika	2
3 Energetické zpracování biomasy	3
3.1 Biologické metody zpracování.....	3
3.1.1 Kompostování.....	4
3.1.2 Fermentace.....	5
3.2 Termochemické zpracování odpadů	7
3.2.1 Základní složení tuhých biopaliv	7
3.2.2 Spalování	9
3.2.3 Pyrolýza	10
3.2.4 Torrefikace.....	13
3.2.5 Hydrotermální karbonizace.....	15
3.2.6 Zplyňování	16
3.3 Legislativní předpoklady.....	19
4 Návrh řešení a dosažené výsledky	20
4.1 Měření	21
4.1.1 Výsledky měření	26
4.2 Návrh linky.....	30
4.3 Ekonomické zhodnocení	37
5 Diskuse a závěr	42
6 Seznam použitých zdrojů	44
7 Přílohy	48

Seznam obrázků

Obrázek 1 Energetické využití biomasy [3]	3
Obrázek 2 Teplotní průběh kompostování [3].....	4
Obrázek 3 Znázornění rozkladu organické materiálu na bioplyn [3]	5
Obrázek 4 Souhrn zastoupení produktů při různých teplotách a reakčních dobách [11]	11
Obrázek 5 Reaktor s rotující pecí [12].....	12
Obrázek 6 Schéma šnekového reaktoru [9]	13
Obrázek 7 Van Krevelův diagram torrefikované dřevní biomasy [16]	14
Obrázek 8 Porovnání hydrotermální karbonizace a torrefikace [17].....	15
Obrázek 9 Zplynovač s pevným ložem [19]	17
Obrázek 10 Reaktor s fluidním ložem [19]	18
Obrázek 11 Mokrý mláto [30]	20
Obrázek 12 Termogravimetrický analyzátor TGA 701(autor)	22
Obrázek 13 vysušené mláto, biouhel 250°C, biouhel 300°C (zleva) (autor).....	23
Obrázek 14 biouhel 350°C, biouhel 450°C, biouhel 550°C (zleva) (autor)	23
Obrázek 15 LECO CHN 628 [21]	24
Obrázek 16 Připravené vzorky k měření obsahu síry (autor)	25
Obrázek 17 Schéma procesů (autor).....	30
Obrázek 18 Bubnová sušárna [26].....	31
Obrázek 19 Disková sušárna [27].....	32
Obrázek 20 Pyrolýzní jednotka od firmy SMS s.r.o. [30]	35
Obrázek 21 Peletovací stroj [31]	35
Obrázek 22 Pytlovací váha [32].....	36

Seznam tabulek

Tabulka 1 Složení bioplynu [6]	6
Tabulka 2 Procesy pyrolýzy [9].....	10
Tabulka 3 Prvkové složení (příloha č.1,2).....	26
Tabulka 4 Vlhkost a obsah popela (příloha č.3)	27
Tabulka 5 Obsah kyslíku, spalné teplo a výhřevnost (autor podle rovnice /1//4//19/)	28
Tabulka 6 Orientační spotřeba energie sušáren [28]	32
Tabulka 7 Průběh splácení půjčky (zdroj: podklady KB).....	38
Tabulka 8 Průběh nákladů v čase (autor).....	40
Tabulka 9 Cash flow a čistá současná hodnota dle vzorce /23/ (autor).....	40

1 Úvod

Stoupající spotřeba člověka má za následek rostoucí produkci odpadů. Je nutné zajistit likvidaci s co nejmenším dopadem na životní prostředí. To můžeme docílit minimalizací produkce nových odpadů a likvidaci stávajících. Některé odpady mohou být zneškodňovány termicky za účelem výroby energie.

S rostoucí cenou fosilních paliv a emisních povolenek roste význam obnovitelných zdrojů energie, které získávají čím dál vyšší podporu od Evropské unie. Tato práce se zabývá problematikou alternativní výroby tuhých paliv z biomasy.

V roce 2020 se celosvětově vyprodukovalo 1819,6 milionů hektolitřů piva, z toho bylo v České republice uvařeno 20,1 milionů hektolitřů piva. Při procesu vaření piva vzniká nemalé množství bioodpadů. [1]

Nejčastějším využitím pivovarnického mláta je pro účely zkrmování hospodářskými zvířaty. Vysoká vlhkost a vysoký obsah dusíkatých látek v mlátě má za následek rychlý proces degradace. V praxi musíme pro účely zkrmování nejdéle do 48 hodin mláto konzervovat. To lze dvěma způsoby – silážováním nebo sušením. Obě tyto metody mají svá úskalí. Například sušení je velice energeticky náročné.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

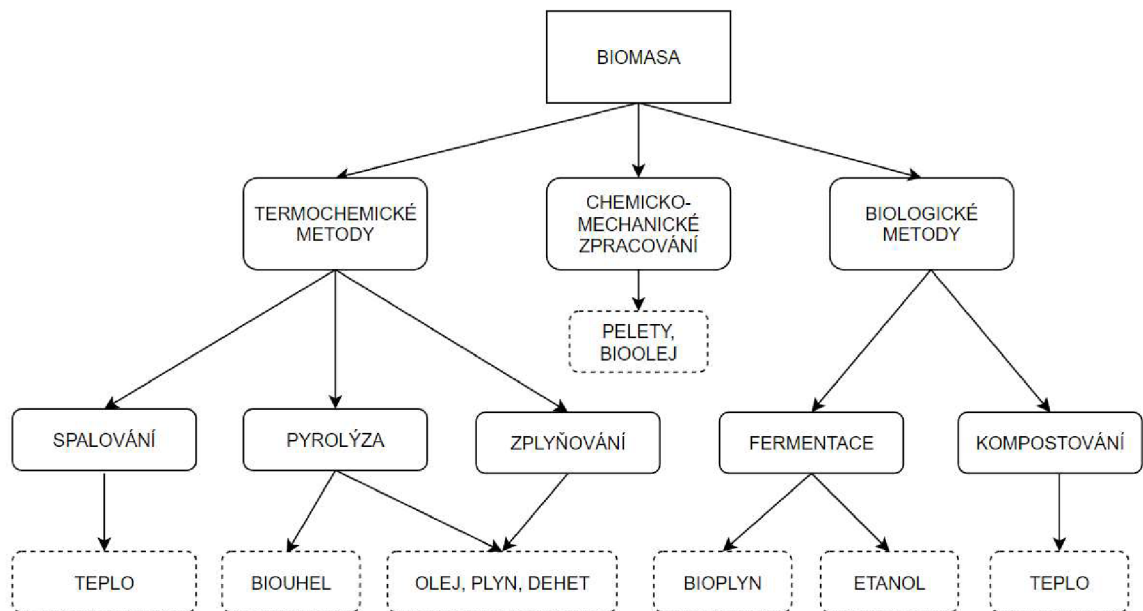
Cílem práce je návrh technologie nízkoteplotní pyrolýzy na využití pivovarnického mláta, včetně návrhu linky na výrobu energeticky využitelného biouhli vyráběného ze sladového mláta. Zhodnotit ekonomický smysl investice.

2.2 Metodika

V první části budou uvedeny poznatky získané z literatury na téma termických zpracování biomasy za účelem získání tepelné energie. Návrh linky bude vycházet z literární rešerše a výsledků měření získaných z laboratoře, kde byly analyzovány vzorky biouhli vyrobeného z mláta pomocí termogravimetrického analyzátoru. Na základě elementární analýzy bude zhodnocena výhodnost různých teplot torrefikace s ohledem na celkovou energickou výtěžnost. V poslední části bude ekonomicky zhodnocena investice navrhnuté linky.

3 Energetické zpracování biomasy

Podle zákona č. 165/2012 Sb. se obnovitelnými zdroji se rozumí obnovitelné nefosilní přírodní zdroje energie, jimiž jsou energie větru, energie slunečního záření, geotermální energie, energie vody, energie půdy, energie vzduchu, energie biomasy, energie skládkového plynu, energie kalového plynu a energie bioplynu. Pro účely tohoto zákona je definována biomasa jako biologicky rozložitelná část výrobků, odpadů a zbytků z provozování zemědělství a hospodaření v lesích a souvisejících průmyslových odvětví, zemědělské produkty pěstované pro energetické účely a rovněž biologicky rozložitelná část vytříděného průmyslového a komunálního odpadu [2]



Obrázek 1 Energetické využití biomasy [3]

3.1 Biologické metody zpracování

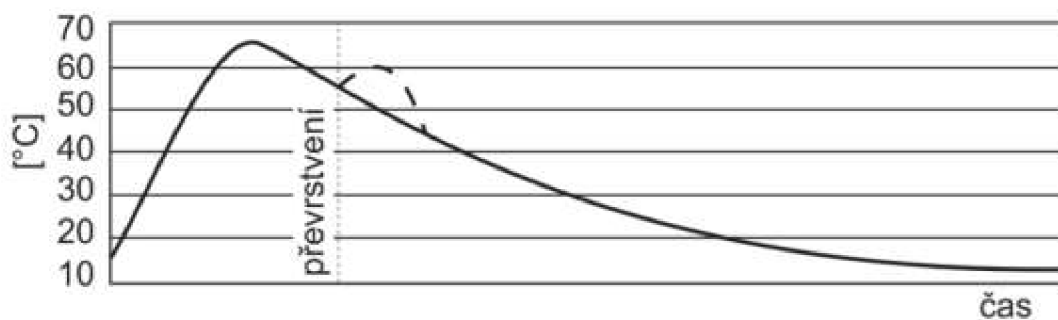
Základem zpracování organických odpadů biologickými metodami je aktivní působení metabolických mikroorganismů a bezobratlých živočichů. Jejich působení dochází k látkové přeměně na látky nezávadné pro životní prostředí nebo látky vhodné k energetickému využití. Zároveň dochází ke zmenšování objemu, snížení hmotnosti odpadů i případnému omezení úniku skleníkových plynů do atmosféry.

3.1.1 Kompostování

Kompostování je aerobní proces řízené intenzivní biodegradace organických látek. Degradace je výsledkem působení aerobních mikroorganismů kombinovaných s dalšími reakcemi, jakou jsou oxidace a hydrolýza. Procesu se zúčastňují zejména heterotrofní mikroorganismy, které štěpením organických látek získávají energii pro svůj růst a vývoj. Velká část těchto produktů štěpení dále oxiduje a na konečné látky s nízkým obsahem energie jako je oxid uhličitý a voda. Biodegradaci podléhají nejdříve jednoduché sacharidy, kyseliny a bílkoviny. Polysacharidy jako například lignin tvoří značnou část rostlinných materiálů. U nich dochází nejdříve k depolymeraci a až pak ke štěpení.

Účelem kompostování je biodegradace v takovém rozsahu, aby došlo ke stabilizování hmoty, která nebude podléhat další degradaci a nebudou moci v ní započít patogenní procesy. Výsledkem procesu je nezávadný materiál pro půdu, vodu a ovzduší. Kompostování se řídí zákonem o odpadech č. 541/2020 Sb. [3]

Kompostování pro energetické účely se využívá za účelem získání tuhého paliva, které se označuje jako BDB – biologicky dosušená biomasa. Tato metoda je vhodná pro biomasu s nízkým obsahem sušiny. Proces probíhá v aerobním fermentoru v teplotním pásmu 60 až 70 °C po dobu 48 hodin. Výsledkem působení mikroorganismů je kompost o vlhkosti 40 až 50 %. Poté nastává druhá fáze zpracování řízenou aerací zakládky fermentoru, při které se vytěsňuje vodní pára a dochází k dosoušení na 35 % vlhkost. Vytvořené palivo je určeno ke spalování v kotlích na tuhá paliva. Jeho výhřevnost se pohybuje okolo 10 MJ.kg⁻¹. Celý cyklus trvá 96 hodin. [4]

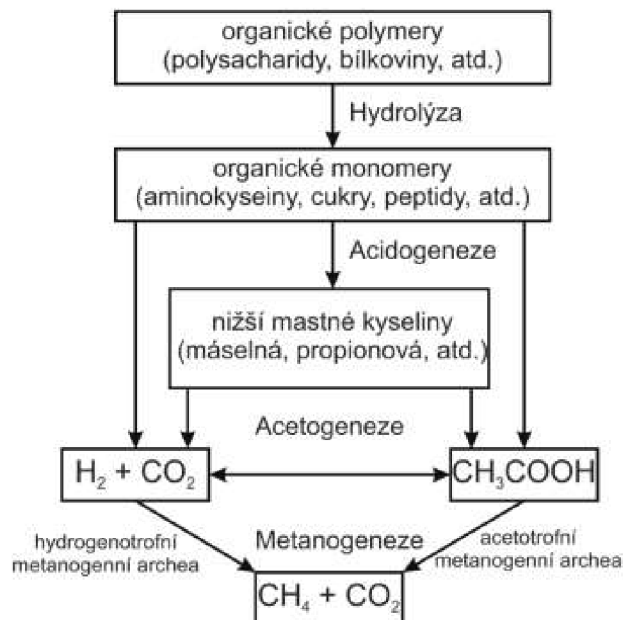


Obrázek 2 Teplotní průběh kompostování [3]

3.1.2 Fermentace

Kromě aerobní fermentace (kompostování) se hojně využívá anaerobní za účelem výroby bioplynu nebo etanolu. Etanol vzniká při tzv. alkoholovém kvašení. Při tomto procesu se přeměňují cukry obsažené v biomase na etanol. Právě tento obsah cukrů je klíčový pro celý proces, a proto odpad z rostlinné biomasy není vhodný k tomuto způsobu zpracování. Používají se naopak cíleně pěstované energetické plodiny jako například kukuřice. Naopak veškeré organické látky vznikající v zemědělství a potravinářství se hodí pro bioenergetickou transformaci na bioplyn. Tato technologie bývá běžně používána v odpadovém hospodářství na čistírnách odpadních vod, ke zpracování a stabilizaci čistírenských kalů, které obsahují velké množství organických látek. V současné době musí 30 % použitého materiálu do bioplynové stanice tvořit komunální odpad. [3][5]

Bioplynové stanice využívají anaerobní fermentace pro řízenou konverzi organického uhlíku obsaženém v biomase na bioplyn a fermentační zbytek. Konverze probíhá v několika na sebe navazujících krocích – hydrolýze, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi. Tyto procesy vytvářejí meziprodukty, které jsou spotřebovány pro další krok viz obrázek 3. Na každém kroku se podílí jiné druhy mikroorganismů a absence nějakého z nich má negativní vliv na další průběh. [3]



Obrázek 3 Znárodnění rozkladu organické materiálu na bioplyn [3]

V průběhu hydrolýzy, jsou polymery jako sacharidy, lipidy, nukleové kyseliny a proteinů, štěpeny hydrolytickými enzymy produkovanými hydrolytickými mikroorganismy na glukózu, glycerol, purin a pyridin. Ty jsou při acidogenezi štěpeny mikroorganismy na acetát, oxid uhličitý, vodík, těkavé mastné kyseliny a alkoholy. Acetogeneze a metanogeneze probíhá paralelně jako symbióza dvou skupin mikroorganismů. V této fázi vzniká bioplyn složený z metanu a oxidu uhličitého. Metan vzniká dvěma způsoby. Až 70 % metanu vzniká přeměnou kyseliny octové na metan a oxidu uhličitý. Zbylý metan vzniká přeměnou vodíku a oxidu uhličitého na metan a vodu. [3]

Kromě bioplynu je druhotným výstupním produktem fermentační zbytek. Výsledný obsah jeho sušiny je závislý na druhu biomasy a jejího předzpracování. Kapalný fermentační zbytek obsahuje kolem 10 % sušiny a netekutý až 40 %. Fermentační zbytek obsahuje vysokou koncentraci amoniakálního dusíku, fosforu a draslíku. Z tohoto důvodu je fermentační zbytek využíván k aplikaci na zemědělskou půdu. [3]

Obsah nežádoucích látek v bioplynu je ovlivněno druhem zpracování kvalitou vstupního materiálu. Materiál zemědělského původu má nižší koncentrace rizikových sloučenin než vstupní materiál z odpadů z jiných odvětví. [6]

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

Tabulka 1 Složení bioplynu [6]

3.2 Termochemické zpracování odpadů

Předností termochemického zneškodňování odpadů je značná redukce původního objemu a snížení nežádoucích látek nevhodných pro skládkování. Pro některé typy odpadů, jakými jsou odpady ze zdravotnických zařízení nebo odpady z chemického průmyslu je to jediná možná varianta zneškodňování. Velkou výhodou spalování je získávání tepelné energie, kterou lze dále přeměňovat na jinou formu energie pro další využití

3.2.1 Základní složení tuhých biopaliv

Všechna tuhá paliva se skládají z vody, popelovin a hořlaviny. Pro vyhodnocení jakosti tuhého paliva je zapotřebí znát jeho charakteristické vlastnosti, kterými jsou: [7]

- obsah vody v původním palivu W (% hm.)
- obsah popelovin v původním palivu A (% hm.)
- spalné teplo a výhřevnost Q ($\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- prchavá a neprchavá hořlavina v hořlavině
- obsah síry v palivu S (% hm.)
- charakteristické teploty popela

Složení paliv lze vyjádřit jako hmotnostní podíl veškeré vody (W), uhlíku (C), vodíku (H), kyslíku (O), síry (S), dusíku (N), a obsahu popelovin (A).

$$W + C + H + O + S + N + A = 100\% \quad /1/$$

Voda je nehořlavou složkou každého paliva. Vyskytuje se volně nebo ve vázané formě. Část kapilárně vázané vody lze odstranit sušením na vzduchu nebo intenzivním sušením. Malé množství vody nelze odstranit ani intenzivním sušením, uvolňuje se teprve při hoření. Zápalná teplota zpravidla bývá vyšší než teplota varu vody, to má za následek, že se palivo voda svou přítomností v palivu snižuje výhřevnost paliva a negativně ovlivňuje provoz spalovacího zařízení. [7]

Popeloviny jsou minerální látky, které se spalovacího procesu neúčastní. Většinou se jedná křemičitany, uhličitany a sírany. Tyto soli se při spalovacím procesu rozkládají na kovové oxidy a oxid uhličitý. Některé nově vzniklé oxidy kovů mohou ještě dále

oxidovat. Obsah popelovin v palivu rostlinného původu je v porovnání s obsahem popelovin v hnědém nebo černém uhlí několikanásobně menší. [7]

Uhlík, vodík a síra exotermicky reagují se vzdušným kyslíkem. Síra zvyšuje výhřevnost, ale i přes to je nežádoucí. Při spalování se přeměňuje na oxid siřičitý, který za přítomnosti katalyzátoru mění na oxid sírový, ten dále na kyselinu sírovou. Kyselina sírová způsobuje korozi a podporuje vytváření nánosů ve spalovacím zařízení. Navíc oxid siřičitý zvyšuje teplotu rosného bodu spalin. [7]

Spalné teplo je množství tepla, uvolněné dokonalým spálením 1 m³ nebo 1 kg při atmosférickém tlaku 101325 Pa o teplotě 20 °C paliva v adiabatických podmínkách, za předpokladu, že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách zkondenzuje.

Výhřevnost je množství tepla, uvolněné dokonalým spálením 1 m³ nebo 1 kg při atmosférickém tlaku 101325 Pa o teplotě 20 °C paliva v adiabatických podmínkách, za předpokladu, že se spaliny ochladí na teplotu výchozích látek a vodní pára, obsažená ve spalinách, zůstane v plynném stavu. Výhřevnost je tedy spalné teplo bez tepla získaného kondenzací vodní páry.

Výpočet spalného tepla

Nejpřesněji a zároveň nejjednodušeji lze určit hodnotu spalného tepla v hořlavině pomocí kalorimetrické metody v tlakové nádobě. Výpočtu této metody se zabývá norma ČSN EN ISO 18125 (Tuhá biopaliva – stanovení spalného tepla a výhřevnosti). Pokud nemáme k dispozici kalorimetr je možnost hodnotu spalného tepla dopočítat podle elementární prvkové analýzy. Pro tyto výpočty je zapotřebí znát zejména obsah uhlíku, vodíku, dusíky, síry a kyslíku. Všechny dále uvedené výpočty podle prvkového složení v hořlavině jsou empirické vzorce, tedy stanovují teoretickou hodnotu spalného tepla. Při dosazení hmotnostního podílu prvků vyjde HHV v MJ.kg⁻¹.

Jako první s empirickým vzorcem přišel chemik Dulong již v roce 1843.

$$HHV = 0,3383 \cdot C + 1,443 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 0,0942 \cdot S \quad /2/$$

Dalšímu často užívaným vztahem je výpočet podle Vondráčka:

$$HHV = (0,373 - 0,00026 \cdot C) \cdot C + 1,444 \cdot \left(H - \frac{O}{10}\right) + 0,1047 \cdot S \quad /3/$$

V roce 2019 se na VUT v Brně zabýval doc. Ing. Marek Baláš porovnáním naměřených hodnot spalného tepla kalorimetrickou metodou a vybranými empirickými výpočty spalného tepla pro tuhé bioodpady. Analyzované vzorky měli vlhkost v rozmezí 2-7 %. Došel k závěru, že pro biopaliva z biomasy je nejpřesnější výpočet podle Milneho, který započítává i obsah popelovin v palivu. [8]

$$HHV = (0,341 \cdot C + 1,322 \cdot H - 0,12 \cdot (O + N) + 0,0686 \cdot S - 0,0153 \cdot A) \quad /4/$$

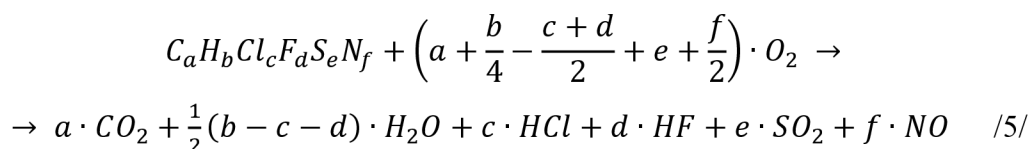
3.2.2 Spalování

Jedná se o nejjednodušší způsob využití biomasy pro získávání energie. Jeho hlavní výhodou je vysoké snížení objemu a hmotnosti až o 20-40 % původní hmotnosti, oproti jiným metodám zneškodňování. Ne všechny materiály jsou vhodné pro přímé spalování. Platí podmínka, aby materiál měl minimální výhřevnost 5 MJ na kilogram a zároveň obsah hořlaviny nad 25 %, vlhkost menší než 50 % a obsah popela do 60 % složení paliva. Pokud nastane stav, kdy bude obsah vody a popela vyšší, spalování hořlaviny nezajistí dostatečné teplo pro odpařování vody a zároveň teplo pro udržení paliva na spalovací teplotě.

Spalování biomasy za přítomnosti vzduchu probíhá ve čtyřech fázích: [9]

- ohřev a vysušování
- uvolňování prchavé hořlaviny (termický rozklad složek biomasy na plyny, které obsahují uhlovodíky)
- spalování plynných složek
- spalování tuhých složek

Souhrnný vzorec vyjadřující exotermickou oxidaci jednotlivých složek spalovaného odpadu za podmínek dokonalého spalování: [23]



Dokonalé spalování nastává v případě, že všechny hořlavé látky obsažené v palivu se již nenacházejí ve vzniklých spalinách. Ze spalovacích rovnic lze dopočítat potřebné stechiometrické množství vzduchu nebo kyslíku pro dokonalé spalování. V praxi všechny spalovací zařízení pracují s vyšším množstvím, než je teoretické, protože nelze zajistit dokonalé promísení paliva a vzduchu.

3.2.3 Pyrolýza

Pyrolýza je endotermický fyzikálně-chemický proces probíhající za nepřístupu vzduchu. Při něm dochází k rozkladu organické hmoty na nízkomolekulární látky a tuhý zbytek. Produktem pyrolýzy jsou polokoks, kapalný podíl a pyrolýzní plyn. Poměr těchto látek se mění s použitou technologií v závislosti zejména na teplotě, rychlosti ohřevu a na době setrvání na pyrolýzní teplotě. Obecně lze říct, že se vzrůstající teplotou roste podíl plynných složek, při rychlém ohřevu vznikají především kapalné produkty naopak při pomalém ohřevu a delším setrvání na pyrolýzní teplotě vzniká méně dehtů a více plynných produktů. Dalším parametrem, který ovlivňuje kvalitu procesu a jeho energetickou náročnost je předúprava a druh vstupního materiálu. Materiál musí mít vhodně zvolenou velikost části a pokud možno co nejmenší vlhkost.

Pyrolýzu dělíme podle reakční teploty na:

- nízkoteplotní pyrolýzu – do 500 °C
- středněteplotní pyrolýzu – 500-800 °C
- vysokoteplotní pyrolýzu – nad 800 °C

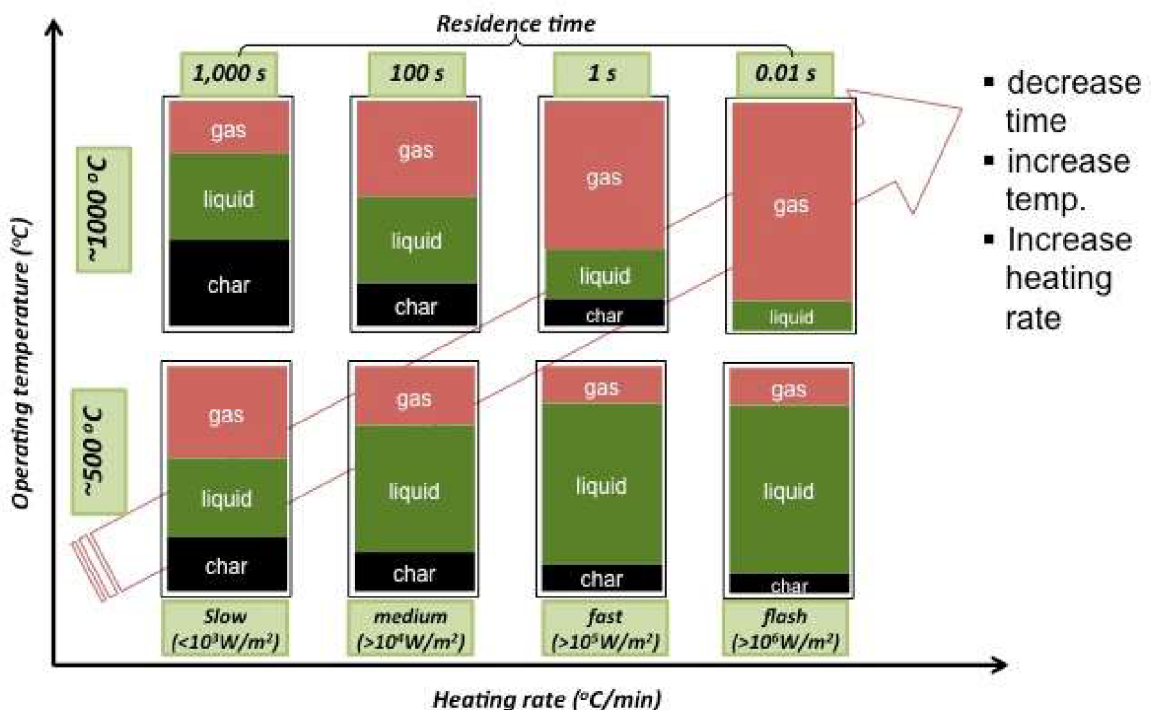
Teplota °C	Chemický proces
100-200	termické sušení, fyzikální odštěpování molekul vody
350	deoxidace, desulfurace, odštěpení vázané vody
380	štěpení dlouhých alifatických uhlovodíků a vznik nových alifatických uhlovodíků, vznik metanu
400	karbonizační proces – štěpení vazeb C-O, C-N
400-600	štěpení bitumenových složek na pyrolýzní plyn a olej
>600	krakování a vznik plynných uhlovodíků s krátkým řetězcem, vznik aromatických sloučenin

Tabulka 2 Procesy pyrolýzy [9]

V závislosti na technologii lze výsledný poměr produktů ovlivnit zejména dobou ohřevu a teplotou (viz obrázek 5). Čas ohřevu je doba, po kterou je vsázka v pyrolýzním reaktoru aktivně zpracovávána. Podle reakční doby pyrolýzy dělíme na pomalou a rychlou pyrolýzu.

Pomalá pyrolýza – principem je pomalý ohřev (cca $10 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) v řádu až několika desítek minut. Dříve se tato metoda používala za účelem výroby dřevěného uhlí. V dnešní době pyrolýza probíhá kolem $450 \text{ }^\circ\text{C}$, kdy výsledkem je vyrovnaný poměr tuhého podílu, plyných a kapalných produktů.

Rychlá pyrolýza – principem je rychlý přívod tepla (rychlost ohřevu $100 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$) do vsázky, která setrvává v reaktoru po dobu několika sekund. Tento rychlý ohřev má za následek rychlé uvolnění kapalných a plyných produktů. Pro získávání co největšího množství kapalných produktů bývá teplota okolo 450 až $650 \text{ }^\circ\text{C}$ a pro plyné složky $1000 \text{ }^\circ\text{C}$. Vzniklé produkty jsou okamžitě odsávány v řádu milisekund, dále se ochlazují a dochází ke kondenzaci zkapalnitelných plynů. Tento kondenzát nazýváme pyrolýzní olej. Zvláštním případem rychlé pyrolýzy je tzv. Flash pyrolýza, kde je kladen důraz na rychlý ohřev $>1000 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ během milisekund. [10]



Obrázek 4 Souhrn zastoupení produktů při různých teplotách a reakčních dobách [11]

Druhy pyrolýzních reaktorů

Základním úkolem všech pyrolýzních reaktorů je zahřát vstupující biomasu na požadovanou teplotu a transportovat materiál s určitou dobou zdržení při zachování inertních podmínek, tj. zamezení úniku vzduchu do systému. Rychlé pyrolýzní reaktory mají další požadavek, aby umožnily velmi vysoký přenos tepla do pevných částic biomasy a zároveň zkrátily dobu setrvání par v reaktoru na minimum, aby se maximalizoval výtěžek kapaliny. Je obecně náročné realizovat vysoký přenos tepla do pevných částic. Pro rychlé pyrolýzní reaktory byly navrženy různé konstrukce; mnohé z nich jsou založeny na principu, že částice biomasy jsou smíchány s přehřátým nosičem tepla, např. pískem. Jiné realizují vysoký přenos tepla kontaktem s vyhřívaným povrchem. [10]

Reaktor s pevným ložem

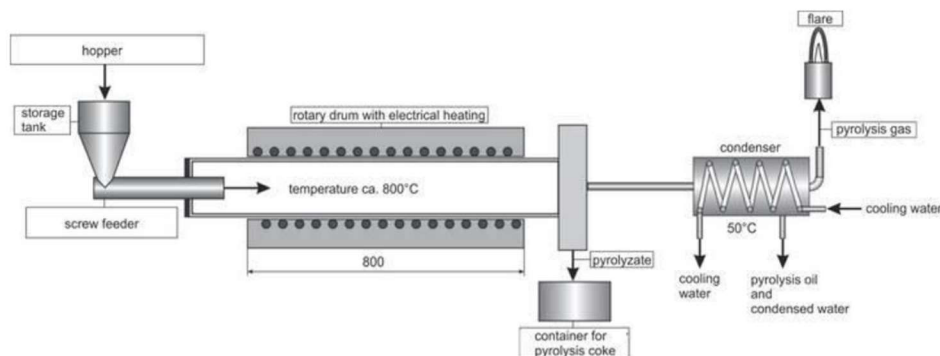
Nevýhodou tohoto typu reaktoru je nízká intenzita ohřevu z důvodu nízkého součinitele prostupu tepla uvnitř reaktoru. Jak se postupně ohřívá vsázka vytváří se různá teplotní pásma, to má za následek, že pyrolýza probíhá za různých podmínek současně.

Reaktor s fluidním ložem

Reaktory s fluidním ložem se používají nejčastěji pro pyrolýzu při 550-600 °C. Jsou kladeny vysoké nároky na předúpravu vsázky. Je nutné, aby velikost částic byla stejná a pohybovala se do 2 mm, aby se zajistil vnos a prohřívání materiálu bylo rovnoměrné. Vzhledem k rychlosti ohřevu v peci se používá pro rychlou pyrolýzu.

Reaktor s rotující pecí

Používá se pro pomalou pyrolýzu plastů. Ohřev je nejčastěji realizován nepřímo elektrickým ohřevem stěny bubnu. Malá teplostěnná plocha má za následek nižší intenzitu ohřevu vsázky většinou rychlostí do 100 K.min⁻¹. Čas zdržení bývá kolem hodiny. Velkou výhodou je rotace bubnu, která aktivně promíchává vsázku a k ohřevu dochází rovnoměrně. Díky tomu nejsou kladeny vysoké nároky na předúpravu vstupního materiálu.

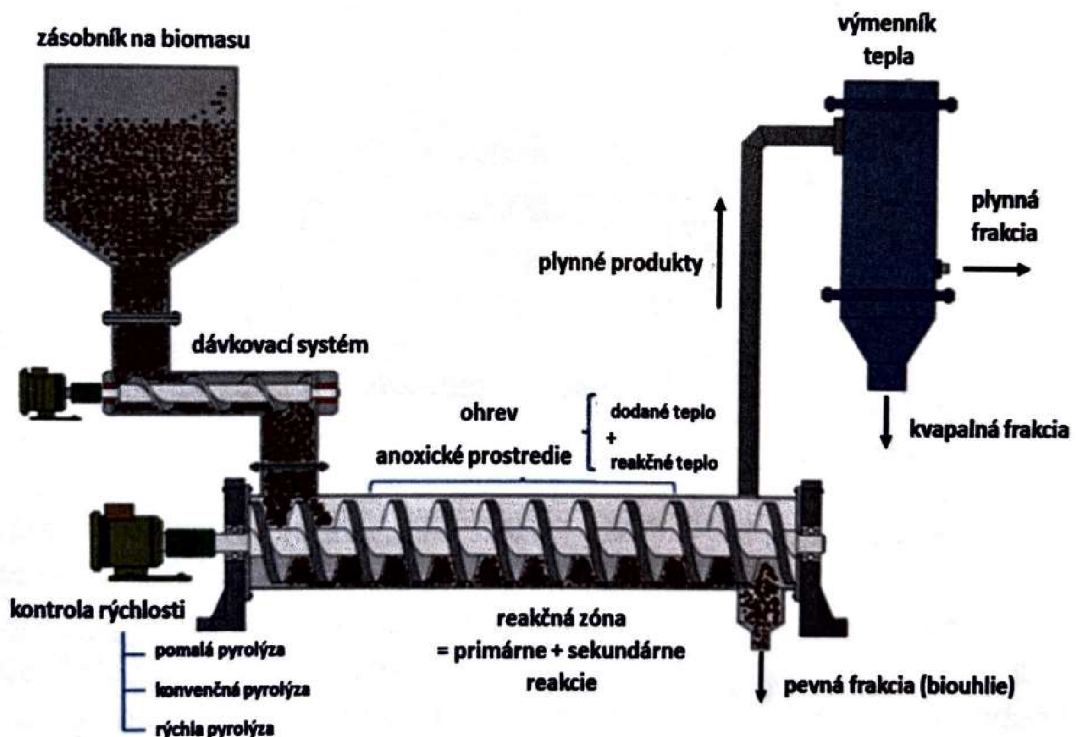


Obrázek 5 Reaktor s rotující pecí [12]

3.2.4 Torrefikace

Torrefikace je termický proces úpravy biomasy bez přístupu kyslíku při teplotách typicky v rozmezí 200-350 °C. Během procesu torrefikace biomasa ztratí přibližně 20 % její původní hmotnosti a zároveň pouze 10 % využitelné energie v ní obsažené. Biouhel vyrobený z biomasy pro energetické účely je konkurencí ke tradičnímu dřevěnému uhlí. Oproti dřevěnému uhlí biouhel vyrobený ze sladu má vyšší energetickou hustotu. Z pravidla 18-20 GJ.m⁻³ oproti 10-11 GJ.m⁻³. To vede ke snížení nákladů na logistiku až o 50 %. Biouhel se nejčastěji po výrobě peletuje. Pelety se spalují v konvekčních kotlích na uhlí ať už jako přídavek k uhlí nebo dokonce i samotné. [13]

Pro torrefikace se nejčastěji využívá šnekový reaktor (obrázek 5), který je tvořen jedním nebo více šnekovými dopravníky. Jeho umístění vůči zemi může být svislé, vodorovné nebo pod úhlem. Biomasa je do reaktoru přiváděna a poté dále dopravovaná šnekovým dopravníkem. Během přepravy se biomasa nepřímo zahřívá topným médiem nebo přímo topnými prvky umístěnými ve stěně reaktoru. V obou případech se vyskytuje problém s nerovnoměrným ohřevem biomasy a nadměrným zuhelnatěním produktu. Doba setrvání v reaktoru závisí na délce a rychlosti dopravníku. Velkou výhodou šnekového reaktoru je jeho relativně nízká pořizovací cena a nízká spotřeba inertního plynu. [14]



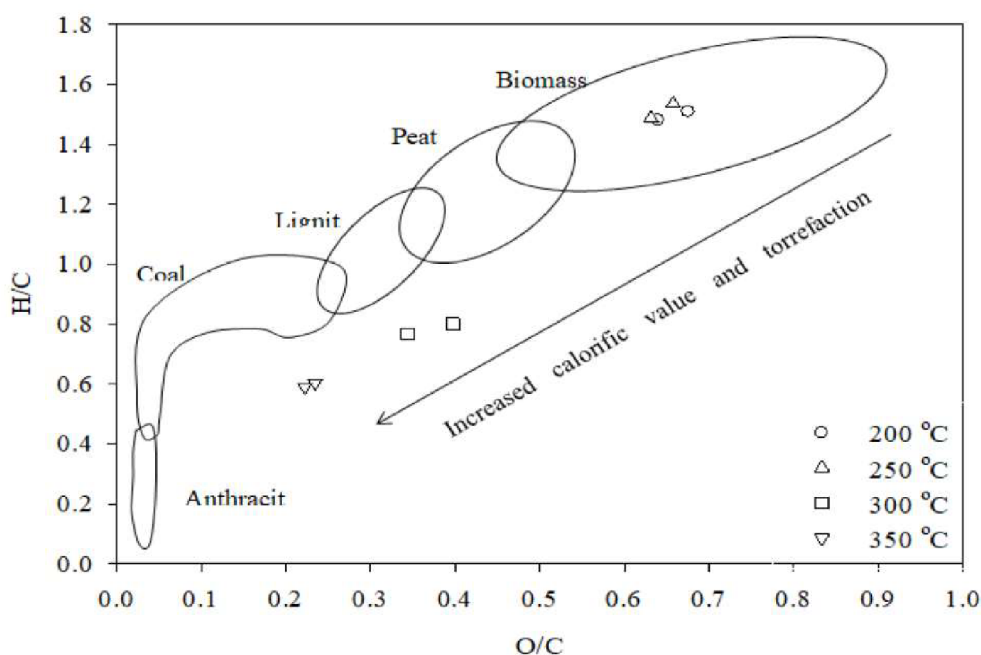
Obrázek 6 Schéma šnekového reaktoru [9]

Mechanismus tvorby polokoksu

V Evropě působí instituce European Biochar Certificate (EBC), který se zabývá hodnocením kvality biouhlí vyrobené pyrolýzní technologií. Jedná se o dobrovolný certifikát, který má úkol zhodnotit efektivnost výroby v pyrolýzních pecích na základě nejnovějších poznatků z vývoje pyrolýzních technologií. Nehodnotí se pouze kvalita produktu, ale i jeho celkový dopad na životní prostředí v závislosti na použité metodě výroby. [15]

Původ a složení biomasy má zásadní vliv na množství a složení produktů pyrolýzy. Rostlinná biomasa je tvořena celulózou, hemicelulózami, ligninem, vodou, dalšími organickými a prchavými látkami. Celulóza, hemicelulózy a lignin při pyrolýze přeměňují různými chemickými reakcemi. Jako první se přeměňují hemicelulózy, a to již za teplot mezi 200-260°C. Dále probíhá rozklad celulózy v teplotním rozmezí 240-350 °C, dále přeměna ligninu v teplotním rozmezí 280-500 °C. Přítomnost alkalických kovů a kovů alkalických zemin v biomase mají katalytický účinek při tvorbě biouhlí. [9]

Van Krevelův diagram graficky znázorňuje závislost vodíkového indexu (atomový poměr H/C) a kyslíkového indexu (O/C). Čím je obsah uhlíku vyšší tím se zvětšuje i celková energie obsažená v materiálu. Přirozeně nejnižší poměry mají materiály jako antracit a uhlí, které jsou téměř výlučně tvořeny uhlíkem. Cílem zušlechťování tuhých paliv je dosáhnout vysokého obsahu uhlovodíků. [16]



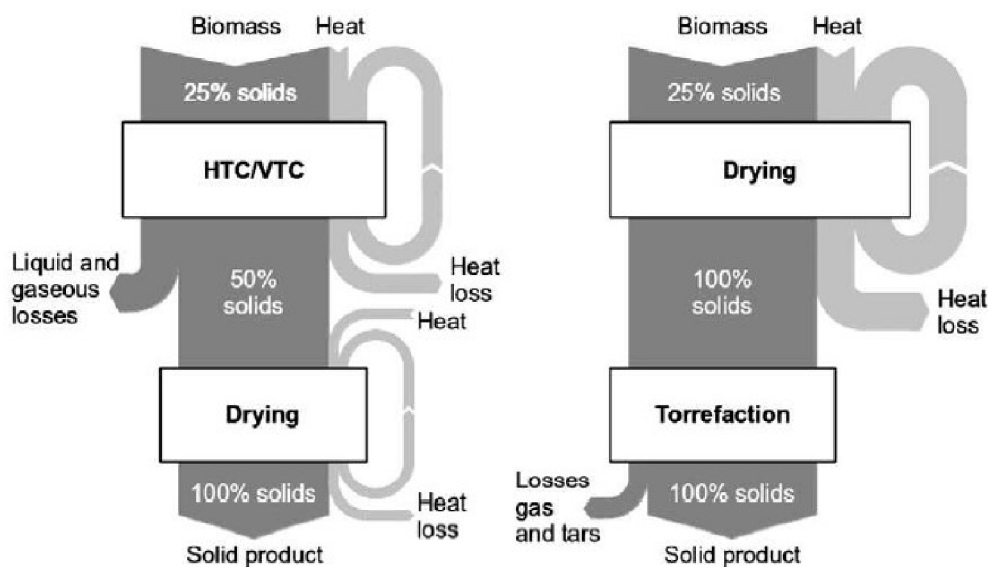
Obrázek 7 Van Krevelův diagram torrefikované dřevní biomasy [16]

3.2.5 Hydrotermální karbonizace

Hydrotermální karbonizaci lze popsat jako kombinovanou dehydrataci a dekarbonizaci paliva za účelem zvýšení obsahu uhlíku. Tímto procesem lze z biomasy vyrobit palivo podobné hnědému uhlí. Proces probíhá v podkritické vodě za tlaku syté páry v rozmezí teplot 180-450 °C při tlacích až do 30 MPa po dobu několika hodin. Voda slouží ke zlepšení přenosu tepla a k reakci s biomasou. Výsledným produktem je biouhel, procesní voda a malé množství plynných látek. Do vody se dostane poměrně velké množství uhlíku, proto je vhodné tuto vodu recirkulovat, aby při dalších cyklech nebyla tak velká ztráta uhlíku, tedy aby se podařilo dosáhnout biouhlí s vyšším obsahem uhlíku a tím se zvýšila jeho výhřevnost. Do plynu přejde také nějaké množství uhlíku, které je také považováno za ztrátu. Plyn je tvořen až z 80 % oxidem uhličitým. [17]

Velkou výhodou této technologie je, že probíhá ve vodě, a tím odpadá nutnost předsušení biomasy. Z tohoto důvodu bývá někdy označována jako mokrá torrefikace.

Nejčastěji v odpadovém hospodářství se jako vstupní surovina používají kaly z čištění odpadních vod.



Obrázek 8 Porovnání hydrotermální karbonizace a torrefikace [17]

3.2.6 Zplyňování

Zplyňování je silně endotermická reakce, při které se přeměňují uhlíkaté materiály na hořlavé plyny při teplotách vyšších než 800 °C. Nastává částečná oxidace uhlovodíků a vodní páry a poté je jich následná redukce na hořlavé plyny a kapalnou směs. Hlavní snahou této technologie je přeměnit co největší část obsažené energie v biomase na co největší energetický obsah výsledného plynu. Chemické složení plynu se odvíjí od rychlosti reakčního procesu, teploty v reakčních zónách a složení biomasy. Hlavní složkou plynu je oxid uhelnatý, který vzniká nedokonalým spalováním a je zastoupen 15 až 25 % obj.. Vedlejšími složky je vodík (10-16 % obj.), methan (1-4 % obj.), oxid uhličitý a dusík. Plyn obsahuje velké množství vodní páry a je nutné ho purifikovat. [9][18]

Oxidační zóna

Oxidace probíhá v oblasti přívodu zplyňovacího média. Z pravidla se jedná o kyslík nebo vzduch stechiometrickým koeficientem 0,3 až 0,5. V této oblasti se pohybuje teplota mezi 800 až 1500 °C. Oxidace lze zjednodušeně popsat podle následujících rovnic. [18]

Částečná oxidace tuhého uhlíku



Částečná oxidace tuhého uhlíku



Úplná oxidace tuhého uhlíku



Oxidace oxidu uhelnatého



Oxidace metanu



Redukční zóna

V redukční zóně vznikají spalitelné látky redukcí oxidu uhličitého na oxid uhelnatý (tzv. Boudouardova reakce) a redukcí vodní páry na vodík a současně uhlík reaguje s vodíkem za vzniku metanu.

Boudouardova reakce



Heterogenní reakce vodního plynu



Heterogenní vznik metanu



Homogenní reakce vodního plynu



Homogenní vznik metanu



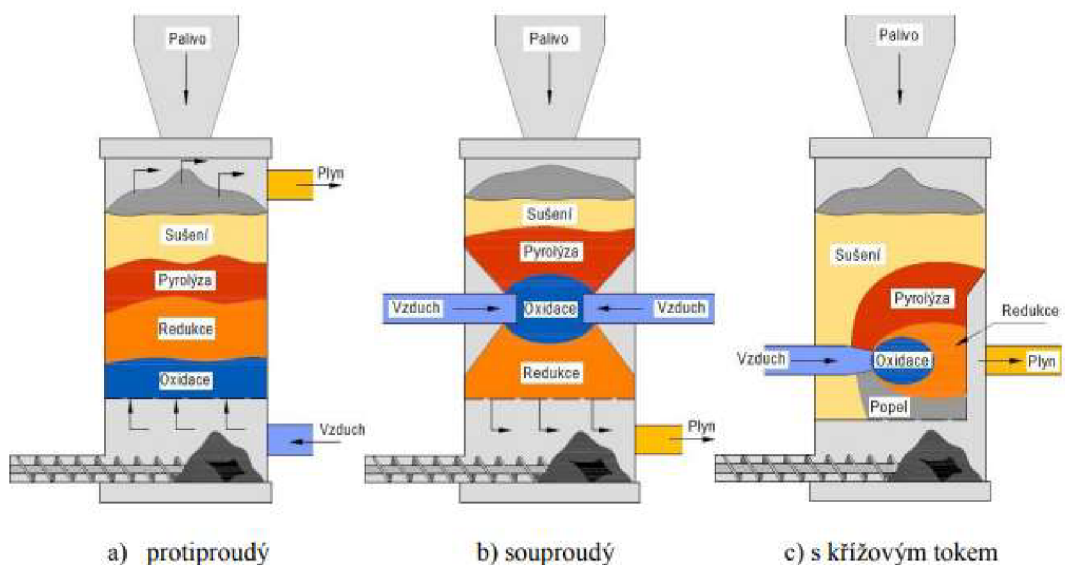
Homogenní redukce oxidu uhličitého



Na základě typu zplyňování rozdělujeme typy zařízení na zplyňovače s pevným ložem a zplyňovače s fluidním ložem. [9][18]

Reaktor s pevným ložem

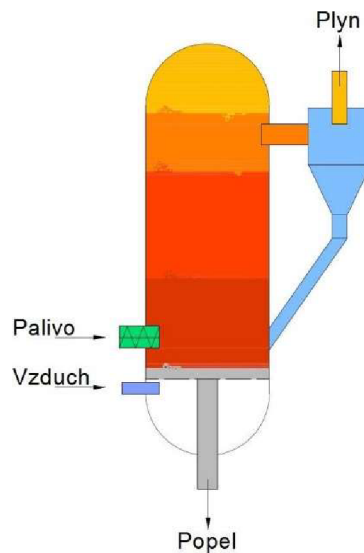
Tento typ reaktoru patří mezi nejrozšířenější typ reaktoru pro zplyňování biomasy. Na obrázku 8 jsou znázorněny zóny procesů podle typ přívodu paliva a vzduchu a odvodu bioplynu.



Obrázek 9 Zplyňovač s pevným ložem [19]

Reaktor s fluidním ložem

U tohoto typu reaktoru se palivo zplyňuje ve vzosu. Nejprve palivo leží na inertním materiálu (nejčastěji písek, keramika nebo popel) který je umístěn na porézním dně. Tento materiál se před začátkem procesu nahřívá. Zespodu je přiváděn vzduch, který začne palivo a inertní materiál vířit. Všechny procese probíhají v celém reaktoru zároveň. [19]



Obrázek 10 Reaktor s fluidním ložem [19]

Technologie zplyňování nachází využití nejen v průmyslu, ale i pro domácnosti. Na trhu lze najít velké množství zplyňovacích kotlů pro vytápění a ohřev užitkové vody, které ohřívají akumulární nádrže.

3.3 Legislativní předpoklady

Zákon o odpadech č. 541/2020 Sb.

Zákon o odpadech zajišťuje ochranu životního prostředí a zdraví lidí. Stanovuje v souladu s předpisy Evropské unie pravidla pro:

- předcházení vzniku odpadu a nakládání s ním
- práva a povinnosti osob v odpadovém hospodářství
- působnost orgánů veřejné správy v odpadovém hospodářství

Tento zákon se nestahuje na emise látek znečišťujících ovzduší.

Zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb.

Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečištění ovzduší a snižování úrovně znečištění tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší

Další důležité zákony, vyhlášky a nařízení vlády

- Zákon č.165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů
- Vyhláška č. 110/2022 Sb. o stanovení druhů a parametrů podporovaných obnovitelných zdrojů a kritérií udržitelnosti a úspory emisí skleníkových plynů pro biokapaliny a paliva z biomasy
- Vyhláška 166/2022 Sb. o vykazování energie z podporovaných zdrojů
- Vyhláška 441/2012 Sb. o stanovení minimální účinnosti užití energie při výrobě elektřiny a tepelné energie
- Nařízení vlády 300/2022 Sb. o stanovení hodnot vnitřního výnosového procenta investic pro jednotlivé druhy obnovitelných zdrojů
- Vyhláška č. 8/2021 Sb. o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů
- Vyhláška č.273/2021 Sb. o podrobnostech nakládání s odpady
- Zákon č. 383/2012 Sb. o podmínkách obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů

4 Návrh řešení a dosažené výsledky

Výchozí podmínky

Návrh bude uskutečněn pro dva minipivovary jako alternativa k tradičnímu zpracování pivovarského odpadu, kterým jsou sušení a následné úprava pro zkrmování. Tyto minipivovary v současné době produkují dohromady 6,5 tun mláta za týden.

Dílčími cíli jsou stanovení teploty pyrolýzy, návrh linky pro zpracování velmi malého množství mláta a výsledným cílem praktické části je ekonomické zhodnocení návratnosti navržené linky. Posledním trendem ve světě je vývoj torrefikačních jednotek v měřítku velkého průmyslu pro zpracování odpadů z potravinářského průmyslu a zemědělství. Toto zpracování odpadů z biomasy je považováno za obnovitelný zdroj energie. Cena emisních povolenek zvedá právě zájem o vývoj těchto technologií, nicméně velké firmy v Evropě prozatím nepočítají se začleněním do provozu bez pobídkových dotací.

Sladové mláto tvoří přibližně 85 % veškerého odpadu při vaření piva. Cílem rmutování je přechod škrobu ze sladového šrotu do sladiny a jeho následné enzymatické štěpení na zkvasitelné cukry. Není tedy divu, že slad během rmutování ztrácí přibližně 70 % své původní hmotnosti. V sušině mláta zůstávají dusíkaté látky, vláknina a malé procento škrobu a přibližně 3–5 % popelovin. Z toho může obsahovat sušina až 17 % celulózy a 28 % ligninu. Jejich obsah je klíčový pro vhodnost materiálu pro zpracování na biouhel. Ze 100 kg sladu vzniká po scezení přibližně 120-130 kg sladového mláta o vlhkosti 77-82 %. [20]



Obrázek 11 Mokrý mláto [30]

Technologie nízkoteplotní pyrolýzy pro výrobu biouhlí z odpadu organického původu je známá již několik desetiletí. Vzhledem k nízké ceně pevných fosilních paliv se nezdála v tomto období moc perspektivní. V nedávně době cena energií skokově vzrostla, a proto je vhodné znovu posoudit aplikaci této technologie.

4.1 Měření

Cílem měření bylo stanovit ideální teplotu pyrolýzní linky na základě prvkové analýzy pomocí, které byla stanoveno spalné teplo. Vycházíme z předpokladu, že ne nutně vyšší teplota pyrolýzy nám zajistí energeticky výhodnější palivo z důvodu vyšší ztráty hmotnosti, která je způsobena uvolňování kapalných a plyných látek po dobu pyrolýzy.

Měření proběhlo ve školní laboratoři, kde byly provedena nízkoteplotní pyrolýza mláta získaného ze školního pivovaru. Mláto bylo odebráno z různých částí scezovací kádě. Z důvodu vysoké vlhkosti mláta a jeho následně možného biologického znehodnocení byl vzorek odebrán ihned po scezení. Po odběru byl vzorek mláta vysušen sušičkou na ovoce z 80 % na změřených pomocí vlhkoměru OHAUS 5,22 % vlhkosti.

Všechna měření následující měření byla opakovaná čtyřikrát, aby bylo dosaženo statisticky vypadávajících dat a byla minimalizována chyba měření.

Simulace pyrolýzní jednotky

Pro simulaci nízkoteplotní pyrolýzy byl použit termogravimetrický analyzátor LECO TGA 701. Mláto po vysušení bylo dále změlněno pomocí mlýnku na kávu a odváženo na 1 gram vzorky.

Termogravimetrický analyzátor se používá ke stanovení fyzikálních a chemických vlastností materiálu v závislosti na teplotě v regulované atmosféře. Přístroj se skládá z počítače a pece, která umožňuje analyzovat až 19 vzorků. Nejdříve je nutné definovat program. Tedy dobu, vydržovací teploty a přesně definovanou atmosféru. Poté se vloží prázdné kelímky do karuselu pece, kde se automaticky změří jejich počáteční hmotnost. Vzhledem k tomu, že cílem bylo simulovat prostředí pyrolýzní pece, tedy bez přístupu vzduchu byla vybrána atmosféra tvořena 99,9% dusíkem a kelímky byly ještě opatřeny alobalem, ve kterém bylo mláto zabaleno. Nominální hodnota vzorku pro tento konkrétní analyzátor je 1 g. Vzorky byly naváženy a jeden po druhé automaticky opět změřeny v peci s přesností na 0,0001g.



Obrázek 12 Termogravimetrický analyzátor TGA 701(autor)

Podmínky měření

Veškeré měření proběhlo v atmosféře o složení 99,9 % dusíku. Nejprve vzorky byly ohřáty rychlostí $15 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ na teplotu $105 \text{ }^\circ\text{C}$, kde byly udržovány do konstantní hmotnosti. Další ohřev na teploty pyrolýzy proběhl rychlostí $50 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$. Samotná pyrolýza probíhala 30 minut. Poté se vytvořený biouhelný nechal v inertní atmosféře ochladit na pokojovou teplotu. Teploty pyrolýzy byly následující: 250, 300, 350, 450 a $550 \text{ }^\circ\text{C}$.

Vzorky po pyrolýze byly opět zváženy za účelem zjištění ztráty hmotnosti. Ztráta hmotnosti při různých teplotách torrefikace určena z počáteční hmotnosti a hmotnosti získaného biouhlu:

- pro $250 \text{ }^\circ\text{C}$ -> průměrně 18 %
- pro $300 \text{ }^\circ\text{C}$ -> průměrně 20 %
- pro $350 \text{ }^\circ\text{C}$ -> průměrně 30 %
- pro $450 \text{ }^\circ\text{C}$ -> průměrně 42 %
- pro $550 \text{ }^\circ\text{C}$ -> průměrně 68 %



Obrázek 13 vysušené mláto, biouhel 250 °C, biouhel 300 °C (zleva) (autor)



Obrázek 14 biouhel 350 °C, biouhel 450 °C, biouhel 550 °C (zleva) (autor)

Ztrátu hmotnosti způsobuje úplná dehydratace materiálu a únik prchavé hořlaviny. Z důvodu negativního dopadu na životní prostředí se pyrolýzní plyn vzniklý při torrefikaci musí jít k dalšímu energetickému využití. Tento plyn z velké části obsahuje hořlavou složku zejména CO, který je vhodný spálit v kogenerační jednotce. Při torrefikaci nevzniká až takové množství hořlavého plynu jako v případě vysokoteplotní pyrolýzy, tak nemá význam linku vybavit energetickou jednotkou a bude se pouze jímát.

Všechny produkty pyrolýzy (obr. 13 a 14) byly pomocí kávového mlýnku rozemlety, aby vznikl homogenní prášek pro účely prvkové analýzy.

Stanovení obsahu uhlíku, vodíku a dusíku dle ASTM D5373 na přístroji LECO CHN628

Obsah uhlíku, vodíku a dusíku v uhlíkatých materiálech se využívá k výpočtu materiálových a energetických bilancí. Principem analýzy je úplné spálení vzorku v čisté kyslíkové atmosféře a následném analyzování spalin.

Kapsle se vzorkem se vrhne do vysokoteplotní pece o teplotě 1000 °C, kde dojde k exotermické reakci, při které se teplota zvýší na více než 1800 °C. Ke konci hoření dojde

k přidání dalšího kyslíku do komory, aby bylo zajištěno úplně spálení všech organických látek. Během spalování se uhlík přemění na CO_2 , vodík na H_2O , dusík na N_2 a oxidy dusíku. Spaliny jsou dále hnány nosným plynem helia skrz specializovaná činidla, která zachycují další sloučeniny obsažené ve směsi spalin jako jsou například oxidy síry a fosforu. Dále se směs vede redukční trubicí naplněnou mědí, kde se zachycuje přebytečný kyslík a redukují se zde oxidy dusíku na N_2 . Směs prochází detekční celou infračerveného záření, kde se stanovuje obsah uhlíku a vodíku. Obsah dusíku se stanovuje pomocí tepelné vodivosti. Celé měření trvá přibližně 4 minuty. [21]

Pro správné měření je nutné kalibrovat přístroj. Kalibrace se provádí pomocí prázdného vzorku a referenční látky přibližně každých 5 měření. pro navážení vzorků byla použita váha SAROTUS CP124S, která váží s přesností na 0,001 gramu.



Obrázek 15 LECO CHN 628 [21]

Stanovení síry na přístroji LECO S628

Metoda je podobná jako při stanovení CHN. Keramická miska s naváženým vzorkem se zasune do spalovací komory s čistým kyslíkem o teplotě 1350 °C. Vzniklé spaliny se nejdříve vysuší pomocí chloristanu hořečnatého. Dále pokračují detekční cely, kde je síra stanovena na základě infračerveného záření. [22]



Obrázek 16 Připravené vzorky k měření obsahu síry (autor)

Stanovení vlhkosti a obsahu popela

Vlhkost a obsah popela byl stanoven pomocí termogravimetrického analyzátoru TGA 701. Před analýzou byly kelímky vyžihány a vysušeny. Do každého kelímku bylo naváženo přibližně 1 g vzorku. Nejprve se měří vlhkost na základě rozdílu původní hmotnosti a hmotnosti vzorků po vysušení, které byly sušeny na 105 °C do konstantní hmotnosti.

Po skončení sušení se vzorky žihají v kyslíkem obohacené atmosféře při teplotě 550 °C opět do konstantní hmotnosti pro zjištění obsahu popelovin.

4.1.1 Výsledky měření

V následující tabulce jsou shrnuty průměrné výsledky prvkové analýzy z pěti měření.

Průměrné výsledky analýzy prvků CHNS v sušině				
vzorek	C [% hm.]	H [% hm.]	N [% hm.]	S [% hm.]
mláto	46,22±0,09	7,03±0,10	3,06±0,08	0,23±0,02
250°C	58,16±0,11	6,42±0,11	4,17±0,05	0,24±0,01
300°C	63,37±0,31	6,10±0,09	4,67±0,02	0,18±0,01
350°C	71,13±0,41	5,21±0,06	5,45±0,03	0,14±0,01
450°C	73,15±0,15	3,51±0,03	5,50±0,02	0,10±0,01
550°C	74,54±0,49	2,65±0,02	5,36±0,06	0,08±0,01

Tabulka 3 Prvkové složení (příloha č.1,2)

Jak můžeme vidět v tabulce s rostající teplotou se zvyšuje koncentrace uhlíku v biouhli. Na rozdíl od koncentrace vodíku, který uniká ve formě plynů při torrefikaci. Těmito plyny mohou být H_2 , C_nH_m a voda. Obsah síry, který má negativní vliv na konstrukci spalovacích zařízení, kde způsobuje korozi je v palivech rostlinného původu velmi nízký v porovnání s fosilními palivy, kde například v černém uhlí se pohybuje obsah síry v závislosti na kvalitě a místě původu kolem 1 % a v hnědém uhlí v rozmezí 1-3 %. To má za následek nutnost zařadit odsiřovací proces za účelem snížení oxidů síry ve spalinách a tím zmírnit její negativní vliv na životní prostředí. Nejčastěji se odsiřování provádí suchou nebo mokrou metodou. Suchá metoda spočívá přidáním sorbentů do paliva, spalovacího zařízení nebo do spalin, které mají schopnost na sebe vázat oxidy síry. Nejčastěji se za tímto účelem používá jemně mletý oxid vápenatý a uhličitan vápenatý. Mokrý metoda je využívanější a má i vyšší účinnost. Metoda spočívá v používání mokřích praček spalin, kde se síra absorbuje do vodné suspenze vápence za vzniku sádrovce. Obsah síry během pyrolýzy klesá z důvodu přeměny na H_2S . Dusík se neúčastní hoření a zcela přechází do spalin, a tedy svým obsahem snižuje výhřevnost paliva. [23][24]

Analyzovány byly pouze hlavní palivářské prvky, vysoký obsah chloru, fluoru a dalších nežádoucích prvků není předpokládán na základě původu pivovarského mláta, který podléhá přísné potravinářské kontrole.

Průměrné výsledky analýzy TGA			
vzorek	Vlhkost W [% hm.]	Obsah popelovin A_w [% hm.]	Obsah popelovin v sušině A [% hm.]
mláto	7,05±0,03	2,82±0,03	3,04±0,04
250°C	0,58±0,15	3,91±0,03	3,93±0,03
300°C	1,97±0,09	4,64±0,02	4,73±0,03
350°C	0,33±0,33	6,09±1,21	6,71±0,03
450°C	1,90±0,25	9,40±0,08	9,58±0,06
550°C	3,75±0,16	10,45±0,10	10,73±0,23

Tabulka 4 Vlhkost a obsah popela (příloha č.3)

Z výsledků termogravimetrické analýzy je patrné, že se vzrůstající teplotou pyrolýzy se zvyšuje i obsah popelovin, které jsou nežádoucí při procesu spalování. Vyšší obsah popelovin má za následek zvýšení množství popela zůstávající v kotli po spalování, to vede i k častějšímu vynášení popela a častější údržbě spalovacího zařízení. Absolutní množství popelovin v biouhli je neměnný. Na základě tohoto předpokladu lze konstatovat, že se zvyšující se teplotou se rapidně snižuje úbytek hmotnosti biouhli, které má za následek zvýšení hmotnostního poměru popelovin. [22]

Výpočet spalného tepla dle ČSN EN ISO 18125

V následující tabulce byl dopočten hmotnostní obsahu kyslíku v sušině podle vzorce /1/ a přepočtena výhřevnost vzorků při 3 % vlhkosti pro účely porovnání podle vzorce /19/

Pro účely dalších výpočtu bylo nutné nejdříve provést přepočet obsahu prvků na konkrétní vlhkost vzorků a s nimi dále počítat.

Výpočet spalného tepla /4/ byl proveden podle vzorce následujícího vzorce:

$$HHV = 0,341 \cdot C + 1,322 \cdot H - 0,12 \cdot (O + N) + 0,0686 \cdot S - 0,0153 \cdot A \quad /4/$$

$$HHV \text{ [MJ.kg}^{-1}\text{]}$$

vzorek	obsah kyslíku v sušině O [% hm.]	Spalné teplo vzorků Q _v [MJ.kg ⁻¹]	Výhřevnost při 3% vlhkosti Q _i [MJ.kg ⁻¹]
mláto	40,43	18,40	17,64
250°C	27,08	24,36	22,33
300°C	21,45	25,97	24,33
350°C	11,06	29,36	27,34
450°C	8,16	27,25	26,13
550°C	6,64	26,27	25,84

Tabulka 5 Obsah kyslíku, spalné teplo a výhřevnost (autor podle rovnice /1//4//19/)

Vztah mezi spalným teplem a výhřevností lze vyjádřit vztahem: [23]

$$Q_n = Q_v - 0,02442 \cdot (W + 8,94 \cdot H) \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad /18/$$

kde:

Q_v – spalné teplo (HHV) (MJ.kg⁻¹)

W – hmotnostní obsah vody (% hm.)

H – hmotnostní obsah vodíku (% hm.)

Přepočet výhřevnosti na konkrétní obsah vlhkosti

$$Q_i = \frac{100-W_i}{100-W} (Q_n + 0,02442 \cdot W_i) - 0,02442 \cdot W \quad [\text{MJ.kg}^{-1}] \quad /19/$$

W_i – obsah veškeré vody na kterou provádíme přepočet (% hm.)

W – obsah vody v původním vzorku (% hm.)

Q_n – výhřevnost původního vzorku za dané vlhkosti W obsahu (MJ.kg⁻¹)

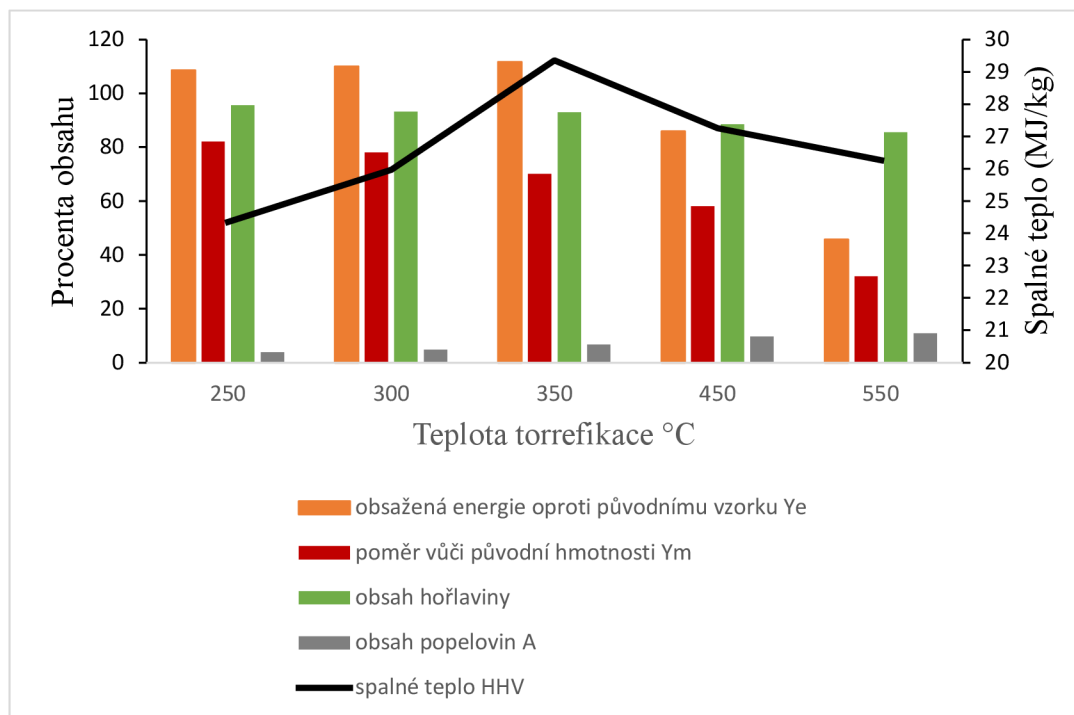
Q_i – výhřevnost při daném obsahu (MJ.kg⁻¹)

Výpočet poměru obsažené energie oproti původnímu vzorku Y_e, jedná se o součin výtěžnosti biouhli Y_m s poměrem hodnot spalného tepla biouhli a vysušeného mláta. [16]

$$Y_e = Y_m \cdot \frac{\text{spalné teplo biouhli}}{\text{spalné teplo mláta}} \quad [\%] \quad /20/$$

Tento poměr stanovujeme pro jednodušší interpelaci výsledků, které dokážou posoudit energetickou hodnotu v závislosti na výtěžnosti.

V následujícím obrázku jsou vyneseny na levé ose hmotnostní poměry v procentech, které znázorňují obsah hořlaviny, popela, výtěžnost biouhlí z původní hmotnosti vysušeného mláta a poměr obsažené energie.



Obrázek 17 Shrnutí výsledků torrefikace (autor)

Lze konstatovat, že s vyšší teplotou torrefikace nekoreluje vyšší energetická hodnota biouhlí z důvodu malé výtěžnosti pevného zbytku. Od teplot vyšších 350 °C nedochází k vyšší koncentraci uhlíku v torrefikátu a z tohoto důvodu klesá spalné teplo úměrně ztrátě vodíku v biouhlí.

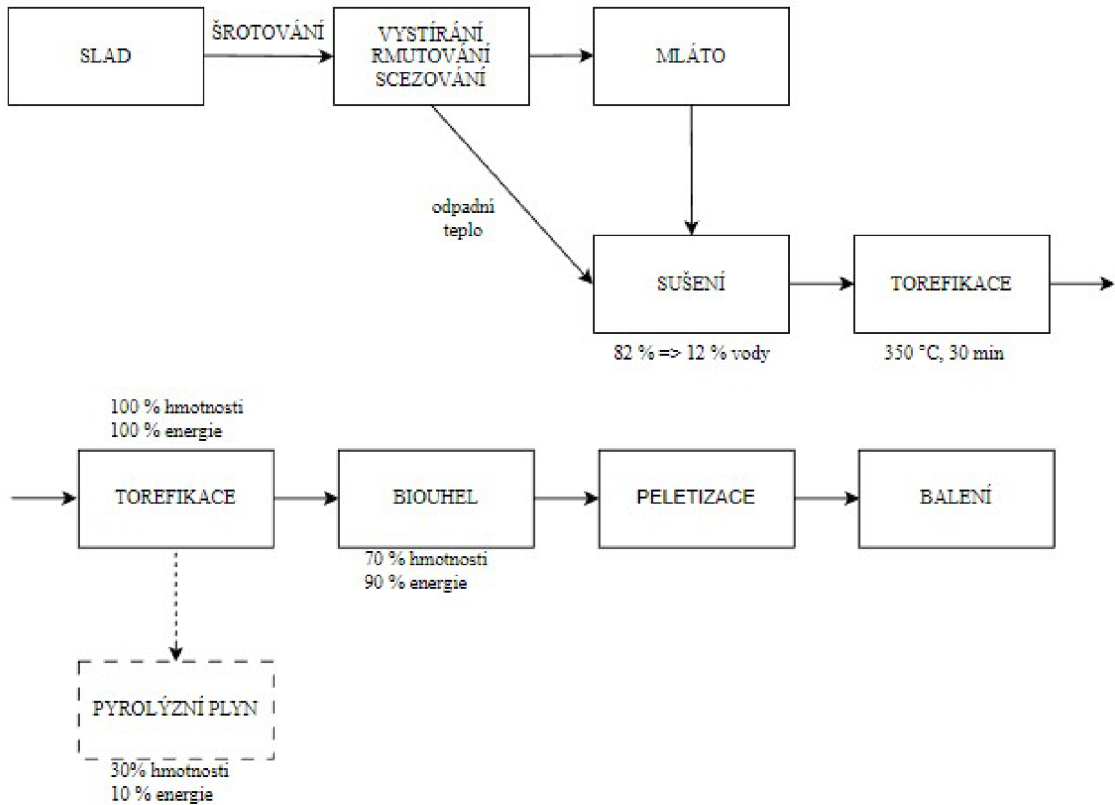
K.L.CHIN a kolektiv publikovali v roce 2013 studii vlivu doby zdržení při různých teplotách lignocelulózové biomasy. Podle jejich měření nemá zásadní vliv doba zdržení na změnu spalného tepla, ale má významný vliv na úbytku hmotnosti tuhého podílu. Rozdíl při teplotách torrefikace 300 °C byl až v rozmezí další ztráty hmotnosti oproti původnímu materiálu o dalších 5-10 % hmotnosti při rozdílu délky torrefikace 30 a 45 minut.

Z ekonomického hlediska dává větší smysl, volit při podobné výtěžnosti nižší teplotu a co nejkratší dobu zdržení, při které poměr spalného biouhlí a původního materiálu je nejvyšší. V případě torrefikace pivovarského mláta nejvyšší poměr vyšel při teplotě 350 °C, jak můžeme vidět na obrázku č. 10. [25]

4.2 Návrh linky

Linku lze rozdělit na přípravnou fázi odpadu, vlastní pyrolýzu, peletizace a balení.

Příprava odpadu se bude skládat z předsušení. Slad se šrotuje před samotným vařením piva, proto není nutné ho již dále nadrtit před samotnou pyrolýzou. Zároveň se jedná o vláknitý materiál a nepředpokládá se, že by bylo možné ho ještě dále dělit na menší částice.



Obrázek 17 Schéma procesů (autor)

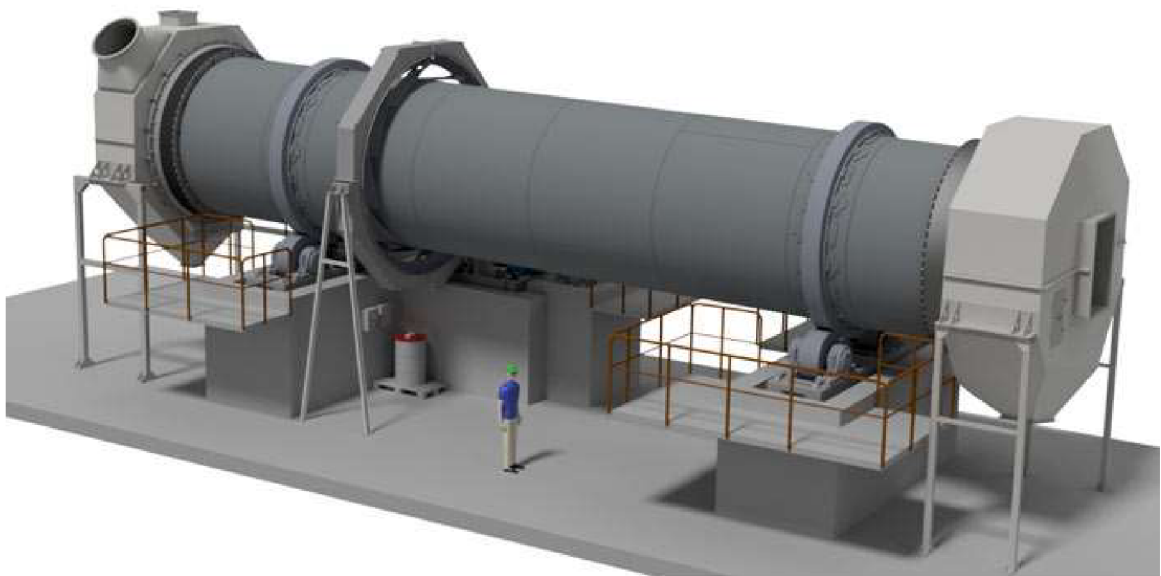
Výběr sušárny

Čerstvé mláto obsahuje vysoký obsah vody, proto je velmi důležitý vybrat vhodný typ sušárny. V dnešní době se nejčastěji používá rotační bubnová nebo disková sušárna. Jako alternativa při tak vysokém obsahu vody se nabízí lyofilizace nebo sušení v komorové sušárně. Sušení mrazem nepřipadá pro biomasu v úvahu z důvodu vysoké ceny, která se dá obhájit pouze pro sušení potravin a výrobu farmaceutik, kde přidaná hodnota kvality sušení převyšuje náklady. Sušicí komora v případě mláta má velkou nevýhodu v nerovnoměrném sušení, kdy může docházet k pálení vysušenějších částic. Dalšími nevýhodami těchto technologií je jejich prostorová náročnost. V poslední době se experimentovalo

s membránovou filtrací a následným vakuovým sušením. Tímto způsobem se dá zakonzervovat mláto až na 6 měsíců při vlhkosti mezi 20 až 30 % na čerstvém vzduchu. [20]

Rotační bubnová sušárna

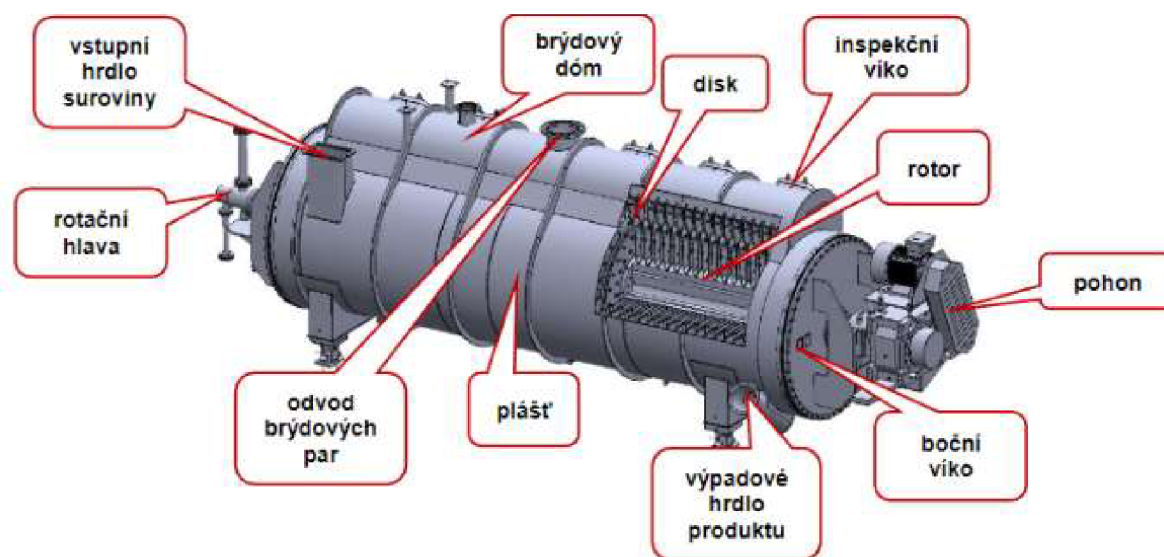
Jedná se o kontinuálně pracující zařízení, jehož hlavní částí je rotující buben, který je nakloněn, aby docházelo k posunu materiálu směrem k výpadu. Buben je umístěn na vodících kladkách, které umožňují pomocí převodu otáčení bubnu. Při otáčení bubnu se sušený materiál přesypává, během pádu přichází do kontaktu se sušicím vzduchem, který proudí protisměrně. Nejčastěji sušicím médiem jsou spaliny. Součástí zařízení je z tohoto důvodu filtr pevných částic, popřípadě další technologie na úpravu spalin před vypuštěním do atmosféry. Průměr bubnu bývá v rozmezí 2 až 3 metrů a délka může dosáhnout až několik desítek metrů.



Obrázek 18 Bubnová sušárna [26]

Disková sušárna

Jedná se o nepřímý ohřev, kde jsou nejčastěji párou vyhřávané disky, které rotují ve válcovém tělese, které může být také vyhříváno. Rotací disků dochází k posouvání materiálu válcem k vývodu. Velkou výhodou této sušárny je její neustálý kontakt teplosměnné plochy se sušeným materiálem, to vede k výrazné úspoře energie. V jedné části sušárny může docházet k tvorbě lepkavé směsi. Jako prevence zapékání nánosů na disky a obvod válce slouží lopatky a rozrušovací tyče. Voda se vypařuje z povrchu a uniká ve formě brýdových par. Brýdové páry obsahují minimum nezkondenzovaných plynů, a proto je možné jejich entalpii dále využít pro energetické úspory.



Obrázek 19 Disková sušárna [27]

Podle studie provedené na nizozemské univerzitě Wageningen University & Research se pohybuje spotřeba energie na vypaření vody při sušení mláta v rozmezí viz následující tabulka. [28]

Typ sušárny	účinnost [%]	Spotřeba energie na odpaření kg vody [kJ.Kg^{-1}]
bubnová	40 - 60	6000 - 4000
disková	50 - 80	4800 - 3000

Tabulka 6 Orientační spotřeba energie sušáren [28]

Z důvodu vyšší účinnosti a nižší měrné spotřeby energie a způsobu ohřevu byla vybrána disková sušárna. Velkou výhodou je potenciální využití páry z pivovaru pro ohřev disků sušárny.

Pro výpočet spotřeby energie uvažují diskovou sušárnu s účinností 50 %, které odpovídá přibližně spotřeba 4,8 MJ.Kg¹. Počáteční vlhkost mláta je 82 % a výsledná 12 %.

Výpočet odpařené vody na 1 kg vysušeného mláta o 12% vlhkosti je zapotřebí:

$$\dot{m}_{1A} = \dot{m} \frac{1-x_{2A}}{1-x_{1A}} \quad /21/$$

$$m_{1A} = 1 \cdot \frac{1 - 0,12}{1 - 0,82} = 4,89 \text{ kg}$$

množství vody v 4,89 kg vlhkého mláta -> 4,01 kg vody

množství vody v 1 kg suchého mláta -> 0,12 kg vody

Je nutné odpařit 4,01 - 0,12 = 3,89 kg vody z mokrého mláta, abychom získali 1 kg vysušeného mláta o vlhkosti 12 %. Přibližná spotřeba energie pro získání 1 kg vysušeného mláta je 18,67 MJ. Potřebu této energie pokryje odpadní teplo pivovaru. Ohřev mladinové pánve je realizován pomocí páry, která ohřívá plášť nádoby.

Pyrolýzní jednotka [29] [30]

Na evropském a českém trhu se nevyskytují firmy, které by se zabývaly sériovou výrobou pyrolýzních jednotek pro nízké teploty za účelem výroby biouhlí pro energetické užití. Na rozdíl zplyňovacích jednotek, které jsou již v dnešní době velice žádaným zařízením pro výrobu bioplynu nejčastěji z dřevní biomasy za účelem výroby elektrické energie. Na základě měření, kdy byly simulovány různé teploty nízkoteplotní pyrolýzy byla vybrána jako nejúčinnější teplotu pyrolýzy 350 °C, při které má výsledný biouhel nejvyšší energetickou hodnotu, nejvyšší spalné teplo a výhřevnost a zároveň nedochází k velké ztrátě hmotnosti, tedy i největší výtěžnosti. Při vyšších teplotách byla ztráta hmotnosti výsledného produktu vysoká, nemluvě o vyšší spotřebě energie na dosažení těchto teplot. Proto byla vybrána experimentální pyrolýzní jednotka od firmy SMS CZ s.r.o., která je navržena pro teploty od 250 do 350 °C. Tato firma se zabývá zejména výrobou zemědělských strojů a zároveň zakázkovou výrobou spaloven, mezi které můžeme zařadit i experimentální pece pro termické zpracování bioodpadů.

Pyrolýzní jednotka se skládá z dávkovače, spalovací pece opatřené topným tělesem a zásobní nádobou, ve které dochází k vychladnutí produktu. Vzhledem k nízké teplotě torrefikace, která nedosahuje hodnot zápalné teploty, nehrozí samovolné vznícení produktu v atmosféře a není tedy nutné chlazení ve zvláštní atmosféře.

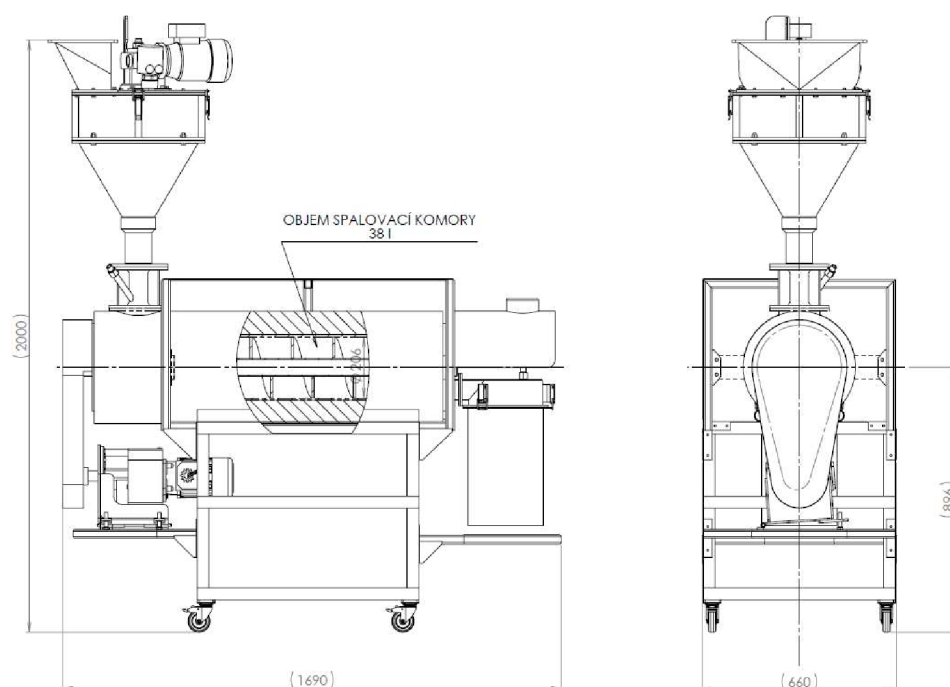
Dávkovač se skládá ze zásobníku, který je opatřen horizontálním šnekem, který je poháněn elektrickým motorem s převodovkou. Doprava materiálu v peci je zajištěna spirálovým podavačem s vlastním pohonem. Vzhledem k nízké rychlosti posunu materiálu peci je podavač poháněn přes vloženou planetovou převodovku.

Pro dosažení pracovní teploty v peci slouží tři odporová elektrická otopná tělesa o napětí 230 V a příkonu 1,7 kW. Otopná tělesa jsou umístěna v prostoru mezi tělesem pece a vnějším kovovým pláštěm. Tento plášť z důvodu bezpečnosti je obalen tepelnou izolací. Součástí pece je šroubení pro připojení tlakové lahve s dusíkem.

Pyrolýzní jednotka se ovládá pomocí intervalového časového relé, které je nutno manuálně nastavit. Celá jednotka je umístěna na rámu, který umožňuje naklonění celé jednotky až o 10 °.

Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách i při nízkých teplotách torrefikace vzniká sice malé množství pyrolýzního plynu, ale tento plyn obsahuje hořlavinu, proto se nesmí vypouštět do atmosféry. Tento plyn se nebude spalovat přímo v generátoru, který by byl součástí pyrolýzní linky a bude se pouze jímat pro další zpracování mimo linko. Energie obsažená v plynu může být až 10% původní energie obsažené v biomase. Při dalším vývoji torrefikačních jednotek se nabízí využití tepla k ohřevu pece a tím i zvýšení celkové účinnosti.

Teoretická výkonnost reaktoru je stanovena na základě objemu spalovacího prostoru a 30minutového zdržení materiálu v peci na 20 kg.hod⁻¹ biouhlí. Tomu odpovídá přibližně potřeba 25 kg.hod⁻¹ vysušeného mláta. Při 24hodinovém provozu by měla být jednotka schopná torrefikovat až 480 kg biouhlí. To znamená, že je potřeba vysušit na 24hodinový provoz pece 3 tuny čerstvého pivovarského mláta.



Obrázek 20 Pyrolýzní jednotka od firmy SMS s.r.o. [30]

Peletovací stroj

Velikost pelet bude standartní rozměr průměr 6 mm a délka 35 mm. Pro účely linky bude postačovat malý peletovací stroj (obrázek 22) z důvodu nízké pořizovací ceny. Jeho výkonnost se pohybuje 100-150 kg za hodinu v závislosti na materiálu. Pelety budou vypadávat do násypky pytlovacího stroje odkud budou dopravovány šnekovým dopravníkem do zásobníku automatické váhy.



Obrázek 21 Peletovací stroj [31]

Pytlovací stroj

Z ekonomického hlediska nedává smysl pořizovat automatickou balicí linku. Tyto linky se využívají pro výkonnosti až několika tun za hodinu a jejich pořizovací cena by byla obdobná jako pyrolýzní jednotky. Velikost pytlů se bude pohybovat mezi 15-25 kg. Pro účely balení byl vybrán poloautomatický pytlovací stoj s vlastní automatickou vahou.

Celou linku bude pouze jeden člověk, který bude mít za úkol doplňovat nasytku pyrolýzní jednotky a následně vyprazdňovat nádobu ve které se bude vzduchem dochlazovat biouhel. Následně ji přesype do peletizačního stroje. Vyrobené pelety se dále naváží na požadovanou hmotnost a pomocí ručního pytlovacího stroje (obrázek 21) se zabalí a připraví k expedici.



Obrázek 22 Pytlovací váha [32]

4.3 Ekonomické zhodnocení

Součástí každého návrhu nové technologie by mělo být jeho ekonomické zhodnocení. Pro obhajitelnost investice je nutné provést investiční plán a posoudit jeho smysl.

Cena čerstvého mláta s obsahem 20 % sušiny se pohybuje od 1360 do 1450 Kč za tunu bez DPH. Vysušené mláto se na českém trhu prodává za cenu 8500 Kč za tunu bez DPH. [33] [34]

Investiční náklady

Vzhledem k tomu, že se jedná o prototyp pyrolýzní jednotky, tak její cena byla stanovena na základě odhadu nákladů na materiál, práci a marži firmy na 500 000 Kč. Životnost této linky není v praxi ověřena, pro zjednodušení bude uvažovaná dolní hranice životnosti 10 let, přestože očekávaná životnost bude nejspíše vyšší.

Cena za kompletní linku je 1 000 000 Kč, v ceně je zahrnuto zařízení diskové sušárny, pyrolýzní jednotky, peletovacího a pytlovacího stroje a doprava a manipulace při instalaci.

Odpisy

Účetní odpisy slouží k přehledu o skutečné výši hodnoty majetku a jeho opotřebení v důsledku užívání nebo zaostávání po technické stránce. Daňové odpisy slouží ke stanovení daně z příjmů. Daňové odpisy se řídí zákonem č. 582/1992 Sb., o daních z příjmů a tento povoluje daňově odepisovat buď rovnoměrně na základě stanovených úrokových sazeb nebo zrychleně. Podle přílohy zákona lze výrobní linku zařadit do třetí odpisové skupiny a je možné ji odepisovat po dobu 10 let. Byl vybrán rovnoměrný typ odpisu. Tedy výše odpisu za první rok bude 55 000 Kč a 105 000 Kč následující roky až do roku 2031.

Úvěr

Pro financování investice byl vybrán bankovní úvěr. Výše úvěru bude ve výši celé investice, tedy 1 000 000 Kč. Základní repo sazba je stanovena ČNB na 7 %. To znamená, že například u komerční banky, lze získat firemní krátkodobý úvěr s 8 % úrokovou sazbou. Výše roční splátky se vypočítá:

$$S = U \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad /22/$$

kde,

S je výše roční splátky, i je úroková míra a n délka splácení.

Splátka úvěru se skládá ze dvou částí, a to splátky ročního úroku, který je dan součinem úrokové míry a zůstatkové jistiny na počátku roku, a samotné splátky jistiny. Pouze placené úroky jdou každoročně zahrnout do nákladů firmy.

Průběh splácení půjčky					
v Kč	2023	2024	2025	2026	2027
Zůstatková hodnota na začátku	1 000 000	829 544	645 451	446 630	231 904
Anuita	250 456	250 456	250 456	250 456	250 456
Úrok	80 000	66 363	51 635	35 730	18 552
Splátka jistiny	170 456	184 093	198 821	214 726	231 904
Zůstatková hodnota na konci roku	829 544	645 451	446 630	231 904	0

Tabulka 7 Průběh splácení půjčky (zdroj: podklady KB)

Výnosy

Cena čerstvého mláta se pohybuje od 1360 do 1450 Kč za tunu bez DPH. Cena pytlovaného černého uhlí se s podobnou výhřevností se pohybuje v rozmezí 18 000 – 22 000 Kč za tunu bez DPH v závislosti na místě původu. Za účelem získání konkurenční výhody se bude biouhel prodávat za cenu 17 400 Kč bez DPH za tunu. Výnos v tomto případě bude rozdíl mezi potencionálním ziskem přímým prodejem čerstvého mláta a stanovenou cenou biouhlí. Na výrobu jedné tuny biouhlí je potřeba 6 tun čerstvého mláta. Tedy výnos z prodeje bude v prvním roce přibližně roven 9000 Kč za tunu. I přes momentálně nezvykle vysokou inflaci je prognóza ČNB na rok 2024 2,1 %, proto bude uvažována pro účely výpočtu meziroční inflaci 2,5 % po dobu 10 let.

Pivovary vyprodukují 360 tun ročně pivovarského mláta. Tuto poptávku je pyrolýzní jednotka schopna naplnit při přidruženém provozu pivovaru. Uvažujeme-li 12hodinovou pracovní dobu o 260 pracovních dnech, při které bude pyrolýzní linka v provozu 11,5 hodiny denně, tak je schopná teoreticky vyprodukovat za těchto podmínek až 60 tun biouhlí ročně.

Náklady

Náklady jsou tvořeny provozními a režijními náklady. Nejvyšší náklady na provoz činí cena elektrické energie na vytápění pece a cena dusíku, který v peci vytvoří inertní atmosféru. Cena elektrické energie pro výpočet byla 6 Kč za kWh. Dusík bude nakupován ve formě tlakových lahví. Spotřeba dusíku činí 1 litr za minutu provozu pece.

Průběh nákladů v čase je uveden v tabulce č. 8

Cash flow

Cash flow podává obraz o celkové finanční situaci konkrétní firmy za určité období. Vypovídá o tom, do jaké míry je firma schopná vytvářet peněžní prostředky a jakým způsobem je využívá. V tomto případě cash flow bude rozdíl skutečných příjmů a výdajů způsobený danou investicí. V roce 2023 došlo k přijetí úvěru a zároveň k nákupu investičního majetku, tato peněžní operace se v rámci výpočtu cash flow vyruší a proto není uvedena v tabulce.

Jak je možné vidět v tabulce č.9, CF 2 je prvních 5 let záporné, to znamená že linka není tyto roky schopná generovat dostatek financí na splácení jistiny úvěru. Tedy firma bude muset získat finance pro financování úvěru jinde.

ČSH

Čistá současná hodnota (ČSN) je metoda používaná pro hodnocení výnosnosti investice. Tato metoda konsoliduje všechny pozitivní a negativní peněžní toky během projektu a převádí je na současnou hodnotu. ČSH je součet diskontovaného cash flow celého projektu. Je-li hodnota ČSH záporná znamená to, že je investice nedává smysl. [35]

Vypočte se jako:

$$ČSH = \sum_{n=0}^n \frac{CF_n}{(1+r)^n} \quad /23/$$

kde:

CF je finanční tok za každý rok (cash flow)

n je očekávaná životnost investice

r je diskont (úroková míra)

Tato úroková míra je požadovanou úrokovou mírou investice V tomto případě byla zvolena úroková míra 10,5 %

ČSH je na konci životnosti kladná, a proto lze investici požadovat za smysluplnou.

Doba návratnosti investice

Dobu návratnosti můžeme určit jako rok, ve kterém kumulovaný provozní cash flow přesáhne hodnotu původní investice. To se stane přibližně po 6 a půl letech provozu.

Náklady										
v Kč	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
spotřeba elektrické energie	93600	95 940	98 338	100 796	103 316	105 899	108 546	111 260	114 041	116 892
spotřeba dusíku	179 400	183 885	188 482	193 194	198 024	202 975	208 049	213 250	218 581	224 046
náklady na služby	24 960	25 584	26 224	26 880	27 552	28 241	28 947	29 671	30 413	31 173
náklady na opravu a údržbu a ost. náklady	40 000	41 000	42 025	43 076	44 153	46 361	48 679	51 113	53 669	56 352
osobní náklady	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
odpisy	55 000	105 000	105 000	105 000	105 000	105 000	105 000	105 000	105 000	105 000
placené úroky	80 000	66 363	51 635	35 730	18 552	0	0	0	0	0
náklady celkem	472 960	517 772	511 704	504 676	496 597	488 476	499 221	510 294	521 704	533 463

Tabulka 8 Průběh nákladů v čase (autor)

Cash flow										
v Kč	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Výnosy	540 000	553 500	567 338	581 521	596 059	610 960	626 234	641 890	657 937	674 385
Hospodářský výsledek	67 040	35 728	55 634	76 845	99 462	122 484	127 013	131 596	136 233	140 922
Daň ze zisku	12 738	6 788	10 570	14 601	18 898	23 272	24 132	25 003	25 884	26 775
Čistý HV	54 302	28 940	45 064	62 244	80 564	99 212	102 881	106 593	110 349	114 147
CF 1	109 302	133 940	150 064	167 244	185 564	204 212	207 881	211 593	215 349	219 147
Splátka jistiny úvěru	170 456	184 093	198 821	214 726	231 904	0	0	0	0	0
CF 2	-61 154	-50 153	-48 757	-47 482	-46 340	204 212	207 881	211 593	215 349	219 147
ČSH	-815 461	-716 190	-615 536	-514 019	-412 085	-310 567	-217 044	-130 897	-51 552	21 520

Tabulka 9 Cash flow a čistá současná hodnota dle vzorce /23/ (autor)

SWOT matice

Jedná se o součást strategického plánování. Je to metoda, pomocí které lze identifikovat silné a slabé stránky, příležitosti a hrozby, které jsou spojeny obecně s firmou samotnou nebo jejím podnikatelským záměrem. Silné a slabé stránky jsou faktory, které můžeme činností ovlivnit, na rozdíl od příležitostí a hrozeb, které přicházejí z makroprostředí. Komplexně můžeme vyhodnotit z různých úhlů pohledu [36]

S – Silné stránky

- Energetické využití obnovitelného zdroje energie
- Hygienická nezávadnost produktu
- Alternativní využití aktivace biouhli pro zapravení do půdy

W – Slabé stránky:

- V současné době vysoké náklady
- Vysoká energetická náročnost
- Malý objem výroby

O – Příležitosti:

- Možná budoucí státní podpora do vývoje technologie
- Potencionální spalování v dnešních uhelných elektrárnách
- Vývoj technologie ve velkém měřítku

T – Ohrožení:

- Zvýšení ceny elektrické energie
- Nedostatečná vládní podpora

5 Diskuse a závěr

Cílem práce byl návrh technologie nízkoteplotní pyrolýzy na využití pivovarnického mláta. Toho bylo dosaženo výběrem vhodné technologie, pomocí literární rešerše, kde jsou uvedeny současné pyrolýzní technologie a jejich použití. Dále byla popsána úprava vstupní biomasy a byly stanoveny provozní parametry pyrolýzní jednotky. Provozní parametry byly určeny na základě elementární analýzy vyrobeného torrefikátu z pivovarnického mláta pomocí termogravimetrického analyzátoru. Vzorky byly torrefikovány za teplot 250, 300, 350, 450 a 500 °C. Podle elementárního složení a obsahu popela bylo stanoveno spalné teplo a výhřevnost. Jako nejvýhodnější byla určena teplota 350 °C, při které obsažená energie v produktu k poměru původní biomasy byla nejvyšší. Při zpracování při této teplotě je hodnota spalného tepla nejvyšší. Při vyšších teplotách nedocházelo k výrazně většímu zachování uhlíku v torrefikátu a současně se dále snižoval obsah vodíku, který uniká ve formě prchavé hořlaviny. To mělo za následek snížení spalného tepla. Ostatní autoři, kteří se zabývali technologií nízkoteplotní pyrolýzy došli k závěru, že optimální teplota se různí podle hmotnostního obsahu celulózy, hemicelulózy a ligninu. Tyto látky se přeměňují při různých teplotách. Zpravidla lze říct, že rychlost přeměny je větší se stoupající teplotou. Pro většinu biomasy se ideální teplotní rozsah jeví mezi 200–350 °C. [11]

Reakční doba byla zvolena na základě článků [25] a [37]. V něm autoři zkoumali různé vydržovací teploty pro různé vstupní biomasy. Výsledkem jejich práce je téze, že materiály vhodné pro zpracování při nižších teplotách 200-280 °C potřebovali delší reakční dobu (45-60 min) k přeměně na biouhel, než ostatní biomasa zpracovávaná v rozmezí 300-350 °C, kdy doporučená reakční doba je 30 min. Při delší reakční době na těchto teplotách docházelo k vyššímu úniku prchavé hořlaviny a tím došlo k nežádoucímu snížení hmotnosti torrefikátu.

Současná cena elektrické energie značně prodražuje náklady na vytápění pece. Potřebné množství dusíku na vytvoření inertní atmosféry není nezanedbatelné a výrazně se odráží v nákladech na provoz. Úkolem budoucího vývoje této technologie bude právě snaha snížit provozní náklady formou úspory tepelné energie na vytápění. V současné se v Evropě nacházejí pouze experimentální torrefikační pece na několika univerzitách. Očekává se, že se zákazem spalování fosilních paliv nastane vývoj této technologie za účelem prodloužení životnosti dnešních uhelných elektráren, ve kterých by se dalo biouhlem spalovat bez větších technologických úprav, neboť biouhlem lze bez problému spalovat v konvekčních kotlích na uhlí.

Investice do navrhnuté linky je riziková, z důvodu malých výnosů a vysokých provozních nákladů, které se mohou vlivem světové ekonomiky nepředvídatelně zvyšovat. Linka není schopná během prvních 5 let generovat dostatečné zisky na splácení úvěru. Finance na placení úvěru bude muset firma získávat jinde. Po splacení úvěru se toto obrátí a linka bude zisková. Doba návratnosti se pohybuje kolem 6,5 let. Čistá současná hodnota se překlopí do kladných hodnot v posledním roce očekávané životnosti. To naznačuje, že investice dává smysl.

Možnou cestou, jak zvýšit výnosy je úvaha nad vhodností torrefikátu vyrobeného z pivovarnického mláta pro jeho aktivaci pro následné použití k zapravení do půdy. To, ale nebylo cílem této práce a muselo by se experimentálně ověřit, zda kvalita by odpovídala konvekčním materiálům, které se takto vyrábí.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] EAGRI: Výhledová zpráva [online]. 2022 [cit. 2023-03-11]. Dostupné z: https://eagri.cz/public/web/file/715991/Chmel_2022_Web.pdf
- [2] Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů.
- [3] JUNGA, Petr, Tomáš VÍTEZ a Petr TRÁVNÍČEK. Technika pro zpracování odpadů II. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2015. ISBN 978-80-7509-208-3.
- [4] JEVIČ, Petr, Petr HUTLA a Zdeňka ŠEDIVÁ. Možnosti energetického využití kompostů a separátů z anaerobního zpracování biomasy [online]. Praha, 2013 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://www.vuzt.cz/publikace/2014/081.pdf>. VÚZT, v.v.i.
- [5] MUŽÍK, Oldřich, SLEJŠKA, Antonín: Možnosti využití anaerobní fermentace pro zpracování zbytkové biomasy. Biom.cz [online]. 2003-07-14 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/moznosti-vyuziti-anaerobni-fermentace-pro-zpracovani-zbytkove-biomasy>>. ISSN: 1801-2655.
- [6] REINHART D. R., 1993, A review of recent studies on the sources of hazardous compound semitted from solid waste landfils. A U.S. experience – Waste Management and Research (11): 257-268, ISSN: 1096-3669.
- [7] MALAŤÁK, Jan a Petr VACULÍK. Biomasa pro výrobu energie. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2008. ISBN 978-80-213-1810-6
- [8] BALÁŠ, Marek. ENERGIE Z BIOMASY XX: Spalné teplo a složení biopaliv a bioodpadů. Brno: VUT v Brně, 2018. ISBN 978-80-214-5825-3.
- [9] PIPÍŠKA, Martin a Vladimír FRIŠŤÁK Biouhlie v manažmente životného prostredia I: technológia produkcie, štruktúra a vlastnosti. Trnava: Trnavská univerzita v Trnavě, 2020. ISBN 978-80-568-0352-3
- [10] BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis – Practical Design and Theory. B.m.: Elsevier, 2010, s. 65-96. ISBN 978-0-12-374988-8.
- [11] PENNSTATE: Alternative Fuels from Biomass Sources [online]. 2017 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.e-education.psu.edu/egee439/node/537>

- [12] SPRENKELS, K., H. KLOOSTERMAN a P. DE WILD. Plastic waste recycling and valorisation via dedicated pyrolysis approaches [online]. [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: 2018. Projekt. Rijksuniversiteit Groningen.
- [13] BASKAR, Chinnappan, Shikha BASKAR a Ranjit S. DHILLON. Biomass Conversion: The interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science. Springer, 2012. ISBN 978-3-642-28417-5.
- [14] STEPIEŇ, PAVEL, PULKA, Jakub a BIALOWIEC, Andrzej. (2017). Organic Waste Torrefaction – A Review: Reactor Systems, and the Biochar Properties. 10.5772/67644.
- [15] European Biochar Certificate [online]. 2022 [cit. 2022-11-20]. Dostupné z: <https://www.european-biochar.org/en>
- [16] Poudel, Jeeban & Karki, Sujeeta & Oh, Sea. (2018). Valorization of Waste Wood as a Solid Fuel by Torrefaction. Energies. 11. 1641. 10.3390/en11071641.
- [17] FUNKE, Axel a Felix ZIEGLER. Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. John Wiley & Sons, 2010, 2(4), 160-177. Dostupné z: doi:10.1002/bbb.198
- [18] MALAŤÁK, Jan. Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové a kalamitní těžby. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2020
- [19] KNOEF H. A. M.: Handbook biomass gasification second edition. BTG biomass technology group BV, Nehterlands, 2012.
- [20] MUSSATTO, S.I., G. DRAGONE a Roberto ROBERTO. Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. Journal of Cereal Science. 1-14. ISSN 0733-5210. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
- [21] Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Coal: Instrument: CHN628 [online]. 2013 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: https://eu.leco.com/images/Analytical-Application-Library/CHN628_COAL_203-821-403.pdf

- [22] LECO [online]. 2022 [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <https://cz.leco.com/product/tga801>
- [23] OBROUČKA, Karel. Termické zneškodňování odpadů. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1997. ISBN 8070785055
- [24] MIKLÍK, Tomáš. Odsíření spalin fluidního kotle. [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2009.
- [25] CHIN, K.; H'NG, P.; GO, W.; WONG, W.; LIM, T.; MAMINSKI, M.; PARIDAH, M.; LUGMAN, A. Optimization of torrefaction conditions for high energy density solid biofuel from oil palm biomass and fast growing species available in Malaysia. *Ind. Crops Prod.* 2013, 49, 768–774
- [26] IKN: Základní typy bubnových sušáren [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://iknczech.cz/produkty/bubnove-susice-a-chladice/zakladni-typy-bubnovych-susaren/>
- [27] Prokop Technology [online]. 2019 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://prokop.cz/>
- [28] DEVENTER, Henk van, Juliën VOOGT a Theo VERKLEIJ. New Application of Brewers Spent Grain for Food [online]. Wageningen, 2020 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://edepot.wur.nl/529917>
- [29] SMS s.r.o. [online]. [cit. 2023-03-04]. Dostupné z: <http://www.sms-technology.cz/cz/fotogalerie/spalovny/>
- [30] BARBORA, Tamelová, Kraus KAMIL a Velebil JAN. Vývoj technologie stabilizace digestátu z výroby bioplynu pomocí degradabilní organické matrice pro účely strojní fertilizace půdy. Praha, 21019. Průběžná zpráva k projektu. ČZU.
- [31] KOVONOVÁK: Profesionální linky na výrobu pelet [online]. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.moneta.cz/slovník-pojmu/detail/cista-soucasna-hodnota>
- [32] Zemědělské potřeby: Pytlovací váha na pytle a velkoobjemové vaky Big Bag se šnekovým dopravníkem [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.eshop-zemedelske-potreby.cz/pytlovací-vaha-na-pytle-a-velkoobjemove-vaky-big-bag-se-snekovym-dopravníkem-p57122/?cid=410>

- [33] ČMSZP: Nabídka na nákup pivovarského mláta [online]. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://cmszp.cz/cschms/2018/nabidka-na-nakup-pivovarskeho-mlata/>
- [34] OPTIMTOP: Pytlované, balené uhlí [online]. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.optimtop.cz/uhli/praha/>
- [35] MONETA: Co je čistá současná hodnota? [online]. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.moneta.cz/slovník-pojmu/detail/cista-soucasna-hodnota>
- [36] KOTLER, Philip a Gary ARMSTRONG. Marketing. Praha: Grada, c2004. ISBN 80-247-0513-3.
- [36] CHEN, Wei-Hsin, Bo-Jhih LIN a Yu-Ying LIN. Progress in Energy and Combustion Science. Progress in Energy and Combustion Science [online]. 2021, 2021(82) [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- [37] ORISALYE JI, JEKAYINFA SO, PECENKA R, OGUNDAREAA, AKINSELYIN MO, FADIPE OL. Investigation of the Effects of Torrefaction Temperature and Residence Time on the Fuel Quality of Corncobs in a Fixed-Bed Reactor. *Energies*. 2022; 15(14):5284. <https://doi.org/10.3390/en15145284>

7 Přílohy

Příloha č.1 - Výsledky měření CHN

628 SERIES

Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato	46.147	6.9013	2.9366	0.1077	53.069	7.8772	3.2614	12/16/2022 1:25:49 PM	
Mlato	46.151	6.9239	3.0836	0.1013	49.920	7.4334	3.2212	12/16/2022 1:30:21 PM	
Mlato	46.358	7.1162	3.1231	0.1020	50.243	7.4224	3.2849	12/16/2022 2:06:42 PM	
Mlato	46.244	7.0926	3.1293	0.1015	50.105	7.3295	3.2753	12/16/2022 2:38:31 PM	
Mlato	46.174	7.0911	3.0466	0.1020	50.426	7.3503	3.2045	12/16/2022 3:10:21 PM	
Average	46.215	7.0250	3.0638	0.1029	50.753	7.4825	3.2495		
Std. Deviation	0.0890	0.10341	0.07855	0.003	1.3081	0.22511	0.03497		
RSD	0.193	1.472	2.564	2.625	2.577	3.008	1.076		

Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato 250C	58.264	6.2742	4.1753	0.1066	66.319	7.0883	4.5898	12/16/2022 1:34:53 PM	
Mlato 250C	58.239	6.4246	4.1438	0.1013	62.687	6.6550	4.3286	12/16/2022 2:11:15 PM	
Mlato 250C	58.046	6.4897	4.2380	0.1024	63.451	6.7660	4.4752	12/16/2022 2:43:04 PM	
Mlato 250C	58.082	6.5037	4.1113	0.1024	63.679	6.7678	4.3413	12/16/2022 3:14:54 PM	
Average	58.158	6.4231	4.1671	0.1032	64.034	6.8193	4.4337		
Std. Deviation	0.1097	0.10503	0.05405	0.002	1.5813	0.18695	0.12338		
RSD	0.189	1.635	1.297	2.269	2.469	2.742	2.783		

Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato 300C	63.298	5.9741	4.6680	0.1005	67.717	6.2696	4.8377	12/16/2022 1:43:57 PM	
Mlato 300C	63.823	6.1434	4.7053	0.0990	67.137	6.2193	4.8036	12/16/2022 2:15:47 PM	
Mlato 300C	63.185	6.1105	4.6730	0.1027	69.270	6.3893	4.9489	12/16/2022 2:47:36 PM	
Mlato 300C	63.178	6.1574	4.6509	0.1055	71.364	6.6015	5.0598	12/16/2022 3:19:27 PM	
Average	63.371	6.0964	4.6743	0.1019	68.872	6.3699	4.9125		
Std. Deviation	0.3061	0.08386	0.02273	0.003	1.8897	0.17006	0.11615		
RSD	0.483	1.376	0.486	2.773	2.744	2.670	2.364		

Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato 350C	71.145	5.1169	5.4446	0.1033	78.232	5.5196	5.7997	12/16/2022 1:48:30 PM	
Mlato 350C	71.605	5.2385	5.4850	0.1034	78.671	5.5389	5.8484	12/16/2022 2:20:20 PM	
Mlato 350C	70.612	5.2539	5.4150	0.1005	75.754	5.3759	5.6119	12/16/2022 2:52:10 PM	
Mlato 350C	71.157	5.2382	5.4519	0.1012	77.100	5.3871	5.6895	12/16/2022 3:24:00 PM	
Average	71.130	5.2119	5.4491	0.1021	77.439	5.4554	5.7374		
Std. Deviation	0.4061	0.06376	0.02872	0.001	1.3040	0.08576	0.10686		
RSD	0.571	1.223	0.527	1.442	1.684	1.572	1.862		

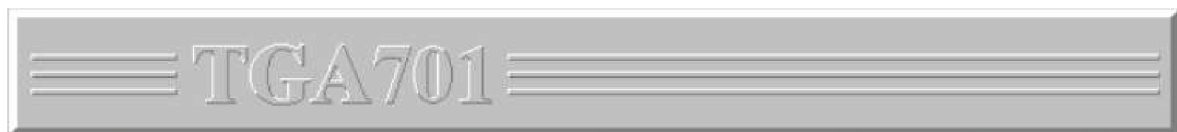
Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato 450C	73.109	3.4579	5.5138	0.1000	77.824	3.6109	5.6858	12/16/2022 1:53:04 PM	
Mlato 450C	73.340	3.5157	5.4681	0.1021	79.564	3.6705	5.7571	12/16/2022 2:24:52 PM	
Mlato 450C	72.990	3.5206	5.5074	0.1030	80.253	3.6919	5.8496	12/16/2022 2:56:44 PM	
Mlato 450C	73.169	3.5366	5.5012	0.1010	79.124	3.6300	5.7296	12/16/2022 3:28:33 PM	
Average	73.152	3.5077	5.4976	0.1015	79.191	3.6508	5.7555		
Std. Deviation	0.1456	0.03439	0.02033	0.001	1.0231	0.03701	0.06926		
RSD	0.199	0.980	0.370	1.285	1.292	1.014	1.203		

Name	Carbon %	Hydrogen %	Nitrogen %	Mass	Carbon mg	Hydrogen mg	Nitrogen mg	Analysis Date	Comments
Mlato 550C	74.385	2.6235	5.3214	0.0996	78.866	2.7286	5.4655	12/16/2022 1:57:37 PM	
Mlato 550C	74.985	2.6742	5.4298	0.1025	81.668	2.8029	5.7392	12/16/2022 2:29:26 PM	
Mlato 550C	74.878	2.6624	5.3978	0.1021	81.609	2.7676	5.6831	12/16/2022 3:01:18 PM	
Mlato 550C	73.924	2.6288	5.2945	0.1021	80.810	2.7276	5.5743	12/16/2022 3:33:05 PM	
Average	74.543	2.6472	5.3609	0.1016	80.738	2.7567	5.6155		
Std. Deviation	0.4886	0.02490	0.06347	0.001	1.3083	0.03603	0.12121		
RSD	0.655	0.941	1.184	1.309	1.620	1.307	2.158		

Příloha č.2 - Výsledky měření obsahu síry

628 SERIES			
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato	0.2080	0.2533	12/20/2022 1:56:19 PM
Mlato	0.2361	0.2455	12/20/2022 2:20:24 PM
Mlato	0.2333	0.2465	12/20/2022 2:40:57 PM
Average	0.2258	0.2485	
Std. Deviation	0.01550	0.00425	
RSD	6.865	1.711	
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato 250C	0.2297	0.2705	12/20/2022 1:59:14 PM
Mlato 250C	0.2412	0.2636	12/20/2022 2:23:28 PM
Mlato 250C	0.2414	0.2678	12/20/2022 2:43:58 PM
Average	0.2374	0.2673	
Std. Deviation	0.00674	0.00346	
RSD	2.837	1.294	
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato 300C	0.1871	0.2210	12/20/2022 2:03:49 PM
Mlato 300C	0.1735	0.1919	12/20/2022 2:26:04 PM
Mlato 300C	0.1811	0.2137	12/20/2022 2:45:55 PM
Average	0.1806	0.2089	
Std. Deviation	0.00682	0.01511	
RSD	3.776	7.232	
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato 350C	0.1249	0.1511	12/20/2022 2:08:26 PM
Mlato 350C	0.1333	0.1665	12/20/2022 2:28:57 PM
Mlato 350C	0.1523	0.1569	12/20/2022 2:48:48 PM
Average	0.1368	0.1582	
Std. Deviation	0.01405	0.00773	
RSD	10.27	4.889	
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato 450C	0.0978	0.1115	12/20/2022 2:12:02 PM
Mlato 450C	0.0990	0.1047	12/20/2022 2:31:21 PM
Mlato 450C	0.1107	0.1387	12/20/2022 2:51:24 PM
Average	0.1025	0.1183	
Std. Deviation	0.00712	0.01797	
RSD	6.950	15.19	
Name	Sulfur %	Sulfur mg	Analysis Date
Mlato 550C	0.0804	0.0976	12/20/2022 2:14:07 PM
Mlato 550C	0.0720	0.0940	12/20/2022 2:34:42 PM
Mlato 550C	0.0929	0.1140	12/20/2022 2:53:48 PM
Average	0.0818	0.1019	

Příloha č.3 - Výsledky měření TGA (vlhkost a obsah popela)



Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	7.06	2.85	3.07	12/16/2022 5:03:33 PM	0.9500	0.8830		0.0271
Mlato	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	7.03	2.84	3.06	12/16/2022 5:03:33 PM	0.8730	0.8117		0.0248
Mlato	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	7.00	2.82	3.03	12/16/2022 5:03:33 PM	0.9438	0.8778		0.0266
Average		7.0284	2.8372	3.05		0.9223			
Std. Deviation		0.03013	0.01498	0.017		0.04			
RSD		0.429	0.528	0.559		4.641			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 250C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.44	3.89	3.91	12/16/2022 5:03:33 PM	1.0097	1.0053		0.0393
Mlato 250C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.46	3.89	3.91	12/16/2022 5:03:33 PM	0.9896	0.9851		0.0385
Mlato 250C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.47	3.93	3.94	12/16/2022 5:03:33 PM	0.9558	0.9513		0.0375
Average		0.4570	3.9026	3.92		0.9850			
Std. Deviation		0.01609	0.02011	0.021		0.03			
RSD		3.522	0.515	0.526		2.766			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 300C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.91	4.63	4.72	12/16/2022 5:03:33 PM	0.9832	0.9644		0.0456
Mlato 300C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.89	4.60	4.69	12/16/2022 5:03:33 PM	1.0555	1.0355		0.0485
Mlato 300C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.90	4.65	4.74	12/16/2022 5:03:34 PM	0.9844	0.9657		0.0457
Average		1.9020	4.6264	4.72		1.0077			
Std. Deviation		0.01071	0.02484	0.026		0.04			
RSD		0.563	0.537	0.544		4.104			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 350C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.02	6.77	6.77	12/16/2022 5:03:34 PM	0.9124	0.9122		0.0617
Mlato 350C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.07	6.69	6.69	12/16/2022 5:03:34 PM	1.0121	1.0114		0.0677
Mlato 350C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.10	6.67	6.68	12/16/2022 5:03:34 PM	1.0237	1.0227		0.0683
Average		0.0639	6.7077	6.71		0.9827			
Std. Deviation		0.04183	0.05162	0.049		0.06			
RSD		65.48	0.770	0.728		6.229			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 450C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.69	9.48	9.64	12/16/2022 5:03:34 PM	0.8010	0.7875		0.0759
Mlato 450C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.71	9.39	9.56	12/16/2022 5:03:34 PM	0.8537	0.8391		0.0802
Mlato 450C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	1.71	9.48	9.64	12/16/2022 5:03:34 PM	0.9495	0.9333		0.0900
Average		1.7037	9.4501	9.61		0.8681			
Std. Deviation		0.01316	0.04849	0.049		0.08			
RSD		0.772	0.513	0.506		8.672			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 550C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	3.64	10.37	10.76	12/16/2022 5:03:34 PM	0.6238	0.6011		0.0647
Mlato 550C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	3.62	10.49	10.88	12/16/2022 5:03:34 PM	0.7002	0.6749		0.0735
Mlato 550C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	3.70	10.34	10.74	12/16/2022 5:03:34 PM	0.6893	0.6639		0.0713
Average		3.6529	10.4010	10.80		0.6711			
Std. Deviation		0.03837	0.07827	0.078		0.04			
RSD		1.050	0.753	0.721		6.162			

TGA701

Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	7.05	2.84	3.06	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5103	0.4743		0.0145
Mlato	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	7.09	2.76	2.97	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5021	0.4665		0.0139
Average		7.0685	2.8015	3.01		0.5062			
Std. Deviation		0.03034	0.05864	0.062		0.006			
RSD		0.429	2.093	2.061		1.146			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 250C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.76	3.89	3.92	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5039	0.5001		0.0196
Mlato 250C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.75	3.96	3.99	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5277	0.5237		0.0209
Average		0.7537	3.9262	3.96		0.5158			
Std. Deviation		0.01008	0.05388	0.054		0.02			
RSD		1.337	1.372	1.362		3.259			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 300C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	2.07	4.66	4.76	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5250	0.5141		0.0244
Mlato 300C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	2.09	4.66	4.76	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5710	0.5591		0.0266
Average		2.0787	4.6582	4.76		0.5480			
Std. Deviation		0.01035	0.00221	0.003		0.03			
RSD		0.498	0.047	0.058		5.936			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 350C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.70	6.68	6.72	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5082	0.5046		0.0339
Mlato 350C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	0.76	6.64	6.69	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5269	0.5229		0.0350
Average		0.7308	6.6571	6.71		0.5175			
Std. Deviation		0.03885	0.02792	0.025		0.01			
RSD		5.316	0.419	0.380		2.555			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 450C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	2.19	9.36	9.57	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5077	0.4966		0.0475
Mlato 450C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	2.22	9.28	9.49	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5601	0.5476		0.0520
Average		2.2044	9.3194	9.53		0.5339			
Std. Deviation		0.02724	0.05196	0.050		0.04			
RSD		1.236	0.558	0.530		6.945			
Name	Method	Moisture	Ash	Ash Dry	Analysis Date	Initial Mass	Moisture Mass	Moisture 160 Mass	Ash Mass
Mlato 550C	ISO A,M bez vicka / nizke prutoky, 550, odplyneni, bez N	4.02	10.58	11.03	12/21/2022 5:19:29 PM	0.5449	0.5230		0.0577