

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra technologických zařízení staveb



Bakalářská práce

**Technika a technologie energetického využití tuhé
biomasy**

Jan Houska

© 2024 ČZU v Praze

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Houska

Technologická zařízení staveb
Zařízení v agropotravinářském komplexu

Název práce

Technika a technologie energetického využití tuhé biomasy

Název anglicky

Technique and technology of energy utilization of solid biomass

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je seznámit se s problematikou energetického využití tuhé biomasy. Provést teoretický a laboratorní rozbor vybraných vzorků biopaliv pro jejich thermochemické využití pro spalovací, zplyňovací či pyrolýzní procesy. Metodika práce vychází z určených klasifikačních, jakostních a specifikačních rámců tuhých biopaliv pro jejich energetické využití. Praktická část práce zahrnuje uskutečnit hrubý palivářský rozbor, prvkovou analýzu a stanovit stechiometrickou charakteristiku na vybraných vzorcích tuhých biopaliv.

Metodika

Bakalářská práce se bude skládat z těchto částí:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Přehled poznatků z literatury
4. Měření a dosažené výsledky
5. Diskuse a závěry
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Doporučený rozsah práce

40-50

Klíčová slova

Biopaliva, spalování, pyrolýza, zplyňování, elementární složení

Doporučené zdroje informací

Malaťák, 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

Malaťák, J.; Vaculík, P.: Biomasa pro výrobu energie. ČZU v Praze, Technická fakulta, tisk. Powerprint, Praha 2008, 206 s., ISBN: 978-80-213-1810-6

Malaťák, J.; Velebil, J.; Jankovský, M.; Tamelová, B.; Malaťáková, J.; J. Passian, L. Aplikace zplyňovacích technologií při energetickém využití jehličnatých dřevin z kůrovcové a kalamitní těžby . Praha: Lesy České republiky, s. p., Hradec Králové, 2020, 270s.

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

Předběžný termín obhajoby

2024/2025 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra technologických zařízení staveb

Elektronicky schváleno dne 21. 12. 2023

doc. Ing. Jan Malaťák, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 1. 3. 2024

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 30. 03. 2024

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**Technika a technologie energetického využití tuhé biomasy**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 30.3.2024

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Janu Malat'ákovi, Ph.D. za vedení práce, za ochotu a za odborné konzultace.

Technika a technologie energetického využití tuhé biomasy

Abstrakt

Práce se zabývá energetickým využitím tuhé biomasy. Řeší aktuální situaci na území ČR, hlavně z pohledu legislativní úpravy a norem. Dává základní přehled o technologiích a procesech pro využití tuhé biomasy.

Cílem je navrhnout technologii pro zpracování vybraných vzorků. Vzorky řepkové slámy, pšeničné slámy, smrkové štěpky a smrkové kůry pocházejí ze středních Čech. Dílčím cílem je provedení elementární analýzy těchto vzorků.

Analýza proběhla v laboratořích TF ČZU, její výsledky byly zhodnoceny podle metodiky obsažené v normě ISO 16559. Zpracování bylo navrženo s ohledem na získané výsledky.

Výsledky elementární analýzy odpovídají běžným hodnotám. Dřevní štěpku je vhodné vysušit. Pro energetické využití je vhodné z biomasy vyrobit pelety.

Klíčová slova: biomasa, biopaliva, spalování, pyrolýza, zplyňování, elementární složení, energetika, pelety

;

Technique and technology of energy utilization of solid biomass

Abstract

The thesis deals with the energy utilization of solid biomass. It deals with the current situation in the Czech Republic, mainly in terms of legislation and standards. It gives a basic overview of technologies and processes for the use of solid biomass.

The aim is to propose a technology for processing selected samples. The samples of rapeseed straw, wheat straw, spruce chips and spruce bark come from Central Bohemia. A sub-objective is to perform elementary analysis of these samples.

The analysis was carried out in the laboratories of TF ČZU and the results were evaluated according to the methodology contained in the ISO 16559 standard. The processing was designed with regard to the results obtained.

The results of the elementary analysis correspond to the normal values. The wood chips should be dried. For energy use, it is appropriate to produce pellets from the biomass.

Keywords: biomass, biofuels, combustion, pyrolysis, gasification, elemental composition, energy, pellets

Obsah

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 Úvod..... | 11 |
| 2 Cíle práce a metodika | 13 |
| 3 Teoretická východiska | 14 |
| 3.1 Legislativní úprava..... | 14 |
| 3.2 Základní pojmy a postupy podle norem..... | 15 |
| 3.2.1 Pojmy spojené s biomasou..... | 15 |
| 3.2.2 Hlavní obchodní formy a suroviny tuhých biopaliv | 16 |
| 3.2.3 Tuhá alternativní paliva | 16 |
| 3.3 Termochemické procesy | 16 |
| 3.3.1 Spalování | 16 |
| 3.3.2 Zplyňování | 17 |
| 3.3.3 Pyrolýza | 18 |
| 3.3.4 Anaerobní digesce..... | 18 |
| 3.3.5 Alkoholové kvašení | 19 |
| 3.4 Technologie..... | 19 |
| 3.4.1 Mechanická úprava | 19 |
| 3.4.1.1 Technologie výroby pelet..... | 20 |
| 3.4.1.2 Technologie výroby briket | 21 |
| 3.4.2 Technologie pro spalování..... | 23 |
| 3.4.2.1 Spalování na rošttech..... | 23 |
| 3.4.2.2 Spalování ve fluidních kotlích..... | 23 |
| 3.4.2.3 Spalování v bubnových rotačních pecích | 24 |
| 3.4.2.4 Menší zdroje tepla do 300 kW..... | 24 |
| 3.4.3 Technologie pro zplyňování | 25 |
| 3.4.4 Technologie pro pyrolýzu..... | 25 |
| 3.4.5 Bioplynové stanice – anaerobní digesce..... | 26 |
| 4 Vlastní práce..... | 27 |
| 4.1.1 Základní postup přípravy vzorků v laboratorních podmínkách..... | 27 |
| 4.2 Podstata prvkové analýzy..... | 27 |
| 4.2.1 Zkoumané vzorky | 28 |
| 4.3 Přístroje použité pro analýzu..... | 31 |
| 4.3.1 Střížný mlýn Retscg SM 100..... | 31 |
| 4.3.2 Horkovzdušná sušárna Memmert UF 30 | 31 |
| 4.3.3 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701..... | 31 |
| 4.3.4 Laboratorní váha Sartorius SP124 S..... | 32 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|-----------|
| 4.3.5 | Analyzátor LECO CHN 628..... | 33 |
| 4.3.6 | Analyzátor LECO CHN 628+S | 33 |
| 4.3.7 | Kalorimetr LECO AC-600..... | 34 |
| 4.4 | Naměřené hodnoty | 36 |
| 4.4.1 | Výsledky laboratorního měření | 36 |
| 4.5 | Návrh paletizační jednotky | 39 |
| 4.5.1 | Vhodné technologie | 39 |
| 4.5.2 | Návrh strojního zařízení..... | 42 |
| 4.5.3 | Ekonomická stránka výroby | 44 |
| 5 | Výsledky a diskuse | 48 |
| 5.1 | Měření | 48 |
| 5.2 | Realizace výrobní linky..... | 49 |
| 6 | Závěr..... | 50 |
| 7 | Seznam použitých zdrojů | 51 |

Seznam obrázků

| | | |
|---------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek č. 1: | Technologické schéma výroby pelet | 21 |
| Obrázek č. 2: | Technologické schéma výroby briket..... | 22 |
| Obrázek č. 3 | 5.3.3 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701 | 32 |
| Obrázek č. 4 | 5.3.5 Analyzátor LECO CHN 628 | 33 |
| Obrázek č. 5 | 5.3.5 Analyzátor LECO CHN 628 s modulem pro stanovení síry | 34 |
| Obrázek č. 6 | 5.3.7 Kalorimetr LECO AC-600 | 35 |
| Obrázek č. 7 | Schéma navrhované technologie výroby pelet | 41 |
| Obrázek č. 8 | Řešení úzkých míst..... | 45 |
| Obrázek č. 9 | Materiálový tok - schematicky | 46 |

Seznam tabulek

| | | |
|--------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka č. 1 | Paliva z odpadní biomasy | 15 |
| Tabulka č. 2 | Vzorce pro přepočet mezi stavy vzorků..... | 28 |
| Tabulka č. 3 | vybrané hodnoty pro dřevo a kůru z jehličnatých stromů..... | 29 |
| Tabulka č. 4 | vybrané hodnoty pro slámu z pšenice a slámu z řepky olejky | 30 |
| Tabulka č. 5 | Analytický vzorek | 36 |
| Tabulka č. 6 | Suchý stav | 37 |
| Tabulka č. 7 | Hořlavina..... | 38 |
| Tabulka č. 8 | Původní vzorek | 38 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka č. 9 Příkon navrhovaných strojů | 43 |
| Tabulka č. 10 porovnání výsledků analýzy štěpky s dřevem vytěženým po kůrovcové kalamitě | 49 |

Seznam použitých zkratk

1 Úvod

Biomasu si můžeme definovat jako jakoukoliv hmotu organického původu, rostlinného i živočišného a také biologicky rozložitelné odpady. Tuhou biomasu je možné přeměnit na bioplyn, nebo jí využít v termochemických procesech, kterým se budu věnovat ve své bakalářské práci. Konkrétně je to spalování, zplyňování a pyrolýza. Biomasu lze využít také v mokřých procesech, těm se budu věnovat pouze okrajově. Konkrétně jde o anaerobní digesci a alkoholové kvašení.

Biomasu lze využít pro výrobu elektrické energie, buď použitím spalného tepla v paroplynovém cyklu, nebo pro získání plynu k pohonu kogenerační jednotky. Při spalování biomasy se uvolňuje oxid uhličitý v podobných koncentracích jako při spalování uhlí. Jedná se ale o mladší palivo a uhlík v něm není vázán tak dlouho. Pokud by byla biomasa ponechána přírodním procesům uhlík by se stejně uvolnil.

Za rok 2023 pocházelo 42,62% elektrické energie vyrobené v ČR z uhlí, 40,15 % z jaderných elektráren a 2,87 % z biomasy, to odpovídá 2,13 TWH (Electricity Maps | Emise CO₂ ze spotřeby elektřiny v reálném čase, 2024). Podíl elektrické energie vyrobené z biomasy v posledních letech nijak zásadně neroste ani neklesá. V podobných množstvích jako energie z biomasy se pohybuje energie vyrobená v solárních a vodních elektrárnách, podíl energie z větrných elektráren je menší než 1 %.

Společnost ČEZ přidává biomasu k uhelnému prachu do fluidních kotlů v uhelných elektrárnách. V Elektrárně Hodonín je jeden blok určen pouze ke spalování biomasy. (Elektrárna Hodonín Skupina ČEZ - O Společnosti, 2024)

Poptávka po udržitelné energii neustále roste v souvislosti s požadavky na snižování emisí skleníkových plynů. Státní energetická koncepce ČR z roku 2015 má mezi svými cíli „Zajištění soběstačnosti ve výrobě elektřiny, založené zejména na vyspělých konvenčních technologiích s narůstajícím poměrem přeměny a s narůstajícím poměrem obnovitelných a druhotných zdrojů“ (MPO, 2014) a „výrazné zvýšení využití odpadů v zařízení na energetické využívání odpadů“ (MPO, 2014). Koncepce nebyla od roku 2015 aktualizována a mnohých cílů již mělo být dosaženo. MPO chystá aktualizaci, kde se počítá s postupným útlumem energie vyráběné z uhlí a s přiblížením se uhlíkové neutralitě v roce 2050. Počítá se s postupným nárůstem obnovitelných zdrojů a jaderné energetiky (Aktualizace Státní energetické koncepce (SEK) | MPO, 2024).

Na území ČR jsou lokality vhodné pro výstavbu vodních a větrných elektráren z velké části vyčerpané. Křivky výkonu fotovoltaických elektráren příliš nekorespondují s odběrem. Energie z biomasy se tedy jeví jako perspektivní. Plyn nebo kapalinu vzniklé z biomasy je možné uskladňovat a následně použít v kogeneračních jednotkách ke stabilizaci rozvodné sítě.

Analýza paliv je nutná pro stanovení jejich složení. Podle složení mohou být paliva zařazena do obchodních kategorií a jednoznačně identifikována. Složení paliva má zásadní vliv nejen na jeho výhřevnost, ale i na vyprodukované emise. Znat složení paliva je nezbytné pro stanovení nejvhodnějšího způsobu použití. Proto se ve své práci věnuji základním vlastnostem čtyř vybraných paliv. Konkrétně řepkové slámy, pšeničné slámy, dřevní štěpky a kůry. Cílem je tato paliva porovnat a navrhnout pro ně vhodné využití.

Kvůli vysokým nárokům na přesnost dávkování a požadavkům na automatizaci jsou vhodnou formou biomasy pro menší zdroje pelety. Pelety je možné vyrábět ze všech zkoumaných vzorků, nebo z jejich kombinace. Pelety mají jasně dané vlastnosti a umožňují automatické dávkování. Díky tomu je vyhledávají majitelé rodinných domů jako snadný způsob vytápění.

2 Cíle práce a metodika

Hlavním cílem práce je navrhnout zpracování vybraných vzorků biomasy pro energetické využití, navrhnout technologii strojního zařízení a odhadnout základních ekonomické aspekty. Jedná se o vzorky smrkové štěpky, smrkové kůry, pšeničné slámy a řepkové slámy. Vzorky pocházejí ze středních Čech. Technologie bude navržena s ohledem na výsledky elementární analýzy provedené v laboratořích ČZU. Dílčím cílem je určení palivářských vlastností vybraných paliv konkrétně spalného tepla, výhřevnosti a obsahu vybraných prvků. Dalším cílem je porovnání vzorků s běžnými hodnotami a s jinými vzorky.

Analýza paliv proběhne v laboratoři analýzy organických materiálů TF ČZU. Pro prvkovou analýzu jsou zde k dispozici tyto přístroje: střížný mlýn Retsch SM 100, horkovzdušná sušárna Memmert UF30, termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701, laboratorní váha Sartorius SP124 S, analyzátor LECO CHN 628 doplněný o modul pro stanovení síry a kalorimetr LECO AC – 600.

Výsledky budou zpracovány podle metodiky obsažené v normách ISO 16559 a ISO 16993. Ke zpracování naměřených výsledků poslouží tabulkový procesor.

Pro návrh technologie na zpracování a výrobní linky uplatním znalosti z různých oborů získané během studia.

3 Teoretická východiska

3.1 Legislativní úprava

Energetikou se zabývá právní úprava č. 458/2000 Sb. o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů dále jen „energetický zákon“, platný od 28. listopadu 2000 a účinný od 1. ledna 2001. Zákon byl mnohokrát novelizován. Poslední novela proběhla v roce 2023 v souvislosti s energetickou krizí. Zákon upravuje elektroenergetiku, plynárenství a teplárenství. Na výrobu plynu, elektřiny a tepelné energie jsou udělovány licence, na dobu určitou, maximálně 25 let.

Energie z biomasy a paliv z ní vyráběných patří podle zákona č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů mezi podporované obnovitelné zdroje energie. Podpora probíhá formou aukce vypsané Ministerstvem průmyslu a obchodu. Podporována je výroba elektrické energie, výroba tepla i kombinovaná výroba.

Zákon č. 165/2012 Sb. o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů definuje v §2 odstavci 1 písmena b), c), d) biomasu, bioplyn a biokapalinu.

Pro účely tohoto zákona se rozumí

„b) biomasou biologicky rozložitelná část produktů, odpadů a zbytků biologického původu ze zemědělství, z lesnictví a souvisejících odvětví a z rybolovu a akvakultury, včetně rostlinných a živočišných látek, jakož i biologicky rozložitelná část odpadů, včetně průmyslových a komunálních odpadů biologického původu, přičemž zemědělská biomasa je biomasa vyrobená v zemědělství a lesní biomasa je biomasa vyrobená v lesnictví

c) bioplynem plynné palivo vyráběné z biomasy používané pro výrobu elektřiny, tepla nebo pro výrobu biometanu; za bioplyn se považuje také kalový a skládkový plyn,

d) biokapalinou kapalné palivo vyráběné z biomasy používané pro výrobu elektřiny a tepla.“ (zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, 2022)

Pro energetické účely mohou být požitý různé odpady, což upravuje Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech a vyhláška č. 169/2023 Sb. o stanovení podmínek, při jejichž splnění přestává být tuhé palivo z odpadu odpadem. Cíle Zákona o odpadech jsou definovány v příloze jedna. Jde konkrétně o zvýšení úrovně recyklace a přípravy komunálních odpadů k opětovnému použití do roku 2025 na 55 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky, do roku 2030 na 60 % a do roku 2035 na 65 % celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky (Zákon č. 541/2020 Sb. o

odpadech, 2020). Dalším cílem je „odstraňovat uložením na skládku v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 10 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky“ (Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech, 2020). Posledním cílem je „energeticky využívat v roce 2035 a v letech následujících nejvýše 25 % z celkové hmotnosti komunálních odpadů vyprodukovaných na území České republiky“ (Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech, 2020).

Palivo z odpadní biomasy přestává být odpadem, pokud je vyrobeno pouze z odpadů uvedených v tabulce č1, kategorie vycházejí z ČSN EN ISO 21640, nebo obsah škodlivin nepřesáhne stanovené limity, nebo je vyrobeno ve stacionárním zařízení odpovídajícím ČSN EN 15358 a předá se do odpovídajícího spalovacího zařízení (Vyhláška č. 169/2023 Sb. o stanovení podmínek, při jejichž splnění přestává být tuhé palivo z odpadu odpadem, 2023).

Tabulka č. 1 Paliva z odpadní biomasy

| |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 02 01 03 Odpad rostlinných pletiv |
| 02 01 07 Odpady z lesnictví |
| 03 01 01 Odpadní kůra a korek |
| 03 01 05 Piliny, hobliny, odřezky, dřevo, dřevotřískové desky a dýhy, neuvedené pod číslem 03 01 04 |
| 03 03 01 Odpadní kůra a dřevo |
| 15 01 03 Dřevěné obaly |
| 17 02 01 Dřevo |
| 19 12 07 Dřevo neuvedené pod číslem 19 12 06 |
| 20 01 38 Dřevo neuvedené pod číslem 20 01 37 |

Zdroj: (Vyhláška č. 169/2023 Sb. o stanovení podmínek, při jejichž splnění přestává být tuhé palivo z odpadu odpadem, 2023)

3.2 Základní pojmy a postupy podle norem

3.2.1 Pojmy spojené s biomasou

Biopalivo je definováno jako „tuhé, kapalné, nebo plynné palivo vyrobené přímo, nebo nepřímo z biomasy“ (ISO 16559, 2022).

Bioenergie je pak energie získaná z biomasy.

Biomasa je klasifikována podle původu do pěti základních skupin. Jedná se o dřevní biomasu, bylinou biomasu, ovocnou biomasu, vodní biomasu, homogenní směsi a směsi.

Homogenní směsi jsou záměrně smíchaná biopaliva, zatím co směsi jsou nezáměrně smíchaná biopaliva. (ISO 17225 - 1., 2022)

3.2.2 Hlavní obchodní formy a suroviny tuhých biopaliv

Norma ISO 17225 Tuhá biopaliva – specifikace a třídy paliv definuje podobu tuhých biopaliv. Určuje velikost částic, běžný způsob přípravy a další specifické vlastnosti jednotlivých forem. Typicky vlhkost, obsah síry, obsah dusíku, výhřevnost a další specifické vlastnosti pro konkrétní třídy forem.

3.2.3 Tuhá alternativní paliva

Norma ISO 21640 definuje tuhá alternativní paliva (TAP) a vymezuje, co je za ně možné považovat. Za TAP není považován komunální odpad v surové podobě. TAP by neměla být z materiálů vhodných k recyklaci. To na území ČR upravuje Zákon o odpadech a vyhláška o stanovení podmínek, při jejichž splnění přestává být tuhé palivo z odpadu odpadem. Paliva jsou klasifikována na základě výhřevnosti v původním stavu a obsahu chloru a rtuti. Pro výrobu TAP by měl být používán odpad nevhodný pro další recyklaci, který není klasifikován jako nebezpečný.

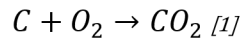
TAP musí být klasifikována a specifikována. K tomu slouží formulář, který je přílohou normy ISO 21640. Ve formuláři jsou uvedeny fyzikální a chemické parametry. Zkoušky mají být provedeny podle norem ISO, pokud existují (ISO 21640, 2022). Dále se specifikuje původ a způsob úpravy. Palivo je podle Vlastností zařazeno do třídy. Povinné vlastnosti pro specifikaci jsou: kód třídy, původ, obchodní forma, průměr částice, popel v bezvodém stavu, voda v původním stavu, výhřevnost v původním i bezvodém stavu a chemické vlastnosti. Chemické vlastnosti jsou konkrétně obsah chloru, a těžkých kovů. (ISO 21640, 2022)

3.3 Termochemické procesy

3.3.1 Spalování

Spalování definujeme jako proces, při kterém je míseno palivo s oksličovadlem za účelem vzniku hořlavé látky. Jejich slučování za vzniku velkého množství tepla nazýváme hořením. Hoření může začít přivedením tepla, nebo samovolně. Hořlaviny obsahují uhlík, vodík a síru. Nejběžnějším oksličovadlem bývá kyslík obsažený v atmosféře.

Nejčastější reakcí je slučování vodíku s kyslíkem za vzniku oxidu uhličitého.



V ideálním případě by byla spalována stechiometrická směs. To znamená že by se veškerý kyslík ze vzduchu a veškerý uhlík z paliva proměnily na oxid uhličitý tedy $\lambda = 1$. V praxi se palivo se vzduchem nikdy dokonale nesmísí a proto se přivádí nadstechiometrické množství kyslíku. To umožňuje spálit větší část paliva, než kdyby se používala stechiometrická směs. Pro plyn $\lambda = 1,2$ a pro tuhá paliva $\lambda = 2,3$.

Paliva se skládají z popelovin, prchavých a neprchavých hořlavin a vody. Hořením prchavých hořlavin vznikají plynné spaliny, ty jsou směsí převážně nehořlavých plynů. Hořením neprchavých hořlavin vzniká škvára, struska a popílek.

Tuhé palivo musí být nejprve ohřáto, pak se odpaří vlhkost, následně se uvolní prchavé hořlaviny. Když prchavé hořlaviny vyhoří, hoří tuhý uhlík. Prchavá hořlavina má menší teplotu vznícování a rychleji vyhoří, tudíž se podle obsahu prchavé hořlaviny musí volit vhodná technologie pro spalování. Čím mladší je palivo, tím je podíl prchavé hořlaviny větší a naopak. Dřevo má prchavé hořlaviny cca 80 %, zatím co antracit jenom asi 20% (Jirouš, 2013).

Množství tepla uvolněné spálením jednoho kilogramu paliva a následným ochlazením spalin na 20 °C udává veličina nazývaná výhřevnost [$J \cdot kg^{-1}$]. Další důležitou veličinou je spalné teplo, což je výhřevnost doplněná o teplo potřebné ke kondenzaci vody odpařené během hoření.

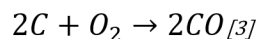
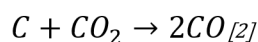
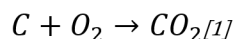
Hoření dělíme na homogenní a heterogenní. Při homogenním hoří plyn, směs hořlavin a okysličovadla je homogenní, látky jsou ve stejném skupenství. Heterogenní hoření probíhá na povrchu částice tuhého paliva, hořlavina a okysličovadlo jsou v různých skupenstvích.

Z hlediska dynamiky fyzikálních a chemických procesů dělíme hoření na kinetické a difuzní. Ke kinetickému hoření dochází, když je doba fyzikálních dějů významně kratší než doba chemických dějů. Difuzní hoření probíhá, když je doba chemických dějů výrazně kratší než doba fyzikálních dějů. Doba hoření je určena například rychlostí směšování paliva s okysličovadlem. (Jirouš, 2013)

3.3.2 Zplyňování

Cílem zplyňování je získat z tuhé biomasy plynné palivo s co nejmenším obsahem dusíku. Proto se místo atmosférického vzduchu přivádí kyslík nebo vzduch obohacený kyslíkem.

Reakce probíhá s podstechiometrickým množstvím kyslíku. Tím pádem z reakce nevystupuje oxid uhličitý, jako u hoření, ale oxid uhelnatý. Jedná se o oxidačně redukční reakci



Výsledný produkt, směs oxidu uhelnatého, dvouatomárního vodíku a methanu se nazývá energoplyn. Obsahuje také dusík, vodní páru, oxid uhličitý, tuhé frakce a sloučeniny síry a jiných prvků. Jejich množství by mělo být co nejmenší, aby měl plyn co největší výhřevnost. Obsah sloučenin síry může způsobovat korozi.

3.3.3 Pyrolýza

Jedná se o anaerobní termický rozklad. Za zvýšené teploty přestane být biomasa stabilní a rozloží se na stabilnější produkty. Vznikají čtyři hlavní frakce: voda, plynná frakce, tedy pyrolýzní plyn, kapalná nazývaná pyrolýzní olej a tuhá, pyrolýzní koks. Ve zkratce se z původního materiálu uvolní prchavá hořlavina a vysokomolekulární látky v tuhé frakci jsou rozštěpeny na nízkomolekulární.

Při nižších teplotách převažuje pevná frakce, zatím co při vyšších teplotách převažuje kapalná a plynná (zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, 2022). Pyrolýzu při teplotách do 500 °C označujeme jako nízkoteplotní, od 500 °C do 800 °C jako středněteplotní a nad 800 °C jako vysokoteplotní.

Pyrolýza při teplotách nepřesahujících 600 °C a tlaku do 0.1 Mpa se nazývá pomalá pyrolýza a používá se pro výrobu tuhé frakce, převážně dřevěného uhlí.

Rychlá pyrolýza probíhá při teplotách mezi 450-900 °C a hlavními produkty jsou pyrolýzní olej a pyrolýzní plyn.

3.3.4 Anaerobní digesce

Jedná se o proces bez přístupu kyslíku, kdy z organického materiálu získáváme bioplyn, směs methanu, oxidu uhličitého a dalších příměsí. Významnými složkami jsou vodní pára, sirovodík a čpavek. Teplota během procesu by se měla pohybovat okolo 40 °C. Vedlejšími produkty jsou digestát – tuhý zbytek a fugát – kapalný zbytek.

V praxi má proces anaerobní fermentace čtyři fáze. První fáze se nazývá hydrolýza. Během ní se mění polymery na jednodušší organické látky. Na jejím začátku je v prostředí obsažen vzdušný kyslík a vlhkost biomasy musí být nad 50 %.

Ve druhé fázi, zvané acidogeneze, dojde k vytvoření anaerobního prostředí. Vzniká oxid uhličitý, dvouatomární vodík a kyselina octová (Pastorek, Kára, & Jevič, 2004).

Třetí fáze se označuje jako acetogeneze. „Acidogení specializované kmeny transformují vyšší organické kyseliny na kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý“ (Pastorek, Kára, & Jevič, 2004).

Ve čtvrté fázi, která se nazývá trofogeneze, probíhají dva důležité procesy, rozklad kyseliny octové na metan, amoniak a oxid uhličitý, a slučování vodíku a oxidu uhličitého na metan. metanogeneze trvá ze všech fází nejdéle.

Pro kvalitu bioplynu je důležitý poměr C:N. Ideální je 1:30. Vhodného poměru se v praxi dosahuje mísením různých druhů materiálů. Materiály rostlinného původu mají vysoký obsah uhlíku a exkrementy hospodářských zvířat mají vysoký obsah dusíku. (Pastorek, Kára, & Jevič, 2004)

3.3.5 Alkoholové kvašení

Alkohol je možné vyrábět z rostlin obsahujících sacharidy a z rostlin obsahujících škrob. Škrob je nutné před kvašením pomocí enzymů rozštěpit na sacharidy. Kvasinky rozkládají sacharidy na alkohol a oxid uhličitý. Kvašením není možné dosáhnout více než 13% obsahu alkoholu. Alkohol ve větší koncentraci kvasinky zahubí a proto je na větší koncentrace destilován.

3.4 Technologie

3.4.1 Mechanická úprava

Pro efektivní přepravu a spalování je vhodné biomasu homogenizovat. Velké kusy dřeva mohou být rozřezány na polena. Dřevo lze také štěpkovat, tedy rozřezat ostrým nástrojem na velikost 5–100 mm. Další způsob homogenizace je drcení, to na rozdíl od štěpkování probíhá tupým nástrojem. Částice vzniklé drcením mají zpravidla větší povrch než částice vzniklé řezáním. Rozdrcená biomasa bývá následně tvarována do formy pelet nebo briket.

3.4.1.1 Technologie výroby pelet

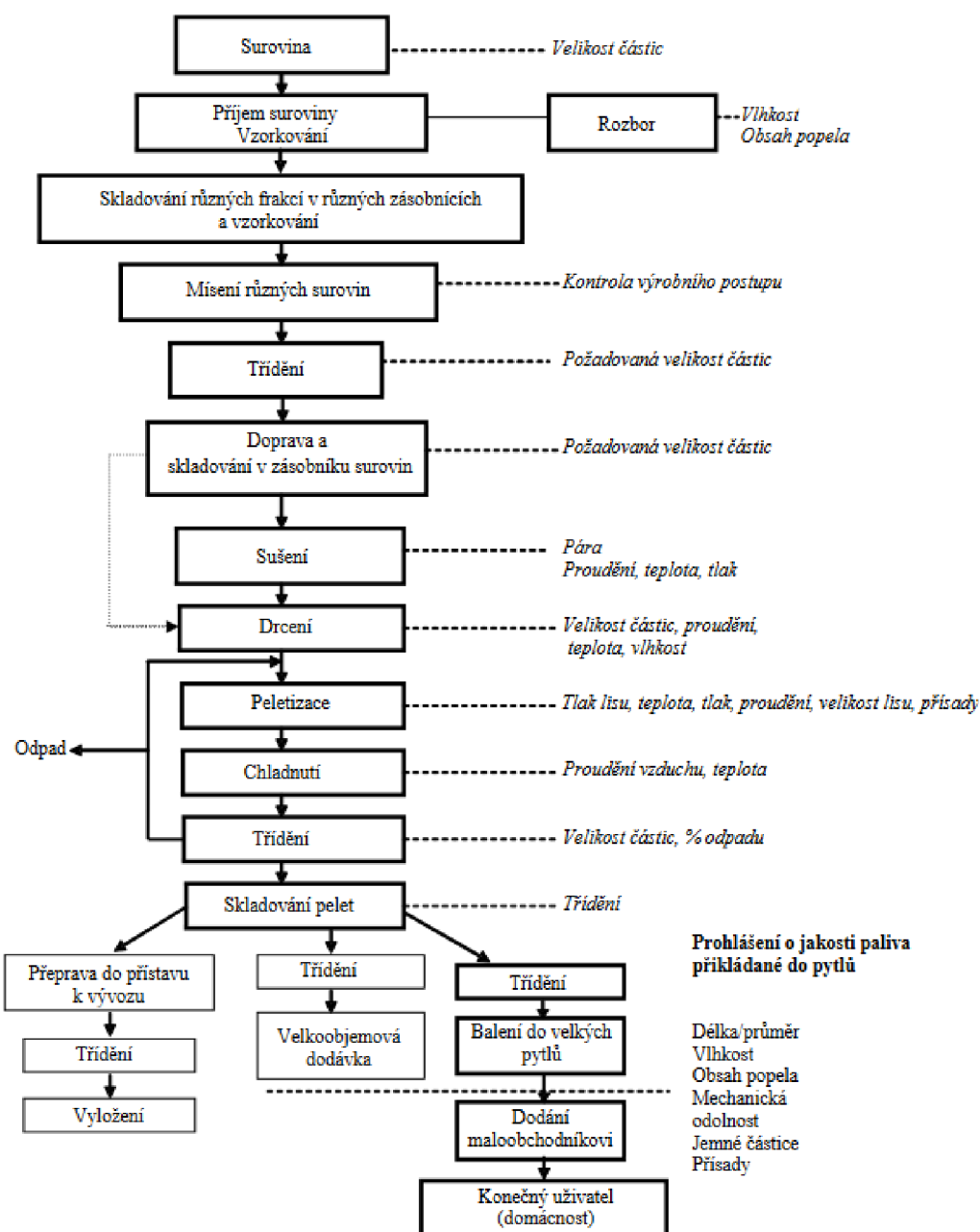
Biomasa musí být rozdrčená na 2-3 mm velké fragmenty a vysušená na přibližně 10% obsah vody. Peleta vznikne protlačením za vysokého tlaku skrz otvor matrice. Existují dva základní typy peletovacího lisu, s talířovou a s prstencovou matricí.

U lisů s talířovou matricí má matrice tvar děrovaného talíře. Jejím středem prochází hřídel, ke které jsou kolmo připevněny z pravidla dva nebo čtyři válečky – rolny. Stroje s talířovou matricí se zpravidla víc zahřívají a mají menší výkonost než stroje s matricí prstencovou. Rolny mohou mít také kuželový tvar, pak je podle toho upravena i geometrie talíře.

Lisy s prstencovou matricí mají matrici tvaru děrovaného dutého válce. Rolny mají osu rovnoběžnou s osou matrice. Mohou se pohybovat buď rolny nebo matrice. Dochází k menšímu zahřívání než u lisů s talířovou matricí, a proto může být i vyšší výkonost.

Během lisování se pelety zahřejí na teplotu okolo 100 °C. Aby nedošlo k jejich roztržení vlivem expanze vodní páry musí být ochlazeny. Chlazení se provádí proudem vzduchu.

Ke znázornění návaznosti technologií slouží technologické schéma, jeho příklad je na obrázku č. 1. Schéma není univerzální. Navrhované technologie se mohou lišit.



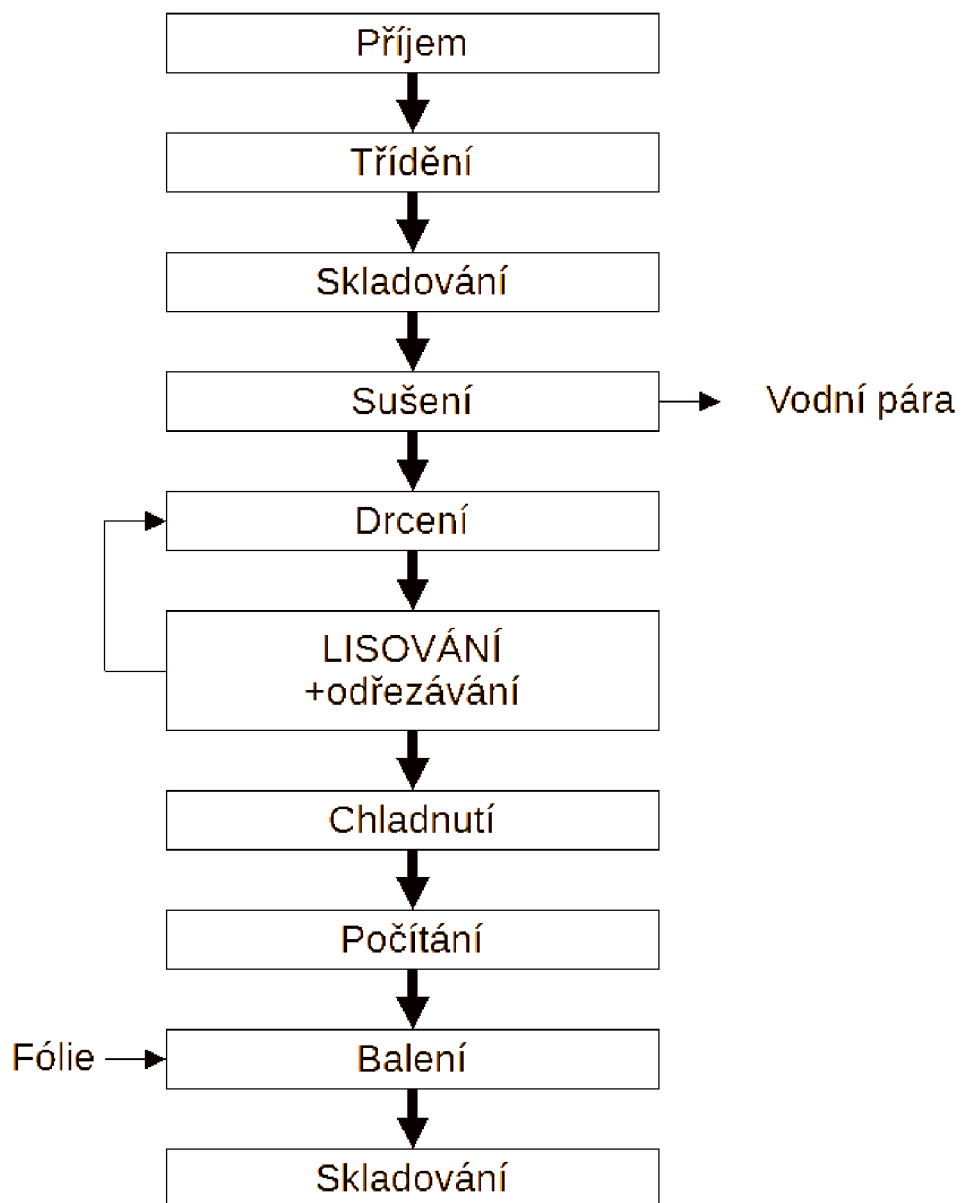
Obrázek č. 1: Technologické schéma výroby pelet

Zdroj: (Jevič, Hutla, & Šedivá, 2006)

3.4.1.2 Technologie výroby briket

Velikost frakcí biomasy pro výrobu briket by neměla přesáhnout 15 mm a vlhkost by neměla přesáhnout 15 %. Briketovací lisy mohou být šnekové nebo pístové. Pístové se dále dělí na hydraulické a klikové. Nejvíce zhuštěné jsou brikety vyráběné šnekovými lisy, kde je biomasa vtačována šnekovnicí do lisovací komory, ze které skrz lisovací pouzdro vychází

nekonečná briketa, která je následně odřezávána. Klikové lisy převádějí otáčky motoru přes klikový mechanismus na píst, který tlačí biomasu do lisovacího pouzdra. Z něj vychází nekonečná briketa, která je odřezávána obdobně jako u šnekového lisu. Hydraulické lisy stlačují předem nadávkované množství biomasy rovnou do jedné brikety. Návaznost technologií je znázorněna ve zjednodušeném technologickém schématu na obrázku č. 2.



Obrázek č. 2: Technologické schéma výroby briket

3.4.2 Technologie pro spalování

Spalování biomasy pro energetické účely probíhá ve speciálních kotlích. Technologie je vždy navržena pro konkrétní druh paliva. Většina technologií umožňuje určitou míru regulace parametrů podle spalovaného paliva.

3.4.2.1 Spalování na rošttech

Spalování tuhých materiálů může probíhat na stacionárních, přesuvných nebo pásových rošttech. Stacionární rošty jsou buď rovinné nebo stupňové. Do kotlů je přiváděn vzduch většinou ventilátory. Pod rošt je přiváděn primární vzduch a nad rošt sekundární. Pro spalování biomasy se větší část vzduchu přivádí nad rošt do proudu unikajících plynů, kde hoří prchavá hořlavina ve vzhledu. Výměník tepla tedy nemůže být bezprostředně nad roštem aby nedocházelo k ochlazení hořlavé směsi.

Zařízení s pevnými rošty pracují periodicky a používají se převážně pro menší výkony do $300 \text{ kg kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Palivo je dávkováno vhozovou šachtou. Ta bývá v horní části spalovací komory. Na spalovací komoru navazuje dohořivací komora.

Mechanické přesuvné rošty vznikly ze stacionárních stupňových roštů. Oba typy jsou tvořeny ze sklopených příčných stupňů. Sklon se pohybuje mezi 15° a 18° . Stupně se skládají z roštnic. U přesuvných roštů se mohou pohybovat buď všechny nebo jen liché stupně. Důležitým aspektem přesunu paliva jsou jeho převrácení a míchání. Mísí se hořící palivo s ještě nevzníceným a zároveň se provzdušňuje. Postupně z vyhořelého paliva vzniká škvára, která na konci padá do škvárové výsypky.

Posuvné rošty jsou nekonečné pásy, složené z roštnic. Spalované palivo na nich projíždí skrz kotel. Množství vzduchu přiváděné pod rošt a nad rošt se v průběhu jeho délky může měnit. Tím se rozdělí zóny sušení a spalování.

Biomasu je možné spalovat i jako příměs v zařízeních určených pro spalování uhlí. Společnost ČEZ spaluje biomasu v teplárně Dvůr Králové. Podíl biomasy může přesáhnout 20% (Biomasa Skupina ČEZ - O Společnosti, 2023).

3.4.2.2 Spalování ve fluidních kotlích

Při fluidním spalování je přiváděn vzduch, který unáší drobné částice paliva a ty jsou pak spalovány ve vzhledu. Součinitel přebytku vzduchu je menší než 1 a tudíž se nespálí prchavá hořlavina. Ta je spálena v dalším prostoru. Částice ve vzhledu se chovají podobně jako vroucí

kapalina. V praxi se používá technologie stacionárního fluidního lože a cirkulujícího fluidního lože.

U stacionárního fluidního lože je vrstva hořících částic ve vznosu. Nad tuto vrstvu je přiváděn sekundární vzduch. Ten odnáší popel a okysličuje hořlavé plyny. Směs vzduchu, hořlavých plynů a popela odchází skrz dohořivací komoru, kde jsou spáleny hořlavé plyny.

V kotli s cirkulujícím fluidním ložem proudí fluidní směs v celém objemu kotle. V horní části je nasávána skrz cyklonové odlučovače, kde je oddělen hořlavý plyn od tuhého paliva, které je vráceno do spodní části kotle.

Velkou výhodou oproti klasickému spalování na roštích je možnost přesného dávkování. To umožňuje efektivněji využít energii obsaženou v palivu ale také do kotle dávkovat drcený vápenec za účelem odsíření spalin.

Ve fluidních kotlích bývá biomasa spalována mimo jiné v kombinaci s hnědým uhlím. To umožňuje společnosti ČEZ snížit spotřebu uhlí v již instalovaných kotlích. V ČR je to v Hodoníně, v Tisové a v Ledvicích. Podíl biomasy v těchto kotlích může být až 20%. (Biomasa Skupina ČEZ - O Společnosti, 2023)

3.4.2.3 Spalování v bubnových rotačních pecích

Bubnové pece se používají hlavně pro spalování odpadu. Palivo se v peci vlivem otáčení mísí a má zajištěný přístup vzduchu. Při spalování odpadu bývá k bubnu přiváděn zemní plyn, pokud není odpad dostatečně vysušený, nebo z jiného důvodu nehoří. Za bubnem bývá umístěna dohořivací komora, kde vyhoří zbylé prchavé hořlaviny.

3.4.2.4 Menší zdroje tepla do 300 kW

Pro menší topeniště, typicky vytápění rodinných domů, se i v dnešní době setkáváme s periodickým příkládáním. Periodické příkládání můžeme vidět u starších kotlů nebo u krbových kamen. Vhodným palivem jsou pak dřevěná polena nebo brikety. Hlavní nevýhody spočívají v přerušení chemických reakcí pro otevření dvířek a v nepřesné regulaci.

Pro kontinuální příkládání se jako palivo typicky používají pelety nebo dřevní štěpka. Palivo je dávkováno šnekovými dopravníky nebo turniketovými podavači. Vzduch je zpravidla přiváděn ventilátorem. To se označuje jako nucené proudění. Pokud je vzduch přiváděn na principu komínového efektu, jedná se o kotle s přirozeným tahem.

V malých zařízeních se zpravidla spaluje na pevných roštích. Malý objem není nutno nijak zvlášť míchat a pohyblivé části jsou potenciálním zdrojem problémů. Fluidní kotle by v používaných objemech paliva nebyly efektivní.

Norma ČSN EN 303-5 definuje emisní třídy kotlů na tuhá paliva. Třídy 1 a 2, které byly ve starších normách se již nepoužívají. Kotle nižší než třetí třídy je od roku 2022 zakázáno používat.

3.4.3 Technologie pro zplynování

Zplynování probíhá ve speciálních reaktorech. Ty mohou být souproudé, protiproudé nebo fluidní. V protiproudých reaktorech je biomasa přiváděna shora a plyn ze spodu. V souproudých reaktorech jsou biomasa i plyn přiváděny shora. Do fluidních reaktorů je plyn přiváděn dole, těsně nad roštem. V souproudých a protiproudých reaktorech je možné pozorovat zóny kde převažují jednotlivé typy reakcí. Jedná se konkrétně o pyrolýzu, oxidaci a redukci. V prostorech, kde se nenachází kyslík probíhají pyrolýzní reakce. U přívodu kyslíku probíhají oxidační reakce, dále od přívodu redukční reakce.

Ve fluidních reaktorech probíhají všechny reakce v celém objemu. Reaktory dále dělíme na atmosférické a tlakové. V tlakových reaktorech vzniká plyn s větším obsahem methanu. Pokud chceme plyn dále využít, například pro pohon spalovacích motorů nebo kogeneračních jednotek, je nutné ho dokonale vyčistit od nežádoucích složek. Pevné částice a prach přibližně do velikosti $2 \mu\text{m}$ je možné oddělit v cyklonových odlučovačích. Tento proces se nazývá suché čištění. Mokřým čištěním, kde plyn prochází skrz vodu, jsou odstraňovány dehty. Čištění vodou může předcházet použití organického rozpouštědla.

Do procesu zplyňování musí být na začátku dodáno teplo. Během procesu může teplo přicházet ze spalné části nebo zvenčí, z odděleného reaktoru. Také lze dodat teplo exotermní chemickou reakcí, například přidáním vápna, kdy reakcí s oxidem uhličitým vzniká uhličitán vápenatý.

3.4.4 Technologie pro pyrolýzu

Nejčastěji používaným zařízením je rotační pec. Dále se používá reaktor, který může být se stacionárním nebo fluidním ložem. Je nutné zamezit přístupu vzduchu do reaktoru vhodným způsobem plnění. Pyrolýza bývá kombinována se zplynováním. Do procesu musí být dodáno teplo. To se získá spálením části vstupní suroviny.

3.4.5 Bioplynové stanice – anaerobní digesce

Technologie se dělí podle obsahu sušiny v dodávaném materiálu na technologie pro zpracování tuhých materiálů, pro zpracování tekutých materiálů a technologie kombinované.

Podle dávkování se reaktory dělí na diskontinuální, semikontinuální a kontinuální. Diskontinuální se používají pro tuhé materiály. Délka cyklu je dána dobou fermentace materiálů. Semikontinuální dávkování je nejběžnější. Materiál se do fermentoru dávkuje několikrát denně. Do kontinuálních se materiál dávkuje nepřetržitě. Obvykle se používají pro tekuté organické odpady.

Plyn získaný z reaktoru je jímán do plynojemů. Plynojem musí být opatřen přetlakovým ventilem. Přebytek plynu, který nelze využít je spálen aby neunikal do ovzduší. Plyn je vyčištěn od síry a vlhkosti. Může být použit pro pohon kogenerační jednotky. Pokud je plyn vyčištěn na kvalitu zemního plynu je ho možné dodávat do plynovodní soustavy.

4 Vlastní práce

4.1.1 Základní postup přípravy vzorků v laboratorních podmínkách

Množství paliva, u kterého má být stanovená kvalita je označováno jako celek. Může to být předem daný objem nebo část toku.

Ze vzorku je odebrán dílčí vzorek, ten je definovaný jako podíl paliva odebraného během jedné operace. Pro představu jde o lopatku, nebo sáček s biomasou a podobně.

Smícháním všech odebraných vzorků je vytvořen celkový vzorek. V případě potřeby je možné provést redukci hmotnosti.

Vzorek vhodný pro stanovení všech zjišťovaných vlastností, dodaný do laboratoře, je označován jako laboratorní vzorek.

Z laboratorních vzorků jsou vytvořeny podvzorky mechanickým rozmělněním a předsušením do rovnovážného stavu s vlhkostí laboratoře. Pokud je vyžadováno více zkoušek, má být rozdělen na více podvzorků (ISO 16559, 2022).

4.2 Podstata prvkové analýzy

Prvková analýza slouží ke zjištění vlhkosti, obsahu uhlíku, vodíku, dusíku a síry. Také se v ní zjišťuje obsah popela ve vzorku a množství uvolněné energie. Energie se udává jako výhřevnost a spalné teplo. Obě veličiny jsou udávány za běžných podmínek, což odpovídá teplotě 0 °C a atmosférickému tlaku 101,3 kPa.

Znát složení biomasy, případně paliv z biomasy je v praxi nezbytné. S ohledem na složení by měl být navrhnout nejvhodnější způsob využití. Složení je nutné znát i při obchodování s palivy, aby mohlo být palivo definováno a aby bylo možné určit, jestli odpovídá požadavkům zákazníka. Složením paliv z biomasy a jejich specifikací se zabývají normy ISO 17225 Tuhá biopaliva – Specifikace a třídy paliv a ISO 21640 Tuhá alternativní paliva – specifikace a třídy.

Analýza je prováděna na analytických vzorcích. To jsou částečně vysušené laboratorní vzorky. Vzhledem k tomu že se nezajímáme pouze o vlastnosti analytického vzorku ale i o vlastnosti vzorku v původním a suchém stavu a o vlastnosti hořlaviny, je nutné mezi těmito formami hodnoty přepočítávat. Vzorce pro přepočet mezi těmito stavy jsou uvedeny v normě ISO 16993 Tuhá biopaliva – Přepočet výsledků analýz pro různé stavy biopaliv. Suchý stav se

ve vzorcích označuje dolním indexem d, analytický vzorek dolním indexem ad. Pro většinu přepočtů slouží stejné vzorce, obsažené v tabulce č 2, ale jsou zde i výjimky.

Tabulka č. 2 Vzorce pro přepočet mezi stavy vzorků

| Dané | Požadované | | | |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| | Analytický stav (na vzduchu proschlý) (ad) | Původní stav ^a (ar) | Bezvodý stav (d) | Bezpopelná sušina (daf) |
| Analytický stav (na vzduchu proschlý, ad) | | $\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$ | $\frac{100}{100 - M_{ad}}$ | $\frac{100}{100 - (M_{ad} + A_{ad})}$ |
| Původní stav (ar) | $\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$ | | $\frac{100}{100 - M_{ar}}$ | $\frac{100}{100 - (M_{ar} + A_{ar})}$ |
| Bezvodý stav (d) | $\frac{100 - M_{ad}}{100}$ | $\frac{100 - M_{ar}}{100}$ | | $\frac{100}{100 - A_d}$ |
| Bezpopelná sušina (daf) | $\frac{100 - (M_{ad} + A_{ad})}{100}$ | $\frac{100 - (M_{ar} + A_{ar})}{100}$ | $\frac{100 - A_d}{100}$ | |

^a Je nutno vzít v úvahu, že vzorce uvedené pro přepočet výsledků na „původní stav“ se mohou použít k výpočtu výsledků na stav s jakýmkoliv obsahem vody.

Zdroj: ISO 16993 Tuhá biopaliva – Přepočet výsledků analýz pro různé stavy biopaliv

Norma mimo jiné uvádí, jak stanovit obsah vodíku v analytickém vzorku. Konstanta 8,937 slouží k určení obsahu vodíku ve vodě. Je vypočtena z atomové hmotnosti vodíku a kyslíku. (ISO 16993, 2017)

$$H_d = (H_{ad} - \frac{M_{ad}}{8,937}) \times \frac{100}{100 - M_{ad}}$$

Obsah kyslíku nelze změřit požitými zkouškami, kde se kyslík přivádí jako okysličovadlo, proto musí být dopočítán „Obsah kyslíku vztažený k spalitelné části tuhého biopaliva paliva se může vypočítat z rozdílu v bezvodém stavu“ (ISO 16993, 2017).

$$O_d = 100 - C_d - H_d - N_d - S_d - CL_d - A_d$$

U výhřevnosti je nutné provést opravu o $24.43 \times M$, Ta je dána teplem potřebným pro vypaření vody.

4.2.1 Zkoumané vzorky

Prvková analýza je provedena na vzorcích pocházejících ze středních čech. Jde o řepkovou slámu, pšeničnou slámu, smrkovou dřevní štěpku v čerstvém stavu a smrkovou kůru v čerstvém stavu.

Dřevní štěpka vznikne rozřezáním dřevní hmoty ostrým nástrojem na velikost pět od pěti do sta milimetrů. Kůra se získá jako vedlejší produkt při spracování dřeva na řezivo, kdy je před sprcováním odříznuta. Sláma vzniká jako vedlejší produkt při pěstování obalnin a olejnin. Při sklizni na zrno je sláma ponechána na poly kde vyschne a pak je zabalena a odvezena.

Norma ISO 17225–1 udává předpokládané hodnoty spalného tepla a výhřevnosti. Také udává množství jednotlivých prvků pro konkrétní biomasu. Jedná se pouze o informativní hodnoty kterým by se ale vzorky měly přibližovat. Hodnoty v tabulce č. 3 a tabulce č. 4 jsou vybrané hodnoty z normy ISO 17225 a jsou uvedené pro suchý stav vzorku.

Tabulka č. 3 vybrané hodnoty pro dřevo a kůru z jehličnatých stromů

| Dřevo z jehličnatých stromů | | |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Parametr | Typická hodnota | Typické rozmezí |
| Popel | 0,3 % | 0,1-1,0 % |
| Spalné teplo | 20,5 MJ.kg ⁻¹ | 20-20,8 MJ.kg ⁻¹ |
| Výhřevnost | 19,1 MJ.kg ⁻¹ | 18,8-19,8 MJ.kg ⁻¹ |
| C | 51 % | 47-54 % |
| H | 6,3 % | 5,6-7,0 % |
| N | 0,1 % | <0,1-0,5 % |
| S | <0,02 % | 0,01-0,02 % |
| Kůra z jehličnatých stromů | | |
| Popel | 3,0 % | <1-5 % |
| Spalné teplo | 20,4 MJ.kg ⁻¹ | 18-21,4 MJ.kg ⁻¹ |
| Výhřevnost | 19,2 MJ.kg ⁻¹ | 17,5-20,5 MJ.kg ⁻¹ |
| C | 52 % | 48-55 % |
| H | 5,9 % | 5,5-6,4 % |
| N | 0,5 % | <0,1-0,5 % |
| S | 0,03 % | 0,01-0,02 |

Zdroj: ISO 17225-1:2021 - výběr

Z tabulky je patrné, že dřevní štěpka má podobnou výhřevnost jako kůra. Výrazně se liší v obsahu popela. V kůře je také obsaženo víc síry. Velké koncentrace síry mohou poškodit spalovací zařízení a znečišťovat ovzduší.

Tabulka č. 4 vybrané hodnoty pro slámu z pšenice a slámu z řepky olejky

| Sláma z pšenice, žita, ječmene | | |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Parametr | Typická hodnota | Typické rozmezí |
| Popel | 5 % | 2-10 % |
| Spalné teplo | 18,8 KJ.kg ⁻¹ | 16,6-20,1 MJ.kg ⁻¹ |
| Výhřevnost | 17,6 MJ.kg ⁻¹ | 15,8 – 19,1 MJ.kg ⁻¹ |
| C | 47 % | 41-50 % |
| H | 6,0 % | 5,4-6,5 % |
| N | 0,5 % | 0,2-1,5 % |
| S | 0,1 % | <0,005-0,2 % |
| Sláma z řepky olejky | | |
| Popel | 5 % | 2-10 % |
| Spalné teplo | 18,8 MJ.kg ⁻¹ | 16,6-20,1 MJ.kg ⁻¹ |
| Výhřevnost | 17,6 MJ.kg ⁻¹ | 15,8 – 19,1 MJ.kg ⁻¹ |
| C | 48 % | 42-50 % |
| H | 6,0 % | 5,4-6,5 % |
| N | 0,5 % | 0,3-1,6 % |
| S | 0,3 % | <0,05-0,7 |

Zdroj: ISO 17225-1:2021 - výběr

Oba druhy slámy jsou si z palivářského hlediska velmi podobné. Sláma z řepky obsahuje větší množství síry, což může působit komplikace. Obecně má sláma větší obsah popele a menší výhřevnost než dřevní štěpka a kůra. Brikety a pelety z čisté dřevní štěpky jsou díky svým vlastnostem považovány za nejkvalitnější.

Sláma je získána jako vedlejší produkt při pěstování plodin na zrno. Lze ji tedy označit za odpadní biomasu. V mé práci se zabývám konkrétně pšeničnou a řepkovou slámou. Podíl zrna a slámy odpovídá u pšenice přibližně 1:1,1 a u řepky 1:1,8 (Print page). V roce 2022 bylo v ČR sklizeno 5 188 700 t pšenice (Ing. Anna Heřmanská, Ph.D. ; Ing. František Kůst, 2023). To odpovídá přibližně 2 717 890 t slámy. V roce 2021 bylo v ČR sklizeno 8 150 000 t řepky (Ing. Markéta Dvořáková, 2022). což odpovídá přibližně 5 239 286 t slámy. Těžba jehličnatého dřeva za rok 2022 v ČR dosahovala 23 050 000 m³ (Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství české republiky v roce 2022, 2023). To odpovídá přibližně 19 600 000 t.

4.3 Přístroje použité pro analýzu

Zpracování vzorků a stanovení jejich vlastností proběhlo v laboratoři analýzy organických materiálů TF CZU. Pro analýzu byly použity přístroje popsány níže.

4.3.1 Střížný mlýn Retscg SM 100

Mlýn je určen pro zpracování materiálů s nízkou vlhkostí. Velikost frakcí je možné měnit díky výměnným sítům od 0,25 do 20 mm. Rotor se pohybuje rychlostí 1500 otáček za minutu. Mlýn je vybaven záchytnou nádobou, do které namletý materiál vypadává.

4.3.2 Horkovzdušná sušárna Memmert UF 30

Sušárna disponuje komorou o objemu 32 l z nerezové oceli. Teplotní rozmezí je mezi 20° a 300 °C. V komoře je zabudovaný ventilátor pro nucené proudění vzduchu. Pro sušení extrémně vlhké vsádky je sušárna vybavena výfukovou klapkou pro odvod vlhkého vzduchu.

4.3.3 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701

Přístroj je určen k měření úbytku hmotnosti při zahřívání vzorku v peci v řízené atmosféře, konkrétně v atmosféře vzduchu obohaceného dusíkem. Analyzátor se skládá z pece s integrovaným karuselem a váhami. Celý proces je ovládán a vyhodnocován prostřednictvím počítače.

Do přístroje je vloženo 20 kelímků, jeden z nich je referenční, do zbylých 19 jsou vloženy vzorky. Přibližná hmotnost vzorku je 1 g, přístroj vzorky přesně zvaží. Kelímky musí být uzavřeny víčkem. Pak je pec uzavřena a proběhne analýza. Každý vzorek by měl být minimálně ve třech kelímcích.

Pro analýzu je potřeba k přístroji přivádět vzduch, kyslík a dusík. Ty jsou v tekuté podobě v tlakových lahvích. Pec dokáže vyvinout teplotu až 100 °C a regulace teploty probíhá až o 50 °C.min⁻¹. Rozlišení vah je 0,0001 g a výsledné hodnoty jsou s přesností 0,02 %.

Pracoviště s analyzátozem a počítačem je pro ilustraci vyfocené na obrázku č 3.



Obrázek č. 3 5.3.3 Termogravimetrický analyzátor LECO TGA-701

4.3.4 Laboratorní váha Sartorius SP124 S

Váha pracuje s přesností na 0,1 mg. Prostor váhy je zakryt ochrannými kryty proti proudění vzduchu. Váha je v laboratoři umístěna na váhovém stole. Váhový stůl tlumí otřesy a vibrace, uprostřed se nachází leštěná mramorová deska umístěná na gumových podložkách. To zabraňuje zkreslení výsledku vážení.

4.3.5 Analyzátor LECO CHN 628

Slouží ke stanovení obsahu dusíku, uhlíku a vodíku v organických materiálech. Pracuje s teplotou až 1050 °C. Funguje na principu spalovací analýzy. Vzorek je vložen do fóliového kelímku postaveného na váze Sartorius SP124 S a zvážen. Váha je propojena se stejným počítačem jako analyzátor. Zvážený vzorek je přemístěn do automatického podavače. Vzorek je spálen v atmosféře čistého kyslíku v primární komoře. Tam dojde k úplné oxidaci vzorku. Výsledné produkty oxidační reakce jsou dopraveny héliem do druhé komory. Přístroj je na obrázku č 4. vlevo, vpravo jsou tlakové láhve s přiváděnými plyny.



Obrázek č. 4 5.3.5 Analyzátor LECO CHN 628

4.3.6 Analyzátor LECO CHN 628+S

Jedná se o modul pro stanovení síry k analyzátoru LECO CHN 628, na obrázku č 5 vlevo. Přístroj je stejně jako analyzátor LECO CHN 628 propojen s počítačem a s vahou Sartorius SP124 S. Vzorek je zvážen ve spalovací lodičce a přesunut do analyzátoru. Spalovací komora, kde se spaluje v atmosféře čistého kyslíku se vyhřívá na 1350 °C. Odtamtud jdou plyny

do vnitřní spalovací trubice, kde pokračuje oxidace. V další trubici je pomocí chloristanu hořečnatého odstraněna vlhkost. Analýza probíhá v infračervené detekční komoře.



Obrázek č. 5 5.3.5 Analyzátor LECO CHN 628 s modulem pro stanovení síry

4.3.7 Kalorimetr LECO AC-600

Vzorek se zváží na váze váhou Sartorius SP124 S, propojené se stejným počítačem jako kalorimetr, hmotnost vzorku se pohybuje okolo 1 g. Pak je vzorek slisován do tablety. Pro tento účel je v laboratoři umístěn ruční lis. Po slisování je vzorek znovu zvážen. Pak je vložen do kovového kelímku. Kelímek je součástí bomby kalorimetru. Vzorku se musí dotýkat spalovací nit. Bomba se uzavře, natlakuje kyslíkem, ponoří do vodní lázně a vzorek se spálí. Teplota vody v lázni je změřena elektrickým teploměrem s přesností 0,0001 °C. Teplo uvolněné do vodní lázně je úměrné spalnému teplu.

Na obrázku č 6 je vidět kalorimetr s rozebranou bombou.



Obrázek č. 6 5.3.7 Kolorimetr L ECO AC-600

4.4 Naměřené hodnoty

Výsledky měření jsou zpracovány v tabulce. V původním stavu je změřena pouze vlhkost. Ostatní hodnoty jsou změřeny pro analytický vzorek. Z naměřených hodnot pro analytický vzorek jsou dopočítány hodnoty v původním stavu a hodnoty pro hořlavinu, tedy bez popela. Přepoččet byl proveden v programu MS excel podle metodiky obsažené v normě ISO 16993.

4.4.1 Výsledky laboratorního měření

Výsledky naměřené pro laboratorní vzorek, uvedené v tabulce č 5, Jsou průměrné výsledky několika měření. Pro stanovení vlhkosti bylo provedeno osm měření, pro stanovení obsahu síry pět a pro stanovení obsahu uhlíku vodíku a dusíku čtyři. Pro stanovení spalného tepla byla provedena také 4 měření.

Tabulka č. 5 Analytický vzorek

| Analytický vzorek | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| | Vlhkost | Popel | C | H (vč. vody) | N | S | Spalné teplo za konst. obj. | Výhřevnost za konst. tlaku |
| | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | MJ.kg ⁻¹ | MJ.kg ⁻¹ |
| Řepková sláma | 8,76 | 8,23 | 42,03 | 4,84 | 0,60 | 0,11 | 16,95 | 15,89 |
| Pšeničná sláma | 7,84 | 6,90 | 40,82 | 5,41 | 0,34 | 0,03 | 16,25 | 15,06 |
| Dřevní štěpka čerstvá (smrk) | 9,82 | 1,22 | 42,75 | 5,82 | 0,79 | 0,01 | 18,36 | 17,08 |
| Kůra čerstvá (smrková) | 9,57 | 1,76 | 45,13 | 5,85 | 0,39 | 0,01 | 18,09 | 16,81 |

V tabulce č 6 jsou hodnoty přepočítané pro suchý stav, podle metodiky obsažené v normě ISO 16993.

Tabulka č. 6 Suchý stav

| Suchý stav | | | | | | | | | |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| | Popel | C | H | N | S | O | Spalné teplo za konst. obj. | Spalné teplo za konst. tlaku | Výhřevnost za konst. tlaku |
| | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | MJ.kg-1 | MJ.kg-1 | MJ.kg-1 |
| <i>Řepková sláma</i> | 9,02 | 46,06 | 4,23 | 0,66 | 0,12 | 39,91 | 18,58 | 18,57 | 17,65 |
| <i>Pšeničná sláma</i> | 7,49 | 44,29 | 4,92 | 0,36 | 0,03 | 42,90 | 17,63 | 17,63 | 16,55 |
| <i>Dřevní štěpka čerstvá (smrk)</i> | 1,36 | 47,40 | 5,24 | 0,87 | 0,01 | 45,12 | 20,36 | 20,35 | 19,21 |
| <i>Kůra čerstvá (smrková)</i> | 1,95 | 49,90 | 5,28 | 0,43 | 0,01 | 42,43 | 20,01 | 20,01 | 18,85 |

V tabulce č. 7 jsou hodnoty přepočítané na hořlavinu obsaženou ve vzorku, přepočet proběhl podle metodiky obsažené v normě ISO 16993.

Tabulka č. 7 Hořlavina

| Hořlavina | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------------|---------------------|
| | C | H | N | S | O | Spalné teplo | Výhřevnost |
| | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | MJ.kg ⁻¹ | MJ.kg ⁻¹ |
| Řepková sláma | 50,63 | 4,65 | 0,72 | 0,13 | 43,86 | 20,42 | 19,40 |
| Pšeničná sláma | 47,88 | 5,32 | 0,39 | 0,04 | 46,37 | 19,05 | 17,89 |
| Dřevní štěpka čerstvá (smrk) | 48,05 | 5,31 | 0,88 | 0,01 | 45,75 | 20,63 | 19,47 |
| Kůra čerstvá (smrková) | 50,89 | 5,39 | 0,44 | 0,01 | 43,27 | 20,40 | 19,23 |

V tabulce č. 8 jsou uvedené hodnoty pro původní vzorek. Tedy pro materiály pro které byl prováděn rozbor. přepočet proběhl podle metodiky obsažené v normě ISO 16993.

Tabulka č. 8 Původní vzorek

| Původní vzorek | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|--------------|--------------|---------------|-------------|-------------|---------------|------------------------------|----------------------------|
| | Vlhkost vzorku | Popel celkem | C | H – v hořlavě | N | S | O – v hořlavě | Spalné teplo za konst. tlaku | Výhřevnost za konst. tlaku |
| | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | % hm. | MJ.kg-1 | MJ.kg-1 |
| Řepková sláma | 12,01 | 7,94 | 40,53 | 3,72 | 0,58 | 0,11 | 35,12 | 16,34 | 15,24 |
| Pšeničná sláma | 13,11 | 6,51 | 38,49 | 4,28 | 0,32 | 0,03 | 37,28 | 15,32 | 14,06 |
| Dřevní štěpka čerstvá (smrk) | 40,22 | 0,81 | 28,34 | 3,13 | 0,52 | 0,01 | 26,98 | 12,17 | 10,50 |
| Kůra čerstvá (smrková) | 49,83 | 0,98 | 25,04 | 2,65 | 0,22 | 0,00 | 21,29 | 10,04 | 8,24 |

4.5 Návrh paletizační jednotky

Návrh se zabývá menší linkou určenou pro zpracování biomasy z lokálních zdrojů. Konkrétně přebytků ze zemědělské výroby a přebytečného dřeva z lesního hospodářství, nebo dřevozpracujícího průmyslu. Vhodnou formou využití biomasy je výroba pelet. Mají větší objemovou hmotnost než nezpracovaná biomasa. Umožňují automatické dávkování a je možné je dodávat velkoodběratelům i domácnostem.

4.5.1 Vhodné technologie

Kvůli stanovení množství a kvality vstupních parametrů bývají suroviny váženy a dochází k odběru vzorků. U odebraných vzorků se zkoumá vlhkost a obsah popela.

Pro výrobu pelet by se vlhkost měla pohybovat mezi 10 a 14 % v závislosti na lisu. Pokud chceme využívat různé druhy biomasy v jednom zařízení měla by z nich být vytvořena co nejvíce homogenní směs. Proto je vhodné do procesu zařadit technologii míchání.

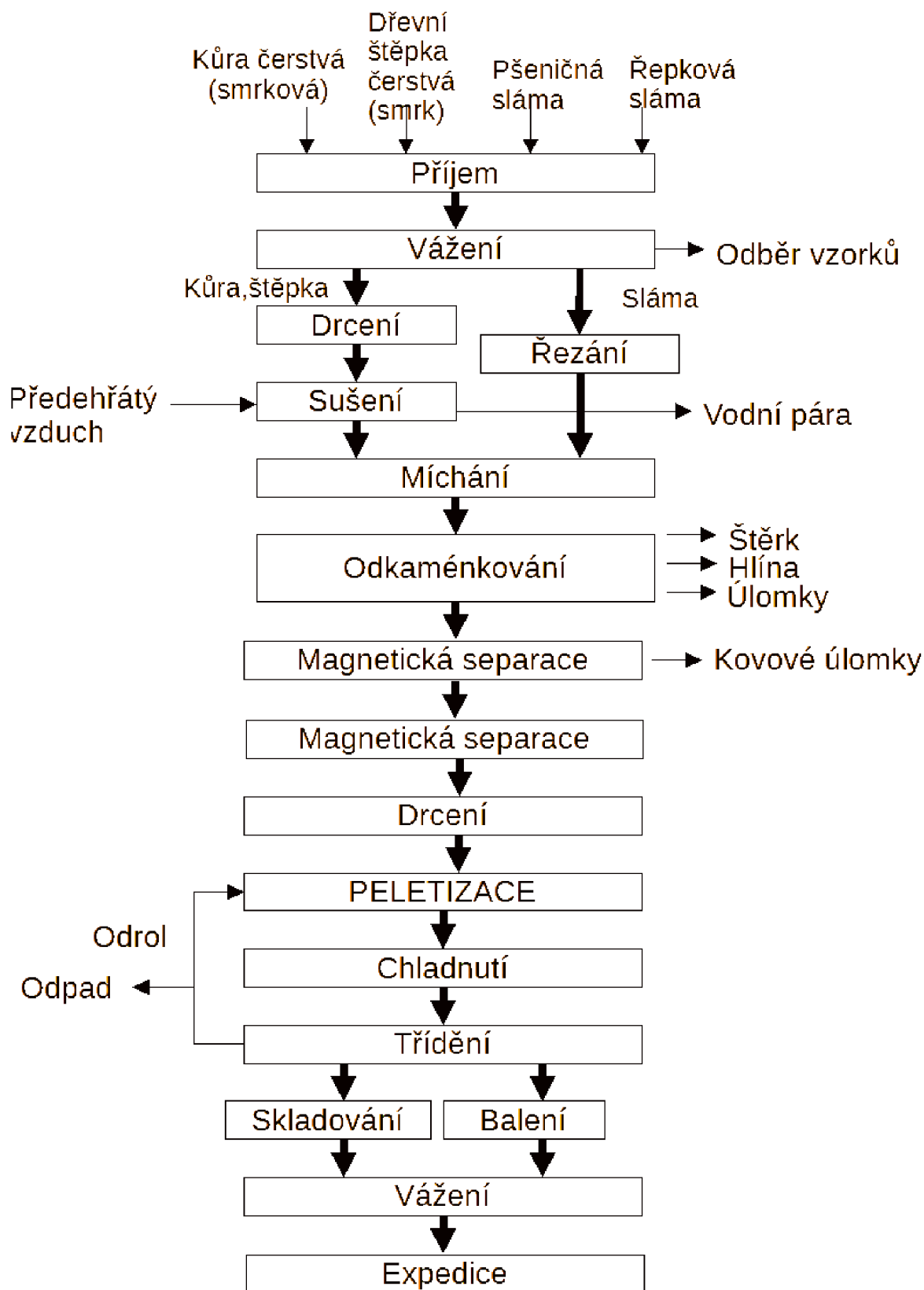
Testovaná dřevní štěpka a kůra mají vlhkost 40,22 % a 49,83 %. Vlhkost čerstvě vytěženého dřeva se okolo 40 % pohybuje běžně. Proto je vhodné pro ně zařadit technologii sušení, například s použitím bubnové sušárny. Energetickou náročnost sušení lze snížit, pokud se před sušením zařadí mletí. Tím se zvýší plocha částic a vlhkost může lépe odcházet.

Sláma se skládá z příliš dlouhých částic. K vytvoření menších frakcí slámy je vhodná technologie řezání, případně drcení. Řezání má nižší energetickou náročnost, ale drtič umožňuje zmenšovat frakce i u dřevní biomasy.

Vzhledem k tomu, že zkoumaná biomasa nepochází z výroby a nese s sebou z pole, nebo z lesa cizí předměty, hrozí poškození matrice kamením, hlinou, nebo úlomky strojů. Proto by měla být zařazena technologie odkaménkování a magnetická separace. Po odstranění nežádoucích předmětů je materiál rozdrcen kladívkovým šrotovníkem na fragmenty o velikosti 2–3 mm. Ty se následně protlačí skrz matici a vzniknou pelety. Pelety je nutné schladit. Chlazení probíhá vzduchem během dopravy. Částice, které odpadnou se vrací zpět před lis. Vychlazené pelety jsou buď uskladněny v síle nebo zabaleny do neprodyšného obalu. Pelety ze síle mohou být odváženy v nákladních autech, nebo v cisternách. Pokud jsou vysoké požadavky na kvalitu výstupního materiálu mohou být odebrány vzorky a proveden rozbor. Posloupnost technologií je graficky znázorněn v technologickém schématu na obrázku č 7.

Míra automatizace a složitost výrobního procesu závisí na množství vyráběných pelet. Pro menší provoz nedává smysl mít linku plně automatickou a některé technologie by mohly být příliš náročné na pořízení.

Navržená technologie by měla umožňovat výrobu pelet smíchaných z více druhů biomasy, ale i výrobu jednodruhových pelet. To by umožnilo v závislosti na cenách a dostupné surovině měnit výrobní sortiment.



Obrázek č. 7 Schéma navrhované technologie výroby pelet

Náklady na teplo a elektrickou energii je možné snížit instalací kogenerační jednotky na pelety nebo dřevní štěpku přímo v areálu. Tím se může výrobní linka stát energeticky soběstačnou.

4.5.2 Návrh strojního zařízení

Návrh se týká menší jednotky s produkcí až $1500 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$.

Přivezená biomasa se zváží na mostové váze. Pracovník odebere vzorky pro stanovení vlhkosti a prvkovou analýzu. Pak bude biomasa složena na betonovou manipulační plochu. Odtud bude kolovým nakladačem dávkována do velkoobjemových násypků s posuvným dnem od společnosti Kovo Novák. V prostoru před zásobníky bude umístěn rozebírač balíků HZ 1300/15 kW. Sláma z rozebraných balíků bude vypadávat na zem a bude odvážena kolovým nakladačem do zásobníku. Výkonost tohoto stroje je až $2800 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Pokud jsou požadovány menší frakce, mohou být instalována síta. Tím se sníží výkonost.

Ze zásobníků budou materiály dopravovány k další technologii.

K prvnímu drcení dřevní štěpky a kůry bude určen šrotovník Kovo Novák RS 750 vybavený hrubým sítem s výkoností až $900 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Řezání slámy bude v případě potřeby zajištěno už před zásobníkem použitím síta v rozebírači balíků.

Sušení štěpky a kůry bude provedeno sušárnou Votona s výkoností $400\text{--}600 \text{ kg}$ za hodinu. Pro vlhkost okolo 40 % by se měla výkonost pohybovat okolo $550 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Teplo bude do sušárny přivedeno teplovodem ze sousední budovy. Za sušárnou bude umístěna násypka o objemu 3 m^3 jako zásobní silo. To zajistí vyrovnanější materiálový tok a umožní střídavě vyrábět pouze dřevěné nebo pouze slámové pelety

Hrubé míchání materiálů bude probíhat kontinuálně během dopravy. K úplnému promíchání dojde během šrotování.

Do šrotovníku bude materiál dopraven pásovým dopravníkem. Během dopravy dojde k magnetické separaci kovových úlomků za použití blokových magnetů. Při správné vzdálenosti konce dopravníku od další technologie těžké předměty jako jsou kameny spadnou na zem.

Šrotovník RS 1000 Kovo Novák je s udávanou výkoností $1250\text{--}3500 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ dostačující. Z něj bude nadrcený materiál pokračovat rovnou do peletizační linky.

Granulační a peletovací linka MGL 1000 Kovo Novák má předpokládanou výkonost $200\text{--}900 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, maximálně $1500 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Hotové pelety budou dopraveny do tří různých zásobníků o objemu 3 m^3 od společnosti Kovo Novák. To umožní rozdělit šarže pelet s různým složením.

Pokud budou zásobníky plné, mohou být pelety volně loženy na betonové podlaze. Ze zásobníků, nebo z podlahy budou pelety expedovány, případně baleny do neprodyšných obalů.

Balení do pytlů zajistí balička F1000 ECO FOCUS. Stroj zvládne zabalit 7 až deset pytlů za minutu. Při 15 kg balení zabalí 7 pytlů. To odpovídá 420 pytlům za hodinu, to je 6300 kg za hodinu. To výkoností značně převyšuje výkonost zbytku linky. Stroj s nižší výkoností by musel být poptán na zakázku, a tudíž by pořizovací náklady mohly být vyšší, nebo srovnatelné. Tudíž balení nebude probíhat po celou dobu provozu linky. Balička je plně automatická. Součástí je váha pro přesné dávkování a pás který dopraví hotové pytle pryč. Pracovník pytle naskládá na paletu a odveze. Pokud by byl zájem o celé palety pelet v pytlích pracovník je zabalí do strachové fólie.

Tabulka č. 9 Příkon navrhovaných strojů

| Stroj | Příkon |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Mostová váha | |
| Rozebírač balíků HZ 1300/15 kW | 46 kW |
| Násypka s posuvným dnem Kovo Novák | 9 kW (4x) |
| Sušárna votona – buben, ventilátor | 1,5 kW; 30 kW (+tepelný výkon 400KW) |
| Šrotovník RS 1000 | 50 kW |
| Granulační a peletovací linka MGL1000 | 62 kW |
| Balička F1000 ECO FOCUS | 6 kW |
| Dopravníky | 5 kW |
| Maximální příkon celkem | 159,5 kW |

Maximální příkon elektrické energie všech strojů je důležitý pro dimenzování elektrické rozvodné sítě a přivedení dostatečné kapacity pro jejich napájení. Příkon všech strojů je rozepsán v tabulce č 9.

Příkon kontinuálně pracujících strojů ukazuje minimální spotřebu energie v průběhu výroby. Odpovídá příkonu sušárny, šrotovníku, peletovací linky a dopravníků. To odpovídá 148,5 kW elektrické energie. Sušárna ještě spotřebuje 400 kW v teple.

Podle pořizovací ceny jsou možné dvě varianty. První varianta počítá s odběrem elektrické energie ze sítě a ohřevem sušárny s využitím tepla získaného spálením části biomasy v kotli.

Druhá varianta počítá s využitím kogeneračních jednotek. Provoz by byl energeticky soběstačný. Získaným teplem by se ohřívala sušárna a elektrická energie by bez problémů stačila na pokrytí provozu. Přebytečná elektrická energie by mohla být prodávána do sítě.

Vhodnou kogenerační jednotkou je mikrokogenerační jednotka Volter 40 Indoor. Jednotka dokáže dodávat 40 kW elektrické energie a 100 kW tepelných. Jednotek je možné instalovat víc. Pro plnou soběstačnost provozu by měly stačit čtyři jednotky. Aby byla dostačená výkonová rezerva je vhodné jich instalovat pět. Jednotka obsahuje zplynovací zařízení, plynový motor, generátor elektrické energie a tepelné výměníky. Jako palivo slouží dřevní štěpka. Spotřeba paliva jedné jednotky při plném výkonu dosahuje $37,5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, nebo $4,5 \text{ m}^3/\text{den}$ (Volter). Hodinová spotřeba štěpky při provozu čtyř jednotek odpovídá 150 kg, při provozu pěti jednotek 187,5 kg.

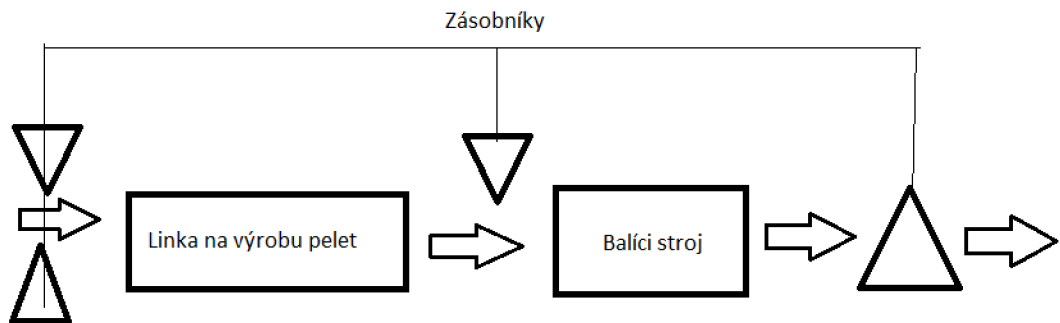
Zařízení je možné regulovat. Kontrolu chodu jednotky je možné vykonávat vzdáleně, díky připojení prostřednictvím ADSL, nebo sim karty (Volter). Připojení přes ADSL umožní spolehlivé propojení všech jednotek do vnitřní sítě výrobního podniku.

Kvůli požární bezpečnosti je vhodné stavebně oddělit výrobu pelet a kogeneraci. Výroba i kogenerace se budou odehrávat v montovaných halách. Laboratoř a kancelář budou umístěny v mobilních buňkách, nebo již existujícím objektu.

4.5.3 Ekonomická stránka výroby

Ke snížení nákladů na výrobu je nutné správně navrhnout a řídit výrobní proces. Na návrh linky je aplikována teorie úzkých míst (TOC). Tato metoda hledá úzká místa a snaží se je eliminovat. V navrhovaném provozu byla identifikována dvě případná úzká místa. Konkrétně případný nedostatek vstupních surovin zapříčiněný možnou nepravidelností dodávek a příliš velká výkonost balicího stroje, ze kterého je potřeba odebírat pytle, což může zapříčinit jeho zahlcení. Nepravidelnost dodávek bude řešena držením přiměřených skladových zásob. Do stroje na balení budou pelety dopravovány ze zásobníků. Součástí balicího stroje je

malá násypka. Měl by tudíž mít konstantní dodávky. Ve zjednodušené formě je řešení problémů s úzkými místy pomocí zásobníků znázorněno na obrázku č. 8.

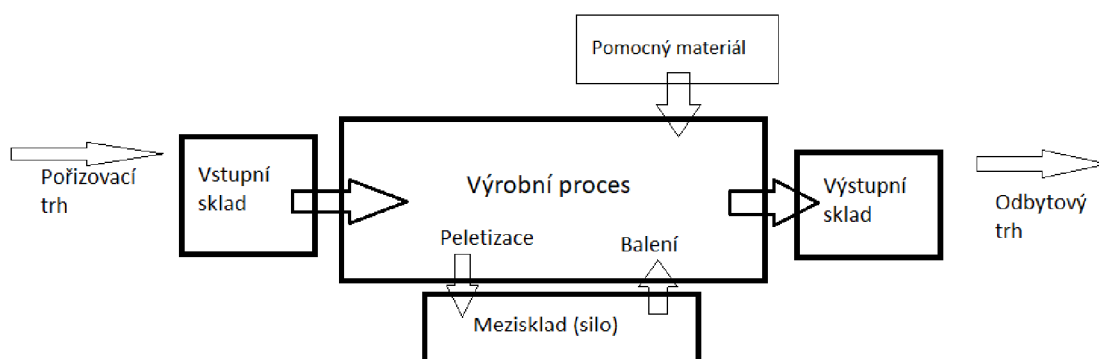


Obrázek č. 8 Řešení úzkých míst

Metoda MUD se zabývá plýtváním. Plýtvání materiálem bude minimalizováno díky vracení odrolu před lis. U balícího stroje a rozebírače balíků hrozí plýtvání lidskými zdroji, Oba stroje velkou část doby nebudou pracovat. Obsluha balícího stroje bude brigádník, nebo zaměstnanec na částečný úvazek. Rozebírací stroj bude obsluhovat řidič nakladače nebo brigádník. Pracovník provádějící rozbor bude zároveň dohlížet na chod linky.

Pro optimalizaci výrobních procesů je dobré sledovat materiálový tok ve výrobě. Jeho znalost umožní efektivně rozmístit jednotlivé technologie a sladit návaznost procesů. Díky znalosti materiálového toku může pracovník odpovědný za zajištění dodávek a odbytu správně odhadnout situaci a efektivně využít kapitál. K tomuto účelu slouží zjednodušená schémata materiálového toku na obrázku č 9.

Materiálový tok



Obrázek č. 9 Materiálový tok - schematicky

Další metodou jak zajistit vyšší rentabilitu je metoda reengineeringu a redesignu. Podle ní by mělo být po spuštění výroby na výrobní proces dohlíženo. Měla by se průběžně vyhodnocovat jeho efektivnost. Pokud proces není ekonomicky efektivní má být pozměněn, vynechán, nebo nahrazen. Pokud výsledné výrobky nedosahují požadované kvality, má být výrobní postup upraven, tak aby došlo k nápravě.

Pořizovací ceny většiny použitých strojů bohužel není možné z veřejně dostupných zdrojů dohledat. To znemožňuje určit dobu návratnosti investice. Náklady na provoz se skládají z nákladů na získání vstupních surovin, nákladů na mzdy a nákladů na opravy. Příjmy plynou z prodeje pelet a případných přebytků energie.

Cena dřevní štěpky se pohybuje mezi 250 a 700 Kč za prostorový metr sypaný. To odpovídá v přepočtu přibližně 1-1,5 Kč za kg. Cena balíku slámy se pohybuje od 250 do 1000 Kč. Hmotnost balíku se pohybuje okolo 150 kg. Při ceně 250 Kč za balík je cena jednoho kg 1,7 Kč.

Pokud zanedbáme kamení a úlomky strojů, je pro výrobu 1 kg pelet z dřevní štěpky potřeba 1,3 kg štěpky o vlhkosti 40 %. Čtyři jednotky. Volter 40 Indoor spotřebují za hodinu 150 kg dřevní štěpky.

Pro samotnou výrobu dřevěných pelet, pokud bychom počítali s průměrnou výrobou 350 kg pelet za hodinu, bude potřeba 455 kg štěpky v původním stavu. Hodinová spotřeba štěpky čtyř jednotek Volter je 150 kg. Celková spotřeba štěpky pro výrobu pelet a energie odpovídá

605 kg štěpky za hodinu. Z 605 kg štěpky vznikne 350 kg dřevních pelet. Po přepočtení zjistíme, že na výrobu 1 kg pelet z dřevní štěpky použijeme 1,7 kg štěpky o vlhkosti 40 %. To výrobním nákladům $1,7 \cdot 2,55 \text{ Kč} \cdot \text{kg}^{-1}$ volně ložených dřevních pelet.

Kogenerační jednotka dodává teplo po celou dobu provozu. Jediné jeho využití je pro provoz sušárny, proto by výroba pelet ze slámy měla být pouze doplňková, aby energie nepřišla nazmar. Na výrobu 1 kg pelet se použije přibližně 1,2 kg slámy. Elektrická energie bude vyrobena z dřevní štěpky. Výroba pelet pouze ze slámy bez výroby pelet z dřevní štěpky nebo kůry by nevyužívala teplo z kogenerační jednotky. Náklady by se skládaly z nákladů na zařízení slámy a štěpky do reaktoru. To odpovídá 2,4 Kč za zařízení slámy pro výrobu 1 kg volně ložených pelet. S rostoucím podílem kůry v peletách cena klesá. Výroba pouze slámových pelet by byla dražší než výroba pelet ze štěpky a jejich hodnota jako paliva je nižší. Šlo by tedy o vedlejší výrobu.

Pokud by byl dostatečný přísun dřevní štěpky a příznivá cena zařízení je výhodnější dokoupit druhou sušárnu na štěpku a slámové pelety nevyrábět. Při použití kogeneračních jednotek by mohla být elektrická energie prodávána do sítě. Alternativou je pro druhou sušárnu využít jako zdroj tepla kotel.

Pokud by se povedlo vyrábět slámové pelety bez příměsi štěpky v odpovídající kvalitě, je možné je prodat jako stelivo. Cena pelet jako steliva se pohybuje okolo 20 Kč/kg zabalených pelet. Balení přináší další náklady na materiál a zaměstnance.

Pelety čisté z kůry se pro domácí vytápění příliš nehodí kvůli vysokému obsahu popela, tudíž o ně není velký zájem. Rentabilita jejich výroby by závisela na ceně vstupní suroviny a na nalezení vhodného odběratele. S velkou pravděpodobností není vhodné výrobu pelet z kůry vůbec zařazovat do výrobního procesu.

Celková náklady by se skládaly z nákladů na nákup vstupních surovin a pomocného materiálů, odpisů, nákladů na mzdy a nákladů na opravy. Příjmy by se skládaly z příjmů z prodeje štěpky a případně z příjmů z prodej přebytků elektrické energie.

Provoz by měly pokrýt dva, maximálně tři úvazky. Dohromady by měsíční výdaje na mzdu neměly přesáhnout 150 000. To by odpovídalo 1 800 000 ročně. Pokud počítáme dobu provozu 252 dní po sedmi hodinách, budou roční náklady na vstupy pod 5 000 000 Kč. Příjmy z prodeje při průměrné ceně produktu 7 Kč/kg by se měly pohybovat okolo 11 000 000 Kč. Teoretický roční zisk po odečtení materiálů na vstupní surovinu a na mzdy by činil 4 200 000 Kč. Pro zjištění reálného zisku by bylo nutné připočítat odpisy strojního zařízení a náklady na opravu.

5 Výsledky a diskuse

5.1 Měření

Z měření je patrné, že průměrné hodnoty žádného ze zkoumaných vzorků nevybočují z běžných hodnot. Všechny vzorky odpovídají běžným vzorkům podle ISO 16993. Měření potvrzuje obecný předpoklad, že sláma v suchém stavu obsahuje výrazně větší množství popela, než dřevní štěpka a kůra.

U původních vzorků štěpky a kůry je možné pozorovat výrazně vyšší vlhkost než u původních vzorků slámy. To je dáno tím, že zemědělské plodiny se sklízají do určité míry vyschlé a sláma se nechává prosychat během sklizně na polích.

Dřevní štěpku je vzhledem k vysoké vlhkosti vhodné pro další využití usušit. Po vysušení je díky nízkému obsahu popela a nežádoucích látek žádaným palivem. Zajímavé je porovnání se dřevem vytěženým ve středních Čechách po kůrovcové kalamitě v roce 2020. V porovnání s dřevem z těžby po kůrovcové kalamitě je vidět, že je vlhkost mnou zkoumaného vzorku štěpky výrazně vyšší. Hodnoty je možné porovnat v tabulce č. 10. Rozdílná vlhkost je zapříčiněná pravděpodobně vysycháním dřeva v lese.

Pro porovnání dalších vlastností byly hodnoty převedeny na analytický stav. Z tabulky č. 10 je patrné, že kůrovcové dřevo má menší podíl popela a dusíku. To naznačuje menší podíl kůry. Výhřevnost kůrovcového dřeva v suchém stavu je nižší, ale u původního vzorku je nižší výhřevnost zkoumané štěpky.

Tabulka č. 10 porovnání výsledků analýzy štěrky s dřevem vytěženým po kůrovcové kalamitě

| | Vlhkost | Popel | C | H (vč. vody) | N | Spalné teplo za konst. obj. | Výhřevnost za konst. tlaku |
|----------------------------------------------|---------|---------|---------|--------------|---------|--------------------------------|----------------------------------|
| | [% hm.] | [% hm.] | [% hm.] | [% hm.] | [% hm.] | [MJ.kg ⁻¹] | [MJ.kg ⁻¹] |
| Původní stav | | | | | | | |
| Smrkové dřevo po kůrovcové kalamitě | 15,50 | 0,36 | 52,41 | 6,01 | 0,15 | 15,54 | 14,23 |
| Dřevní štěrka čerstvá (smrk) | 40,22 | 0,81 | 28,34 | 3,13 | 0,52 | 12,17 | 10,5 |
| Suchý stav | | | | | | | |
| Smrkové dřevo po kůrovcové kalamitě | | 1 | 62,02 | 5,06 | 0,18 | 18,39 | 17,28 |
| Dřevní štěrka čerstvá (smrk) | | 1,36 | 47,4 | 5,24 | 0,87 | 20,36 | 19,01 |

Zdroj: (doc. Ing. Jan Malaták, a další, 2021) – vybrané hodnoty; vlastní měření

5.2 Realizace výrobní linky

Pro realizaci podnikatelského záměru na stavbu peletizační linky by byla nutná hlubší analýza. Konkrétně najít vhodnou lokalitu, kde bude stálý přísun materiálu a odbytu pelet. Dalším bodem by bylo přesnější stanovení předpokládaných cen vstupů a výstupů a přesné stanovení pracovního fondu a mezd.

Pro všechny podnikatelské projekty je důležitá doba návratnosti. Pro její výpočet je nutné znát cenu realizace. Musel by být zpracován projekt a poptány všechny stroje.

Vhodné je zkombinovat výrobu palivových pelet z dřevní štěrky s výrobou pelet ze slámy určených pro nastýlání.

Použití kogeneračních jednotek zbavuje provoz závislosti na dodávkách elektrické energie. To umožňuje lépe předvídat náklady.

Projekt se zdá být ekonomicky výhodný. Pokud zanedbáme náklady na pořízení strojů a na opravy, příjmy výrazně převyšují náklady

6 Závěr

Biomasa je důležitým zdrojem energie. Dá se předpokládat, že její význam v budoucnu poroste.

Práce poskytuje základní přehled o legislativě a normách spojených s biomasou. Ukazuje průřez technologiemi pro zpracování a využití tuhé biomasy. Zabývá se hlavně technologiemi využívajícími termochemické procesy.

Prvková analýza potvrzuje předpokládané vlastnosti zkoumaných vzorků. Z výsledků je jasné patrné, že dřevní štěpka je ze zkoumaných vzorků z hlediska složení nejvhodnější jako palivo. Vlhkost dřevní štěpky a kůry je výrazně větší než vlhkost slámy. Řepková sláma obsahuje velké množství síry.

Dřevní štěpka má vyšší vlhkost, než dřevo napadené kůrovcem. V suchém stavu obsahuje víc popela.

Návrh peletizační linky vychází ze základní znalosti technologie a zkoumaného materiálu. Linka byla navržena pro vzorky, jejichž prvková analýza ukázala vysokou podobnost s běžně dostupnými materiály. Navrhovaná linka je pro menší objemy, což by v případě realizace ulehčilo zásobování. Výroba by byla díky kogeneračním jednotkám energeticky soběstačná. Z předběžného vyhodnocení ekonomické bilance návrhu vyplývá, že by projekt měl být výtěžný. Dobu návratnosti investice nelze určit bez znalosti ceny investice.

7 Seznam použitých zdrojů

- 01400, O. k. (2. 7 2024). *Aktualizace Státní energetické koncepce (SEK) | MPO*. Načteno z MPO: <https://www.mpo.cz/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/aktualizace-statni-energeticke-koncepce-sek--279668/>
- (23. 3 2024). Načteno z Elektrárna Hodonín Skupina ČEZ - O Společnosti: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/uhelne-elektrarny-a-teplarny/uhelne-elektrarny-a-teplarny-cez-v-cr/elektrarna-hodonin-58184>
- Biomasa Skupina ČEZ - O Společnosti*. (22. 3 2023). Načteno z <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobni-zdroje/obnovitelne-zdroje/biomasa-1>
- doc. Ing. Jan Malaťák, P., doc. Ing. Martin Jankovský, P., Ing. Barbora Tamelová, P., Ing. Luboš Passian, P., Velebil, I. J., & Malaťáková, I. J. (2021). *Závěrečná zpráva projektu APLIKACE ZPLYŇOVACÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI ENERGETICKÉM VYUŽITÍ JEHLIČNATÝCH DŘEVIN Z KŮROVCOVÉ A KALAMITNÍ TĚŽBY*. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Electricity Maps | Emise CO₂ ze spotřeby elektřiny v reálném čase*. (2024). Načteno z <https://app.electricitymaps.com/zone/CZ>
- Ing. Anna Heřmanská, Ph.D. ; Ing. František Kůst. (2023). *Situační a výhledová zpráva obyloviny 2022*. Praha: Ministerstvo zemědělství,.
- Ing. Markéta Dvořáková. (2022). *Situační a výhledová zpráva olejnin 2021*. Praha: Ministerstvo zemědělství.
- Ing. Petr Trávníček, P. D. (2015). *TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ BIOMASY ZA ÚČELEM ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ*. Brno: Mendelova univerzita v Brně Agronomická fakulta.
- Ing. Václav Peer, I. P. (9. 4 2023). *Zplyňování – principy a reaktory*. Načteno z [tzb-info.cz: https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory](https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-pevnymi-palivy/13729-zplynovani-principy-a-reaktory)
- ISO 16559. (2022). *Tuhá biopaliva - Slovník*. Česká agentura pro standardizaci.
- ISO 16993. (2017). *Tuhá biopaliva - přepočet analýz výsledků pro různé stavy biopaliv*.
- ISO 17225 - 1. (2022). *Tuhá biopaliva - Specifikace a třídy paliv - Část 1: Obecné požadavky*. Česká agentura pro standardizaci.
- ISO 21640. (2022).
- Jevič, P., Hutla, P., & Šedivá, Z. (2006). *Udržitelná výroba a řízení jakosti tuhých paliv na bázi agrárních produktů - Metodická příručka MZE ČR*. Praha: Ministerstvo zemědělství.

- Jírouš, F. (2013). *Efektivní spalování paliv*. Praha: Český svaz zaměstnavatelů v energetice.
- MPO. (2014). Státní energetická koncepce České Republiky.
- Pastorek, Z., Kára, J., & Jevič, P. (2004). *Biomasa obnovitelný zdroj energie*.
- Print page*. (2024-03-22 11:30:15). Načteno z Organická hnojiva ostatní:
http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=1543&typ=html
- Stroje na zpracování biomasy Kovo Novák*. (2023). Načteno z Kovo Novák:
https://www.kovonovak.com/bio_category/stroje-na-zpracovani-biomasy/
- Volter. (nedatováno). technická specifikace a konstrukční hodnoty Volter 40 indoor mikrokogenerační jednotak na biomasu. Teplice: Dimfeja holding a.s.
- Vyhláška č. 169/2023 Sb. o stanovení podmínek, při jejichž splnění přestává být tuhé palivo z odpadu odpadem. (2023). *Sbírka zákonů*.
- zákon č. 165/2012 Sb., o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů, (1. ledna 2022). *Sbírka zákonů*.
- Zákon č. 541/2020 Sb. o odpadech. (2020). *Sbírka zákonů*.
- Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství české republiky v roce 2022*. (2023). Praha: Ministerstvo zemědělství.