



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**ANALÝZA ENERGETICKÉHO VYUŽITÍ
KÁVOVÝCH PELET**

ANALYSIS OF ENERGY USING OF COFFEE PELLETS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Sedláček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Lisý, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Daniel Sedláček**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Energetické inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Martin Lisý, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Analýza energetického využití kávových pelet

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá komplexní studií možnosti energetického využití zbytku z přípravy kávy. Možností peletování daného materiálu a jejího energetického využití pro spalování, včetně základní studie potenciálu daného materiálu.

Cíle diplomové práce:

- provést rešerzi dostupných materiálů o spalování zbytků kávy a alternativních paliv obecně, včetně základních palivových vlastností
- experimentálně stanovit základní palivové charakteristiky
- provést základní ověření možnosti peletování kávových odpadů
- provést základní spalovací zkoušky kávových pelet, včetně vyhodnocení a případně navrhnout úpravy spalovacího zařízení
- zpracovat obecnou studii potenciálu pro komerční využití kávového odpadu ke spalování

Seznam literatury:

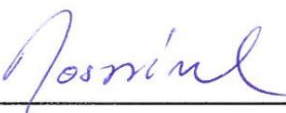
Černý, V.: Parní kotle, SNTL 1983

Dlouhý, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků, ČVUT v Praze, 2007, ISBN 978-80-01-03757-7

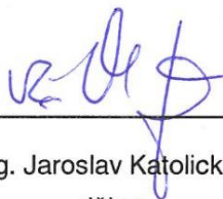
Internetové zdroje

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 1. 12. 2015



doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

ABSTRAKT

Cílem mé diplomové práce bylo vypracovat komplexní studii na téma energetického využití kávového odpadu zvaného kávová sedlina. V rámci studie byly provedeny kompletní palivové rozbor, TGA analýzy, experimentální sušení a peletování, spalovací zkoušky a základní ekonomické zhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kávové sedlina, káva, biomasa, palivový rozbor, sušení, peletování, spalovací zkouška

ABSTRACT

The aim of my thesis was to develop a comprehensive study on the energy use of the coffee waste called spent coffee grounds. The study conducted a complete fuel analysis, TGA analysis, experimental drying and pelletization, combustion tests and basic economic evaluation.

KEYWORDS

Spent coffee grounds, coffee, biomass, fuel analysis, drying, pelletizing, combustion test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SEDLÁČEK, D. *Analýza energetického využití kávových pelet*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Martin Lisý, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20. května 2016

.....

Daniel Sedláček

PODĚKOVÁNÍ

V prvé řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mě výrazně podporují po celou dobu studia a poskytují mi skvělé zázemí. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za jeho čas, ochotu a odborné rady při vypracování mé práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Otakaru Štelcovi za vstřícnost a pomoc při měření a získání potřebných informací. Také bych chtěl poděkovat za pomoc panu Ing. Ladislavu Šnajdárkovi, panu Ing. Miloši Matúšovi, PhD. a panu doc. Ing. Peteru Križanovi, PhD.

OBSAH

1	Úvod k problematice	10
2	Biomasa	12
2.1	Definice biomasy	12
2.2	Klasifikace biomasy	12
2.2.1	Klasifikace podle původu biomasy	12
2.3	Vznik biomasy	13
2.4	Získávání energie z biomasy	13
2.4.1	Suché procesy	13
2.4.2	Mokré procesy	14
2.4.3	Fyzikální a chemické přeměny biomasy	14
2.4.4	Chemické přeměny	14
3	Emise při energetickém využití biomasy	15
3.1	Sloučeniny síry	15
3.2	Oxid uhlíku	15
3.3	Sloučeniny dusíku	16
3.4	Kovy	16
3.5	Sloučeniny chlóru	16
3.5.1	PAH	16
3.5.2	Dioxiny (PCDD a PCDF)	16
3.6	Emise tuhých znečišťujících látek	17
3.7	Eliminace emisí	17
4	Vlastnosti paliva	19
4.1	Vlhkost	19
4.2	Výhřevnost	20
4.3	Obsah popela	21
4.3.1	Teplota měknutí popela	22
4.4	Elementární složení hořlaviny paliva	22
4.5	Objemová měrná hmotnost	23
5	Palivový rozbor	25
5.1	Měření vlhkosti	25
5.2	Měření výhřevnosti	26
5.3	Měření popeloviny	28
5.4	Měření charakteristických teplot popela	29
5.5	Prvkový rozbor	33
6	TGA	34

6.1	Chemické složení	34
6.2	Měření	34
6.3	Vyhodnocení	36
7	Sušení	38
7.1	Kinetika sušení	38
7.2	Způsoby sušení	39
7.2.1	Pasivní sušení	39
7.2.2	Aktivní sušení	39
7.3	Sušení kávy	40
8	Peletování	41
8.1	Fyzikálně-mechanické ukazatele	41
8.2	Parametry ovlivňující proces zhutňování	41
8.2.1	Vlastnosti vstupního materiálu	41
8.2.2	Parametry lisování a konstrukce lisu	42
8.3	Peletování kávy	42
9	Spalovací zkouška	45
9.1	Použité přístroje	46
9.2	Průběh měření	48
9.3	Vyhodnocení	54
10	Ekonomika	56
10.1	Pořizovací náklady	56
10.2	Peněžní tok	57
10.3	Zhodnocení	58
11	Závěr	61
	Zdroje	63
	Seznam obrázků	65
	Seznam tabulek	66
	Seznam použitých zkratk a symbolů	67

1 ÚVOD K PROBLEMATICE

Káva je jednou z nejvýznamnějších zemědělských plodin na světě a je v prvních pěti globálních nejobchodovatelnějších komoditách. Z tohoto důvodu je kávový průmysl producentem velkého množství odpadů. Podle International Coffee Organization (ICO) celková produkce kávy na světě odpovídá okolo 8 milionů tun kávy za rok. Během přípravy kávy za pomoci kávovaru nebo při výrobě instantní kávy dochází ke kontaktu namletých kávových zrn s horkou vodou či párou. Díky tomu se uvolní aromatické složky a další látky do nápoje. Z těchto operací zůstává pevný zbytek zvaný kávová sedlina – v angličtině spent coffee grounds (dále jen SCG). Tohoto odpadu je přibližně 6,5 milionů tun ročně. SCG nemá žádnou obchodní hodnotu a běžně bývá likvidován jako odpad popřípadě využíván v malé míře k dalším účelům. [1]

V posledních letech sílí ve společnosti tlak na ekologii a čím dál více se do popředí dostávají obnovitelné zdroje energie. Biomasa je čtvrtým největším zdrojem energie na světě. Na tvorbě primární energie se podílí přibližně 10 %. Jelikož se jedná o obnovitelný zdroj energie, zvýšením procentuálního zastoupení biopaliv na úkor fosilních paliv má příznivý vliv na klima a to především na produkci oxidu uhličitého. Jeden z hlavních problémů biomasy pěstované primárně pro energetické využití je to, že nám vytlačuje pěstování klasických plodin určených na zajištění potravy obyvatelstva. Mnohem výhodnější je tedy využívání odpadní biomasy – například piliny, sláma atd. – protože nekonkurují výrobě potravin. Do této kategorie spadá energetické zpracování kávové sedliny, kdy bychom se zbavili odpadu a zároveň získali biopalivo.

SCG je pevný organický zbytek s malou velikostí částic a s vysokou vlhkostí v rozmezí 40-60%. Obsah vlhkosti se odvíjí od technologického zpracování. Sedlina je bohatá na cukry polymerovaných do celulózových a hemicelulózových struktur, které odpovídají téměř polovině materiálu hmotnosti sušiny. Hemicelulóza je tvořena třemi cukry – manózou, galaktózou a arabinózou - zatímco celulóza je tvořena glukózou. Kromě polysacharidů SCG také obsahuje významný obsah proteinu, kyseliny glutamové, leucin, glycin, valin, fenylalanin a alanin. [1]

Vzhledem k přítomnosti různých organických materiálů je SCG vysoce znečišťující a vyžaduje velké množství kyslíku k degradaci. Kromě toho obsahuje kofein, třísloviny a polyfenoly. Z těchto důvodů by SCG nemělo být jen tak vyhozen do odpadu. V současné době je několik možností dalšího zpracování kávové sedliny: [2]

- **Krmivo** – pro přežvýkavce, prasata, slepice, králíky. Dlouhodobá konzumace kávové sedliny však zvířatům způsobuje problémy močového měchýře.
- **Kvašení** – za účelem produkce enzymů, organických kyselin, aromatických látek, hormonů, bioplynu a dalších produktů. Žádné z těchto řešení není však ve větší míře využíván. V poslední době byly provedeny rozsáhlé studie, které by tuhle situaci mohly zlepšit.
- **Kompostování** – za účelem získání organického hnojiva. Takto získané hnojivo je bohaté na dusík, fosfor a draslík a je mírně kyselé. Vhodné je na trávník a k likvidaci slimáků a hlemýžďů. Bohužel náklady spojené s úpravou hnojiva, aby splňovalo příslušné normy, jsou příliš vysoké.

- **Karbonizace** – kávová sedlina může být využívána k výrobě aktivního uhlí.
- **Energetické účely** – spalování, výroba bionafty a palivové pelety. Z kávové sedliny se dá získat zhruba 10 až 15% oleje, který se dá přepracovat na bionaftu. Další možností je výroba pelet a jejich následovné spalování.

BIOPALIVO

V posledním desetiletí proběhlo velké množství výzkumů zaměřených na spalování odpadní biomasy potažmo biomasy jako takové na domácích kotlích. Jednalo se například o slámy, dřevařský odpad, traviny, olivy, rajčata, kakaové boby atd. Při přizpůsobení kotle spalování dosahuje poměrně vysoké účinnosti. Problém, který však nastává, je vznikající popel s poměrně nízkým bodem tání. Z tohoto důvodu musí být věnována pozornost zanášení teplosměnných ploch. Velmi výhodným se potom stává míchání těchto odpadních biopaliv společně se dřevem.

Kávová sedlina spadá do kategorie odpadní biomasy. Jejím spalováním bychom se dokázali zbavit nežádoucího odpadu a zároveň získali obnovitelný zdroj energie. V následující práci bych se chtěl zaměřit na tuto problematiku. První dvě kapitoly bych věnoval biomase a vlastnostem paliva. Následovně bych se zabýval analýzou kávové sedliny z pohledu potencionálního paliva.



Obr. 1: Kávová sedlina na výstupu z kávovaru

2 BIOMASA

Snaha o větší využívání alternativních zdrojů energie a snížení závislosti na fosilních palivech je trend, který ve vyspělých státech probíhá již po delší dobu. S touto tematikou je spojeno i větší využívání biomasy a to nejen pro větší energetické celky, ale také pro domácnosti. Biomasa je chápána jako palivo, které je neutrální k produkci oxidu uhličitého. To je dáno tím, že rostliny při svém růstu spotřebují oxid uhličitý, který vznikne při jejím spalení.

2.1 DEFINICE BIOMASY

Definice biomasy existuje celá řada. Obecně se dá říct, že biomasa je veškerá organická hmota, která se účastní látkových přeměn. Z energetického hlediska je významná pouze energeticky využitelná biomasa.

Přesná definice biomasy je upravena legislativně a to zákonem č.180/2005 a řadou následujících vyhlášek. Na základě daného zákona a příslušných legislativ byl vytvořen tenhle seznam obsahující definice biomasy jako: [3]

- a) rostlinnou hmotu včetně zbytků rostlin, výrobky z ní, vedlejší a zbytkové produkty z jejího zpracování a z ní vyrobená paliva
- b) další tuhá, kapalná i plynná paliva vyrobená výlučně z rostlin nebo částí rostlin, s vyloučením rašeliny a rostlin uvedené ve vyhlášce 485/2005 Sb.
- c) zemědělské meziprodukty z živočišné výroby, vzniklé při chovu hospodářských zvířat
- d) plynná a kapalná biopaliva vyráběné termickým zplynováním, pyrolýzou nebo jinými fyzikálně chemickými procesy
- e) alkoholy vyráběné z biomasy, s vyloučením dřeva a všechny meziprodukty
- f) biopaliva vyrobená z biologicky rozložitelných odpadů
- g) papír, karton a lepenku, pokud nemohou být materiálově využity, tvarovaná paliva z nich vyrobená v podobě briket, pelet atd.
- h) palivové a použité dřevo a výrobky z něj (vyjimku tvoří dřevo ošetřené konzervačními a ochrannými prostředky)
- i) vytríděný biologicky rozložitelný komunální odpad a biomasa při výrobě bioplynu anaerobní digestí
- j) živočišnou hmotu
- k) biomasu v podobě nevytríděného biologicky rozložitelného odpadu přeměněna v procesech skládkování na bioplyn
- l) biomasu zpracovávanou v procesu čištění odpadních vod a přeměněnou samovolně na bioplyn, pokud není přidána jakákoliv další biomasa

2.2 KLASIFIKACE BIOMASY

Biomasu lze dělit do skupin podle různých kritérií. Mezi dvě nejzákladnější patří rozdělení podle původu biomasy a podle vlhkosti na suchou (dřevo, lesní odpad) a mokrou (kal, exkrementy hospodářských zvířat).

2.2.1 KLASIFIKACE PODLE PŮVODU BIOMASY

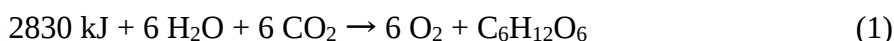
- **Dendromasa** – jedná se o palivové dřevo, zbytky dřevařského a těžařského průmyslu například při kácení lesů

- **Fytomasa** – jedná se o biomasu zemědělského a rostlinného původu například obiloviny, olejoviny, rychle rostoucí dřeviny a zbytky rostlin ze zemědělské výroby a údržby krajiny
- **Zbytková biomasa** – zahrnuje celou škálu druhů biomasy, která není primárně určena k energetickým účelům. Jedná se například o vedlejší produkty papírenského, potravinářského nebo živočišného průmyslu, biologicky rozložitelný odpad atd.

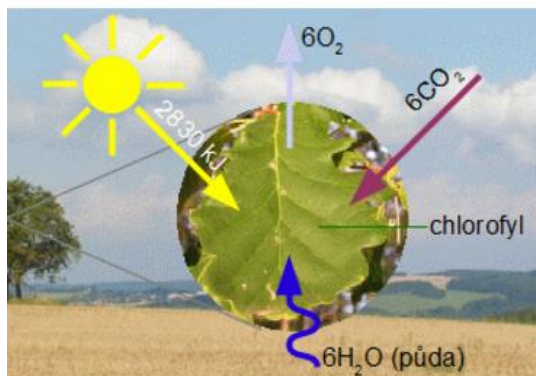
2.3 VZNIK BIOMASY

Základním stavebním kamenem rostlinné biomasy jsou organické látky. Z těchto látek se za pomoci fotosyntézy vytváří organická sloučenina glukóza (cukr), která je základním stavebním prvkem rostlinné biomasy a energetickým zdrojem živočichů. Proto všechny organické sloučeniny obsažené ve všech organismech byly vytvořeny ze sloučenin, které byly kdysi primárními produkty fotosyntézy. [4] [5]

Fotosyntéza je soubor chemických reakcí, při kterých se plynné produkty vzduchu (především CO_2) nejdříve rozloží a potom složí do potřebných organických sloučenin (glukózy) za pomoci sluneční energie a vody získané z půdy. Fotosyntéza probíhá za přítomnosti chlorofylu. Při této reakci se energie elektromagnetického záření ukládá do chemických vazeb vzniklých organických látek. Celý tento složitý proces lze zapsat poměrně jednoduchou rovnicí: [4] [5]



Fotosyntéza je tedy reakcí endotermickou (energii spotřebovává) jejímž výsledkem je glukóza ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$), která později slouží k tvorbě biomasy jako je například celulóza. Opakem fotosyntézy jsou typické oxidační reakce jako hoření, kdy nám vzniká oxid uhličitý, voda a uvolní se energie.



Obr. 2: Fotosyntéza [5]

2.4 ZÍSKÁVÁNÍ ENERGIE Z BIOMASY

Způsob získávání energie je podmínován fyzikálními a chemickými vlastnostmi biomasy – například vlhkostí. Množství vody a sušiny má vliv na zpracování biomasy, tedy i na způsob získávání energie. Hodnota 50% sušiny je přibližně hranice mezi suchými a mokřými procesy.

2.4.1 SUCHÉ PROCESY

Ze suché biomasy se působením vysokých teplot uvolňují hořlavé plynné složky, tzv. dřevoplyn. Jestliže je přítomen vzduch, dojde k hoření, tj. jde o prosté spalování. Pokud jde o zahřívání bez přístupu vzduchu, odvádí se vzniklý dřevoplyn do spalovacího prostoru, kde se spaluje obdobně jako jiná plynná paliva. Část vzniklého tepla je použita na zplyňování další biomasy. Výhodou je snadná regulace výkonu, nižší emise, vyšší účinnost. Zařízení se

zplyňováním biomasy se používají stále více. Na první pohled se neliší od běžných spalovacích zařízení. [3]

Biomasa je velmi složité palivo, protože podíl částí zplyňovaných při spalování je velmi vysoký (u dřeva je 70 %, u slámy 80 %). Vzniklé plyny mají různé spalovací teploty. Proto se také stává, že ve skutečnosti hoří jenom část paliva. Podmínkou dokonalého spalování je vysoká teplota, účinné směšování se vzduchem a dostatek prostoru pro to, aby všechny plyny dobře shořely a nestávalo se, že budou hořet až v komíně. [3]

Suché procesy se dále dělí na: [3]

SPALOVÁNÍ: Spalování je chemický proces rychlé oxidace, při kterém dochází k uvolnění a následné přeměně chemické energie vázané v palivu na energii tepelnou. Při spalováním hoří pevný uhlík případně vodík obsažený v palivu i unikající plynné látky z biomasy ve společném prostoru (topeniště). Vzduch je pokud možno přiváděn ve všech částech topeniště.

ZPLYŇOVÁNÍ: Při zplyňování (nedokonalé spalování) hoří pevný uhlík obsažený v palivu v jiné části spalovacího zařízení než unikající plynné produkty (ty není nutné ihned spalovat, ale mohou se odvádět a využívat mimo zplyňovací zařízení).

PYROLÝZA: Pyrolýza je termický rozklad látek bez přístupu kyslíku tedy v atmosféře, ve které nedochází ke spalování.

2.4.2 MOKRÉ PROCESY

Biochemické přeměny biomasy: [3]

- Alkoholové kvašení – je biochemický proces, při kterém jsou rostlinné sacharidy přeměňovány na alkohol za přítomnosti kvasinek. Kvasinky vlastní enzymy, kterými přeměňují rostlinné sacharidy na etanol a oxid uhličitý za vzniku tepla a energie.
- Metanové kvašení – je přeměna látky za účasti enzymů mikroorganismů, při níž probíhají v důsledku metabolické aktivity mikroorganismů chemické přeměny organických látek (obvykle sacharidů) a na látky energeticky chudší nebo se nové látky syntetizují.

2.4.3 FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ PŘEMĚNY BIOMASY

Jedná se o štípaní, drcení, lisování, briketování, peletování, mletí atd. Nejčastějším způsobem úpravy je úprava kusového dřeva. [3]

2.4.4 CHEMICKÉ PŘEMĚNY

Jedná se o esterifikaci surových bio olejů. Získávání odpadního tepla při zpracovávání biomasy, kompostování, anaerobní fermentace pevných organických odpadů, výroba etylalkoholu atd. [3]

3 EMISE PŘI ENERGETICKÉM VYUŽITÍ BIOMASY

Při energetickém využívání biomasy musíme brát ohled na její složení a správnou přípravou před spalováním – skladování, sušení. Tvorba škodlivin ze spalování pevných biopaliv je závislá na složení paliva, úpravě palin, velikosti a technologii spalování.

Biomasa je organická látka a stejně tak jako ostatní organické látky obsahuje většinový podíl uhlíku (C), vodíku (H₂) a kyslíku (O₂). Kromě těchto základních stavebních prvků se v ní vyskytuje i mnoho dalších prvků nezanedbatelně se podílejících na vzniku škodlivých látek pro životní prostředí při spalování. Mezi ty nejvýznamnější patří síra (S), chlór (Cl) a dusík (N₂). Jejich množství se odvíjí od daného typu biomasy a místa, kde byla pěstována. Se zvětšujícím se podílem těchto prvků v biomase roste také množství škodlivých látek vznikajících při spalování. Obsah těžkých kovů v biomase je považován za zanedbatelný. Poněkud významnější je obsah železa a lehkých kovů – nejvíce vápníku, hořčíku, draslíku, sodíku a zinku.

Škodliviny lze rozřadit do 3 základních skupin: [3],[6]

- **Škodliviny z neúplného spalování:** CO, C_xH_y, dehet, saze, nespálené uhlovodíkové částice, vodík a neúplně okysličené sloučeniny dusíku (HCN, NH₃, N₂O).
- **Škodliviny z úplného spalování:** oxidy dusíku (NO, NO₂), CO₂.
- **Škodliviny ze stopových prvků nečistot biopaliv:** částice prachu (nespalitelné), síra, sloučeniny chloru a stopové množství kovů (Cu, Pb, Zn, Cd).

Nejpřísněji sledované polutanty jsou karcinogenní látky, látky jedovaté (CO) a plyny podporující skleníkový efekt (CO₂, N₂O, CFC (freony), CH₄ a stopové plyny HFC, PFC, SF₆).

3.1 SLOUČENINY SÍRY

Biomasa ve většině případů obsahuje pouze stopové množství síry, které je zanedbatelné. Toto je jedna z předních výhod oproti fosilním palivům. Síra v palivu způsobuje řadu problémů. Kromě toho, že způsobuje nízkoteplotní korozi zařízení, má také nepříznivý vliv na životní prostředí. Dá se tedy říci, že emise SO₂ při spalování biomasy prakticky nevznikají. Navíc je v palivu množství vodní páry a vodíku, takže síra se spíše přeměňuje na H₂S. [3], [6]

3.2 OXID UHLÍKU

Produkce oxidů uhlíku závisí na obsahu uhlíku v palivu a na dokonalosti technologie spalování. S tím souvisí i typický jev doprovázející spalování biomasy, a sice že hoří relativně dlouhým plamenem, který nesmí být ochlazen nikde před dohořením, protože je tvořený oxidujícím CO. Při ochlazení dochází k vylučování čistého uhlíku (saze) a tím dochází k velkým tepelným ztrátám. Důležité je tedy, aby docházelo k dokonalému spalování z pohledu ztrát (ztráta chemickým nedopalem) a zároveň produkce jedovatého CO. Proto spalovací a dohořivací komory pro biomasu musí být mnohem větší než pro uhlí a do plamenů musí být přiváděno dostatečné množství sekundárního či terciálního vzduchu. [3], [6]

Oxid uhličitý se největší měrou podílí na vzniku skleníkového efektu, který má vliv na globální oteplování. Na klimatické konferenci v Paříži 2015 se všechny světové velmoci zavázaly, že se pokusí snížit množství vypouštění CO₂ do ovzduší. Z tohoto pohledu je biomasa chápána jako palivo neutrální na produkci CO₂, protože množství oxidu uhličitého vzniklé během spalování je úměrné množství, které rostlina spotřebovala během jejího růstu. [3], [6]

3.3 SLOUČENINY DUSÍKU

Biomasa obsahuje přibližně 0,5% - 3,0% palivového dusíku. Sloučeniny NO_x vznikají při vyšších teplotách 700-800°C. Jednou z možností přeměny palivového dusíku je vznik oxidu dusného N₂O. Tento plyn se podílí na globálním oteplování a to přibližně 6%. Při spalování biomasy vzniká však jen zlomek ze světové produkce oxidu dusného. I včetně lesních požárů se odhadují 2%. [3], [6]

Další možností přeměny palivového dusíku je vznik oxidu dusnatého (NO) – vzniká při teplotách nad 1000°C, je nestálý a oxiduje na NO₂ – a oxidu dusičitého (NO₂) – podílí se na vzniku fotochemického smogu (přízemní smog), případně se přeměňuje na dusičnany, které způsobují kyselé deště a okyselují půdu. Domácí kotle malých výkonů však většinou nedosahují takových teplot, při kterých by se tvořily tyto sloučeniny. [6]

3.4 Kovy

Patří sem především kovy alkalických zemin a to draslík a sodík, které při kombinaci se sírou a chlórem způsobují korozi. Vznikají tak alkalické chloridy usazující se na površích výměníků a dalších místech kotle. Ty následovně reagují se spaliny za vzniků síranů a uvolnění chlóru. To nám výrazně urychluje korozi. [6]

3.5 SLOUČENINY CHLÓRU

Problematika sloučenin chlóru při spalování biomasy je podstatná z hlediska dopadu na spalovací zařízení. Může nám vznikat kyselina chlorovodíková HCl, která na přehřívacích kotlích působí vysokoteplotní korozi (nad 550 °C). Další, podstatnější, skupinou vznikajících při spalování chlóru persistentní organické polutanty označované jako POP. Zůstávají v přírodě ve stabilní formě, a proto se nejsou schopny chemicky či biologicky odbourat ani za desítky let. [6]

Mezi persistentní organické polutanty patří mimo jiné také polychlorované aromatické uhlovodíky – PAH, polychlorované dibenzodioxiny (PCDD) a dibenzofurany (PCDF). PCDD a PCDF se souhrnně nazývají dioxiny. [6]

3.5.1 PAH

Jsou to sloučeniny tvořeny dvěma a více kondenzovanými jádry v nejrůznějším uspořádání, které modu být mnoha způsoby substituovány. Nejhorší vlastností PAH je jejich karcinogenní a mutagenní schopnosti a také to, že v přírodě přetrvávají bez degradace. To z nich dělá velmi nebezpečné látky. [6]

3.5.2 DIOXINY (PCDD A PCDF)

Dioxiny jsou souhrnný název pro skupinu v současnosti známých chemických sloučenin 75 polychlorovaných dibenzo – p – dioxinů (PCDD) a 135 polychlorovaných dibenzofuranů (PCDF), celkem 210 kongenerů. Strukturně jsou si podobné, liší se zejména v počtu a umístění atomů chlóru v molekule. Tyto sloučeniny se ve stopových koncentracích vyskytují v atmosféře, 17 z nich bylo prokázáno jako extrémně toxické, mutagenní, teratogenní a poškozující lidský imunitní systém. Mají tendenci vázat se do organické hmoty a k akumulaci v tukových tkáních organismů. V lidském těle se kumulují v tukových tkáních a tělo je není schopno vyloučit či odbourat. [6]

PCDD/F jsou do 900 °C tepelně stabilní a vznikají snadno při zahřívání chlorovaných látek na teploty kolem 300 °C. Hlavní cestou ke vzniku dioxinů je syntéza de-novo – což je heterogenní katalytická reakce mezi kyslíkem, uhlíkem a chlorem při teplotách 300÷325 °C (někdy i v rozsahu 250÷450 °C). [6]

Do životního prostředí se PCDD/F dostávají dvěma hlavními cestami. Jako vedlejší produkty chemických výrob a ze spalovacích procesů. Přesných mechanismus vzniku dioxinů není přesně znám. Známe však 4 hlavní způsoby: [6]

1. **Tvorba dioxinů vycházející z prekurzorů** – látek, ze kterých dioxiny mohou vznikat chemickými přeměnami
2. **Syntéza** – jedná se o heterogenní katalytickou reakci mezi uhlíkem, kyslíkem a chlorem v teplotním okénku v intervalu cca 300 – 325°C za spalovací zónou
3. **Homogenní reakce** – v plynné fázi. Tímto způsobem vznikají PCDD/F relativně nejméně, obvyklý příspěvek k celkovému množství je asi 10%
4. **Přítomnost v palivu** – za předpokladu, že vlivem spalovacích podmínek nedojde k jejich degradaci, jsou ve své původní podobě emitovány do ovzduší

3.6 EMISE TUHÝCH ZNEČIŠŤUJÍCÍCH LÁTEK

Primární opatření pro snižování koncentrace tuhých částic ve spalinách je zajištění dostatečné doby setrvání ve spalující komoře a při dostatečné teplotě. Další možností je použití odlučovačů. Tuhé emise patří mezi velmi škodlivé látky. [6]

I při krátkodobém vystavení těmto částicím může dojít k podráždění oka, jícnu, průdušek a neurofyzilogickým symptomům. Navenek se toto podráždění projevuje jako nucení ke zvracení a nastávají dýchací potíže. Jednotlivé částice se v ovzduší nacházejí v různých velikostech. Pro lidský organizmus jsou nejnebezpečnější malé částice, protože velké částice se odstraní polykáním nebo se zachytí v horních cestách dýchacích. Částice o velikosti menší jak 0,1 μm se mohou dostat až do krve a to v případě, kdy nedojde k jejich odstranění při čištění plicních sklípků. Pevné částice jsou menší než 1 μm a více než 90 % není větších jak 0,1 μm . Výjimečně se vyskytují i částice o velikosti menší než 50 nm. Díky velkému povrchu pevných částic jsou schopny absorbovat různorodé směsi, které mohou být toxické, mutagenní a karcinogenní. [6]

3.7 ELIMINACE EMISÍ

Praxí bylo zjištěno, že pro různé druhy biomasy se hodí různé technologie spalování. Například vhodná technologií pro spalování méně kvalitní biomasy je spalování ve fluidním loži, pro kusové dřevo spalování na roštu chlazeného vzduchem (nízké NO_x) s mechanickým pohazovačem a pro slámu pak spalování na vibračním, vodou chlazeném roštu (z důvodu koroze a přékání). [6]

Pro snižování emisí NO_x se využívá celá řada primárních a sekundárních opatření jako třeba nízký přebytek vzduchu (také zvýšení účinnosti, ale vyšší podíl nespáleného popílků), postupné spalování, přivádění přehřátého vzduchu, recirkulace spalin a selektivní nekatalytická a katalytická redukce (negativum strháváním čpavku – maximální hodnota 5 mg/m^3). Je-li nutné odstranění SO_2 z emisí, používá se injektáž suchého hydroxidu vápenatého před tkaninový filtr nebo elektrostatický odlučovač. Účinná je i injektáž vápence do topeniště spolu s použitím pračky s oxidem vápenatým. Toto opatření také odstraňuje další škodlivé emise jako je HCl , avšak zvyšuje emise NO_x o 10÷25 mg/m^3 . [6]

Pro minimalizaci neúplně spálených látek, jako je oxid uhelnatý, uhlovodíky, dehet, saze a nespálené částice je nutno zajistit dokonalé spálení dobrým návrhem topeniště, monitorováním a regulací procesu spalování a údržbou spalovacího systému. Vedle podmínek spalování (vysokými teplotami, dostatkem kyslíku, dobrým promísáním plynu se spalovacím vzduchem), udržuje nízké hladiny CO řádově v mezích $50\div 250\text{ mg/m}^3$ také správně optimalizovaný systém ke snižování emisí NO_x , kdy emise z fluidních kotlů jsou obvykle v nižší hladině rozmezí, zatímco emise při spalování práškových paliv a při spalování na roštu jsou poněkud vyšší. Důležité je taky vhodné přivedení vzduchů. [6]

K teplotní destrukci dioxinů je nutná teplota $1200\text{ }^\circ\text{C}$. Dioxiny mohou vznikat i následnou samovolnou syntézou ze spalin a to v komíně, nebo dokonce až za ním. Vznik dalších organických látek ve spalinách, zejména polyaromatických uhlovodíků a sazí lze omezit volbou vhodného spalovacího režimu. Pro odstraňování těžkých kovů ze spalin při spalování biomasy se využívají tkaninové filtry (menší investiční náklady) a elektrostatické odlučovače (nižší provozní náklady). [6]

4 VLASTNOSTI PALIVA

Využití biomasy jako paliva je určeno fyzikálními a chemickými vlastnostmi použité biomasy. Na těchto vlastnostech, které jsou často označovány jako vlastnosti teplotnické, závisí konstrukce spalovacích zařízení a zařízení s nimi souvisejícími. Mezi základní palivové rysy biomasy patří proměnný a často vysoký obsah vody, vysoké množství prchavé hořlaviny a poměrně nízké teploty měknutí popeloviny.

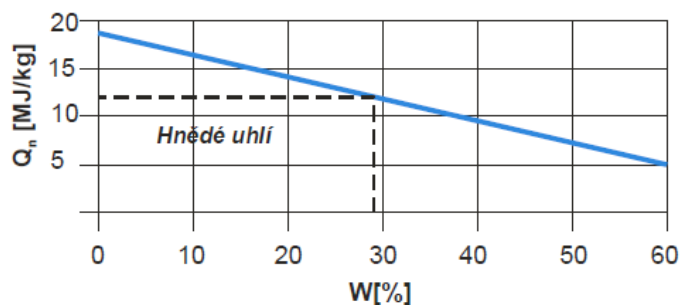
4.1 VLHKOST

Velmi důležitou vlastností dřeva je vlhkost. Typickou jevem pro biomasu je poměrně velký obsah vody. Voda v biomase jednak snižuje poměr využitelného tepla a hmotnosti biomasy (spalné teplo), jednak při jejím odpaření se spotřebuje část tepla (projeví se snížením výhřevnosti). To vede ke snížení účinnosti spalovacího zařízení a růstu komínové ztráty. Je proto výhodné používat ke spalování co nejsušší biomasu, nejlépe prochlou přirozeným způsobem na vzduchu, např. skladováním přímo na zemědělské ploše. Umělé sušení je většinou ekonomicky nevýhodné avšak občas nezbytné. Provádí se v sušárnách na vhodnou vlhkost pro spalování nebo technologické zpracování – peletování, briketování atd. [3]

Vlhkost biomasy se odvíjí od jejího typu a způsobu skladování (viz. Tab. 1). Například u palivového dřeva se vlhkost obvykle pohybuje v rozmezí 30 – 50 %. Může ale dosahovat až 60% hranice a to třeba ve dřevě ihned po pokácení.

Plodina	Vlhkost [%]
Sláma obilovin	15
Sláma řepka	17-18
Energetická fytomasa – orná půda	18
Rychle rostoucí dřeviny – zem. půda	25-30
Energetické seno - zem. půda	15
Energetické seno - horské louky	15
Energetické seno - ostatní půda	15
Rychle rostoucí dřeviny – antropogenní půda	25-30
Jednoleté rostliny – antropogenní půda	18
Energetické rostliny – antropogenní půda	18

Tab. 1: Charakteristická vlhkost druhů biomasy [3]



Obr. 3: Graf závislosti výhřevnosti biomasy na obsahu vody [3]

Když se bavíme o vlhkosti, musíme vědět, zda se jedná o vlhkost z hlediska energetického průmyslu či o dřevozpracujícímu průmyslu. Na tuhle skutečnost je třeba brát zřetel, aby nedošlo k omylům. [3]

V dřevozpracujícím průmyslu se obsah vody v dřevní hmotě vyjadřuje podle vztahu: [3]

$$w_{dř} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 = \frac{\Delta w}{m_2} \cdot 100 = [\%] \quad (2)$$

V energetice se vyjadřuje obsah vody vztahem: [3]

$$w_{en} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 = \frac{\Delta w}{m_1} \cdot 100 = [\%] \quad (3)$$

Kde: m_1 hmotnost před sušením [kg], m_2 je hmotnost po sušení [kg]

Energetická vlhkost [%]	Dřevařská vlhkost [%]
0	0
10	11
20	25
30	43
40	67
50	100
60	150
70	230
80	400

Tab. 2: Přepočtení energetické a dřevařské vlhkosti [3]

4.2 VÝHŘEVNOST

Výhřevnost je definována jako množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a následovné vychlazení spalin na teplotu 20°C, přičemž vodní pára ve spalínách nekondenzuje. Obvykle se udává v MJ.kg⁻¹. Jedná se o jednu ze základních a určujících vlastností paliv obecně. S výhřevností úzce souvisí spalné teplo, které je definováno jako množství tepla uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva a následovné vychlazení spalin na 20°C, přičemž vodní pára ve spalínách zkondenzuje. Pokud se nejedná o ideální případ, spalné teplo je tedy vždy větší než výhřevnost. [3]

Výhřevnost se spočítá ze spalného tepla. Vychází se z následujícího vztahu:

$$Q_i^r = Q_s^r - 2,453 \cdot (w + 8,94 \cdot H_2) \quad (4)$$

Kde: Q_i^r – výhřevnost [MJ/kg]; Q_s^r – spalné teplo [MJ/kg]; w – vlhkost paliva [$\text{kg}_{\text{vody}}/\text{kg}_{\text{paliva}}$]; H_2 – obsah vodíku v palivu [$\text{kg}_{\text{vodíku}}/\text{kg}_{\text{paliva}}$]; 8,94 – koeficient přepočtu vodíku na vodu [$\text{kg}_{\text{vody}}/\text{kg}_{\text{vodíku}}$]; 2,453 – výparné teplo vody [MJ/kg_{vody}]

Různé druhy biomasy mají pro daný obsah vody prakticky shodnou výhřevnost. Odvíjí se to od chemického složení hořlaviny, která je pro různé dřeviny skoro shodná. Hodnota výhřevnosti závisí především na podílu ligninu s (výhřevností okolo 25 MJ/kg), celulózy

(19 MJ/kg) a pryskyřic. Tyto tři látky tvoří hlavní spalitelné složky v dendromase. Výhřevnost pryskyřic je oproti dřevu asi dvojnásobná a má za následek vyšší výhřevnosti kůry nebo jehličí. Výhřevnost je velmi svázána s obsahem vody (viz. Tab. 3). [3]

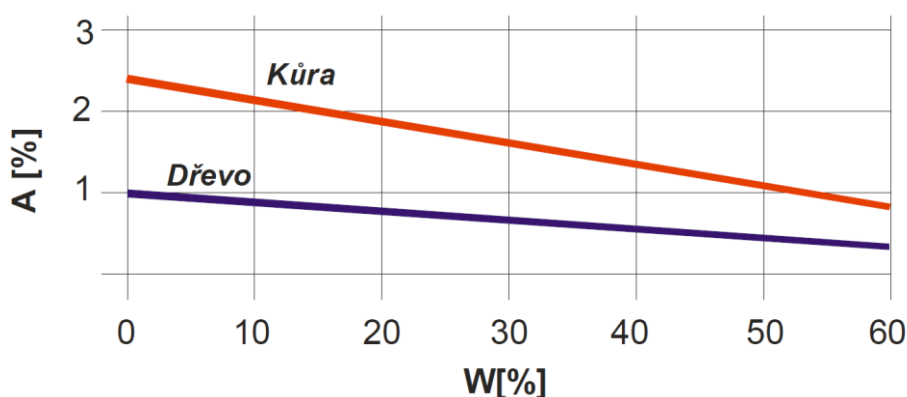
Druh	Výhřevnost [MJ/kg]	Vlhkost [%hm]
Dřevo-kusové	15,30	14,40
Dřevo-brikety	17,54	7,42
Dřevo-pelety	17,54	7,42
Dřevo-štěpka	9,84	41,74
Dřevěná kůra	15,92	4,82
Papír	11,98	4,61
Sláma obilná	15,46	10,00
Sláma řepková	15,90	5,56
Sláma pšeničná	14,58	13,01
Řepkové šroty granulované	16,70	9,21
Slunečnicové slupky	24,05	5,22
Městské odpadky	8,14	33,00

Tab. 3: Výhřevnost biomasy při dané vlhkosti [3]

4.3 OBSAH POPELA

Každé palivo je složeno ze tří základních složek – voda, popel (tzv. nespalitelný podíl) a hořlavina (tzv. spalitelný podíl). Obsah popela v biomase je velmi nízký oproti ostatním druhům paliv. Obsah popela v kůře (okolo 3%) je vyšší než u dřeva (okolo 1%). Jedná se o minerály pocházející z půdy. Nižší obsah popela snižuje emise pevných částic popílku. Biomasa patří mezi paliva nejvíce náchylná k tvorbě nepřijemného nálepu na vnitřním zařízení kotle, což sebou přináší řadu provozních problémů. [3]

Popel z biomasy obsahuje pouze stopové množství těžkých kovů, čím se z nich stává vhodné hnojivo použitelné pro zemědělskou půdu nebo jako zdroj minerálů užitečných v lesních porostech. Složení látek obsažených v popelu kolísá dle různých faktorů a druhu rostlin. Obsah popela určuje rozhodujícím způsobem druh separace popela, jeho dopravu a využití. [3]



Obr. 4: Graf závislosti obsahu popela ve dřevě a kůře na vlhkosti paliva [3]

Chemické analýzy popela ukazují, že biomasa a to především slámy obsahuje velké množství alkalických kovů (hlavně Na_2O , CaO , MgO , K_2O a P_2O_5) v porovnání s uhlím. [3]

Typ biomasy	Obsah popela v sušině [%]
Buk (s kůrou)	0,5
Cukrová třtina	4
Ječná sláma	4,8
Jedle (s kůrou)	0,6
Konopná sláma	4,8
Kukuřičná sláma	6,7
Kůra jehličnatá	3,8
Ozdobnice	3,9
Pšenice - zrno	2,7
Pšeničná sláma	5,7
Řepka - zrno	4,6
Řepková sláma	6,2
Slunečnice	12,2
Topol	1,8
Triticale	5,9
Triticale - zrno	2,1
Vrba	2
Žitná sláma	4,8
Žito - zrno	2

Tab. 4: Obsah popela u vybraných typů biomasy [3]

4.3.1 TEPLOTA MĚKNUTÍ POPELA

Teploty měknutí popela jsou pro biomasu velmi důležité. Biomasa patří mezi paliva nejvíce náchylná ke tvorbě nepříjemného nálepu ve vnitřních prostorech kotle. To má za následek snížení účinnosti kotle, opotřebení, poruchy a zvyšování emisí. Proto je žádoucí znát kromě složení popela také jeho charakteristické teploty, při kterých dochází ke změnám struktury. Jedná se o teploty deformace, měknutí, tání a tečení. Problematikou teplot měknutí popela se budu dále podrobněji zabývat v kapitole 5.3.

4.4 ELEMENTÁRNÍ SLOŽENÍ HOŘLAVINY PALIVA

Základními prvky hořlaviny jsou uhlík, vodík, síra, kyslík a dusík. Jejich procentuální zastoupení v palivu určuje složení hořlaviny. Biomasa obsahuje poměrně hodně prchavého podílu, který se při spalování uvolňuje.

Chemické složení hořlaviny a podíl prchavé hořlaviny různých druhů biomasy je uvedeno v následující tabulce, kde jsou dále pro porovnání uvedeny parametry fosilních paliv. Velkou předností dřevní hmoty je to, že neobsahuje téměř žádnou síru, a tak během spalování nevzniká škodlivý plynný exhalát SO_2 . [3]

Palivo	Výhřevnost sušiny [MJ/kg]		Podíl prchavé hořlaviny [%]	Elementární složení				
				C [%]	H [%]	O [%]	N [%]	S [%]
obilní sláma	od	15	70	43,9	5,4	38	0,3	0,05
	do	17,5	82	48	6,4	43,3	0,7	0,2
obiloviny	-	15,5	76	45	6	39,5	1	0,09
sláma+zrno	-	18,5	79	46,6	6,9	42,6	1,8	0,2
miscantus	-	15	74	45	5,5	36	0,5	0,05
sloní tráva	-	17,6	79	49	6,4	41,3	1,7	0,3
seno	od	13,5	70	45	6	38,8	0,8	0,08
	do	17,7	75	48,6	6,6	44,3	1,1	1,12
dřevo	od	16,9	70	45	5,3	41,4	0,1	0,02
	do	21	85	52	6,5	46	1,7	0,3
řepková olej	-	35	100	77	12	11	0,1	0
hnědé uhlí	od	14	20	27,5	2,5	12	0,3	0,5
	do	23	55	64	5,8	33	1,5	6
černé uhlí	od	27	10	65	2,8	5	0,9	0,5
	do	32,5	40	84	5	9,1	2	1,5
koks	od	30	4	65	1	1	0,1	0,1
	do	33,5	13	90	2	2	0,5	0,5

Tab. 5: Orientační vlastnosti a složení hořlaviny vybraných druhů paliva [3]

4.5 OBJEMOVÁ MĚRNÁ HMOTNOST

V závislosti na typu a formě biomasy může být značný rozdíl v hmotnosti materiálu v jednotce objemu. Tohle je velmi důležitý parametr jak z hlediska dopravy a skladování, tak má vliv i na samotné spalování. Jde o poměr mezi hmotností a prostorem, které palivo zaujímá a uvádí se v jednotkách $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Měrná objemová hmotnost se pohybuje od cca $40 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ sypaného nejlehčího paliva až do cca $1,6 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$ absolutní hmotnosti u nejvíce slisovaných briket a pelet. V sypaném, nerovnaném stavu, ovšem i brikety a pelety vzhledem k mezerovitosti dosahují objemové hmotnosti kolem $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Při objemových bilančních a projekčních výpočtech spotřeby paliva se v praxi dřevozpracujícího průmyslu používají tyto objemové jednotky uvedené v následující tabulce. [3]

Jednotka	Název	Význam
plm	plnometr = m^3	krychle o hraně 1 m vyplněná dřevem bez mezer, tedy 1 m^3 skutečné dřevní hmoty („bez dř“)
prm	prostorový metr = m^3 p. o. (tedy prostorového objemu)	s mezerami, čili 1 m^3 složeného dřeva štípaného nebo neštípaného („s dírami“), např. dřevo v lese složené do „metrů“
prms	prostorový metr sypaný	1 m^3 volně loženého sypaného (nezhutňovaného) drobného nebo drceného dřeva

Tab. 6: Objemové jednotky [3]

Jednotky	plm	prm	prms
plm	1	1,43 - 1,54	2,43 - 2,86
prm	0,65 - 0,7	1	1,61 - 1,86
prms	0,35 - 0,41	0,54 - 0,62	1

Tab. 7: Přepočet objemových jednotek [3]

5 PALIVOVÝ ROZBOR

V následující kapitole se budu věnovat experimentálnímu zjišťování vlastností paliva za pomoci zařízení v prostorách laboratoří na VUT FSI. Pro získání kávové sedliny bylo osloveno 19 kaváren. Nakonec byly vybrány 3 provozovny, které svou lokací a produkcí kávového odpadu nejvíce vyhovovaly. Sesbíraná kávová sedlina byla následně sušena a skladována.

5.1 MĚŘENÍ VLHKOSTI

Jak již bylo řečeno v předchozí kapitole, obsah vlhkosti v palivu má velmi velký vliv na účinnost spalovacího procesu. Je proto výhodné používat ke spalování co nejsušší biomasu.

K měření vlhkosti jsem použil halogenové sušicí váhy KERN při odpovídající normě ČSN 44 1377. Přístroj KERN MLS používá metodu termogravimetrie, kdy je vzorek vložen na váhy a následovně vystaven tepelnému namáhání. Při této metodě se vzorek váží před zahřátím a po něm, aby se z rozdílu stanovila vlhkost materiálu.

Dá se říci, že přístroj pracuje na bázi poměrně jednoduchého vzorce:

$$W = \frac{\Delta m}{m} \cdot 100 \quad (5)$$

kde: Δm – úbytek hmotnosti při sušení navážky paliva [kg], m – hmotnost navážky vzorku paliva [kg]

Obvykle se při sušárnách používá stejný princip, až na několikanásobně delší dobu měření. U přístroje KERN proniká záření dovnitř vzorku, kde se transformuje v tepelnou energii a k ohřevu materiálu dochází zevnitř ven, zatímco u klasické sušárny je vzorek ohříván proudem horkého vzduchu zvenku dovnitř. Přístroj zahřívá vzorek na maximální teplotu do 170°C a tak by zde neměly probíhat žádné degradující procesy.

Průměrná vlhkost kávy ze tří kaváren byla 54% pro první zdroj, 56% pro druhý zdroj a 46% pro třetí zdroj. Sběr a skladování kávové sedliny ve všech třech místech probíhalo stejně a to po dobu 2-3 dnů.

Rozdílnou vlhkost vzorků si lze vysvětlit rozdílnou konstrukcí kávovarů. U třetího zdroje je konstrukce kávovaru taková, že zásobník je dostatečně velký a je umístěn blízko nahřívací spirály. Díky této vlastnosti dochází k lepšímu vysoušení kávové sedliny. Průměrná vlhkost kávového odpadu je okolo 52%. Jedná se o poměrně vlhkou biomasu, která pro spalování nebo následné technologické zpracování musí být dále vysušena.



Obr. 5: Přístroj KERN MLS

5.2 MĚŘENÍ VÝHŘEVNOSTI

Měření výhřevnosti jsem provedl na kalorimetru IKA C 200 při odpovídajícím normách EN 61 010, EN 50 082, EN 55 014, EN 60555. Kalorimetr C 200 je určen k provádění stanovení hodnoty spalného tepla tuhých a kapalných látek. Spalování probíhá v kalorimetru za přesně daných specifických podmínek. Rozkladná nádoba se naplní odváženým množstvím vzorku paliva, palivo se zapálí a měří se zvýšení teploty v kalorimetrickém systému.

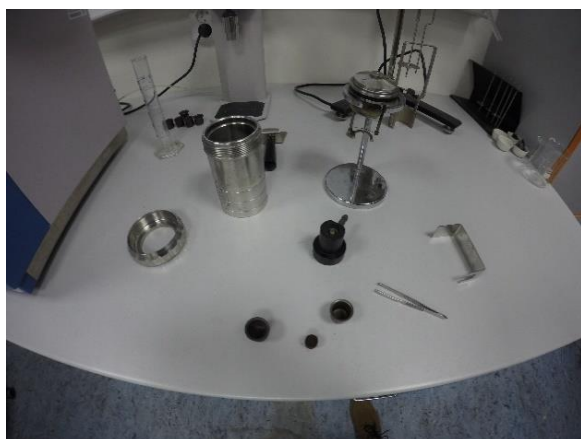


Obr. 6: Kalorimetr IKA C 200

POSTUP MĚŘENÍ

Měření výhřevnosti (spolu s měřením vlhkosti) bylo prováděno nejčteněji, a proto napíši jeho přesný postup:

1. Do nerezového kelímku na laboratorních vahách jsem odvážil cca. 1 gram paliva s přesností na 1mg. Jelikož se jedná o poměrně jemný materiál, hrozilo rozprsknutí vzorku během měření. Proto jsem za pomoci lisu vytvořit malou peletku, kterou jsem umístil do nerezového kelímku
2. Nerezový kelímek jsem vsadil do držáku rozkladné nádoby.
3. Pomocí pinzety jsem uvázal bavlněné vlákno na žhavicí drát a upravil ho tak tak, aby viselo do kelímku a dotýkalo se vzorku. Tím se zajistí zapálení vzorku.
4. Do rozkladné nádoby jsem nalil 20ml vody o teplotě 20°C a následovně jsem sestavil celou aparaturu.
5. Pomocí plnicí kyslíkové stanice C 248 jsem naplnil rozkladnou nádobu kyslíkem na tlak 30bar.
6. Na rozkladnou nádobu jsem nasadil zapalovací adaptér a umístil ji do měřicího přístroje.
7. Nakonec jsem nastavil přístroj a provedl měření.



Obr. 7: Pracovní plocha při měření



Obr. 8: Vylisovaný vzorek paliva



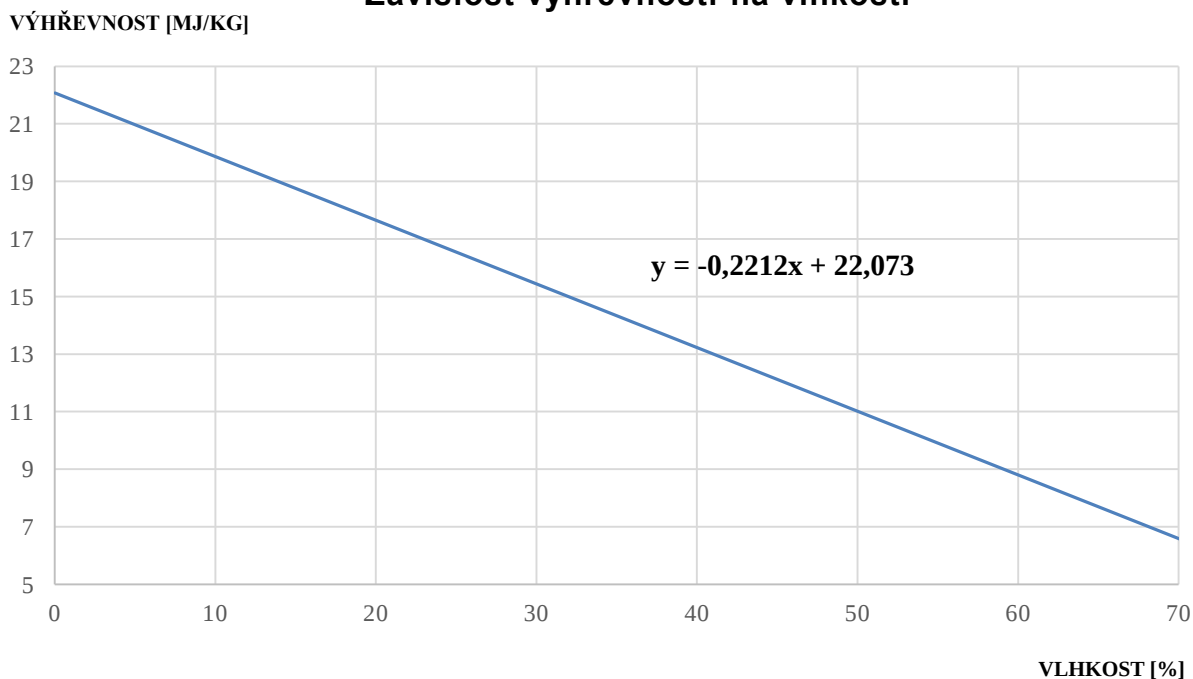
Obr. 9: Bavlněné zápalné vlákno visící do nerezového kelímku



Obr. 10: Sestavená armatura

Měření jsem provedl vícekrát pro různé hodnoty vlhkosti, aby měření bylo co nejprůkaznější. Naměřené hodnoty spalného tepla jsme přepočítali podle rovnice (4) na výhřevnost. Z vypočtených výhřevností jsme sestavili následující graf 3. Výhřevnost sušiny byla stanovena na 22,073 MJ/kg což je na biomasu velmi příznivá hodnota. Pro porovnání například u dřeva se výhřevnost sušiny pohybuje okolo 19 - 21 MJ/kg v závislosti o jaký druh dřeva se jedná. Potenciál kávové sedliny z hlediska výhřevnosti je tedy velmi příznivý.

Závislost výhřevnosti na vlhkosti



Obr. 11: Graf výhřevnosti kávové sedliny

5.3 MĚŘENÍ POPELOVINY

S měřením množství popeloviny nám úzce souvisí pojem popelnatost, který nám udává, procentuální množství popela z původního paliva. Popel vzniká z minerálních složek obsažených ve spalovaném palivu. Při spalování paliva se popeloviny teplem rozkládají v oxidační atmosféře a těkavé podíly přecházejí do spalin.

POSTUP MĚŘENÍ:

V první fázi došlo ke zvážení vzorku sušiny paliva na digitální váze EXPLORE PRO EP. Poté byly jednotlivé vzorky umístěny do spalovací pece VEB ELEKTRO o výkonu 2.8kW. Dle normy ISO 1171 byla vždy nastavena teplota spalování paliva 550°C po dobu dvou hodin. Následovně byly vzorky z pece vyjmuty a došlo ke zvážení popela. Na základě jednoduché úvahy byla poté vypočteno množství popeloviny (viz. následující tabulka):



Obr. 12: Spalovací pece VEB ELEKTRO

Číslo vzorku	Množství kávové sedliny [g]	Množství popela [g]	Popelovina [%]
1	2,5709	0,0381	1,4810
2	2,6425	0,0383	1,4494
3	2,3504	0,0355	1,5104
4	4,4273	0,0644	1,4546
5	3,178	0,0455	1,4317
6	4,767	0,0707	1,4831
Průměr			1,4685

Tab. 7: Popelovina kávové sedliny

Popelovina byla stanovena přibližně na 1,47%. V porovnání se dřevem je to o půl procenta více. Naopak při porovnání například se slámou, která má popelovinu okolo 5%, má kávová sedlina výrazně méně. Hodnotu popeloviny 1,47% tedy lze hodnotit jako příznivou.



Obr. 13: digitální váhy EXPLORE
PRO EP 114C



Obr. 14: Pohled do spalovací
pece VEB ELEKTRO

5.4 MĚŘENÍ CHARAKTERISTICKÝCH TEPLOT POPELA

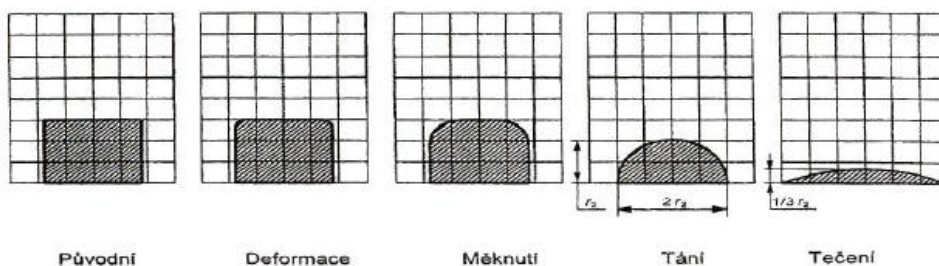
K stanovení vlastností paliv slouží celá škála normovaných měřících metod a postupů. Mezi tyto metody patří určení charakteristických teplot popela:

Teplota deformace: teplota, při které nastávají první příznaky zaoblení hrotu nebo okrajů zkušebního tělíska v důsledku tání.

Teplota měknutí: teplota, při které v případě zkušebních tělísek ve tvaru válce, jsou okraje zkušebního tělíska zcela zaobleny bez změny výšky.

Teplota tání: teplota, při které zkušební tělísko vytváří přibližně polokouli, tj. kdy výška se rovná přibližně polovině průměru základny.

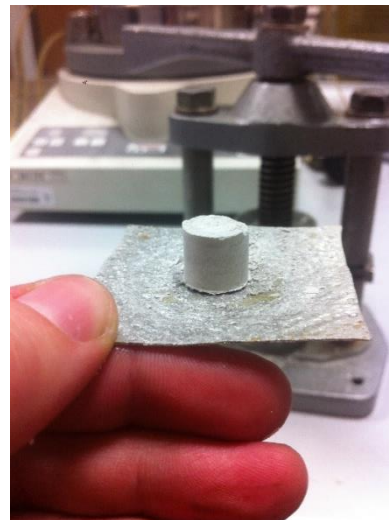
Teplota tečení: teplota, při které se popel rozteče na podložce ve vrstvě, jehož výška je třetina výšky zkušebního tělíska při teplotě tání.



Obr. 15: Schematické znázornění tavení pokusného válečku popele dle normy

POSTUP MĚŘENÍ:

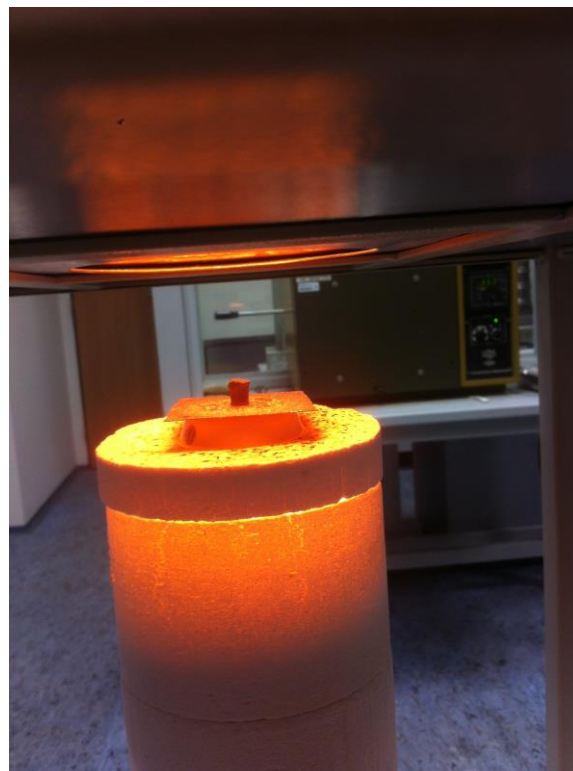
Při měření a sestavování postupu jsem vycházel z normy ISO 1171. V první řadě jsem si připravil dostatečné množství popela na vylisování zkušební tělíska ve tvaru válce. Na vylisování válce o průměru a délce 10 mm bylo zapotřebí přibližně 100 g paliva. Kávovou sedlinu jsem postupně spaloval za pomoci již zmíněné pece VEB ELEKTRO. Dle normy ISO 1171 byla vždy nastavena teplota spalování paliva 550°C po dobu dvou hodin. Ze vzniklého popela bylo za pomoci ručního lisu vylisováno zkušební tělísko o daných rozměrech.



Obr. 16: Vylisovaný zkušební vzorek



Obr. 17: Zkušební vzorek před měřením



Obr. 18: Zkušební vzorek po měření

Vylisovaný vzorek byl umístěn na platinovou destičku o rozměrech 25x25 mm a vsunut do pozorovací elektrické pece typu 0116 E. Tato elektrická pec se zdvihovým mechanismem je určena k tepelnému zpracování a pozorování malých množství materiálů do teplot 1500 °C pomocí odporového ohřevu. V poslední fázi jsem si připravil fotoaparát, díky kterému měření bylo pečlivě zaznamenáno. Vzniklé fotografie slouží k vyhodnocování měření.



Obr. 19: Měřicí aparatura během zkoušky.

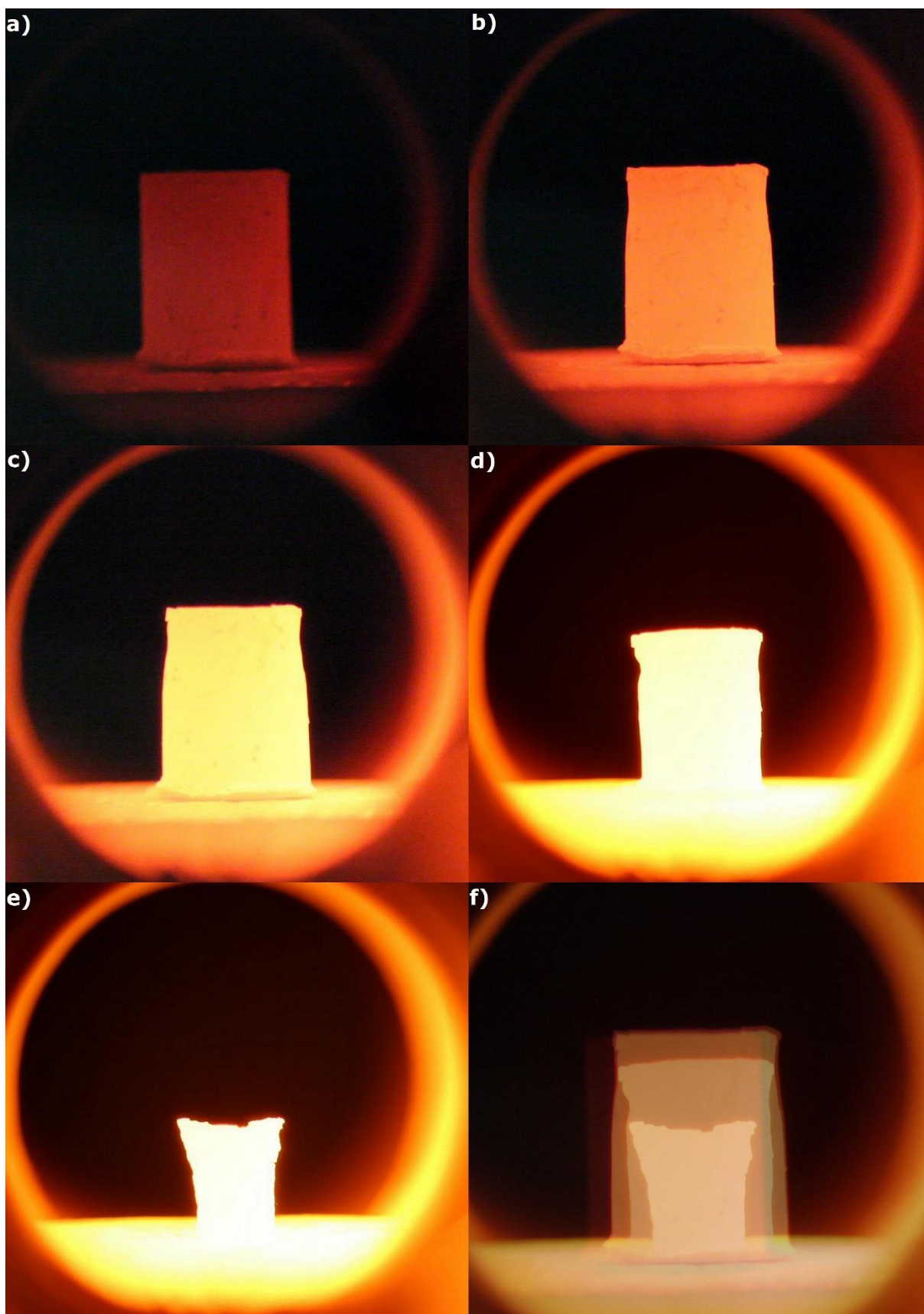
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ:

Dohromady byly provedeny dvě měření. Měření začínaly na teplotě 700°C a probíhaly do 1450°C. Ohřev v obou případech byl nastaven na 5°C za minutu.

Průběh měření se částečně rozcházel s teorií. Změny neprobíhaly podle očekávání dle normy. I tak se na základě fotografií daly přibližně určit teplota deformace, teplota měknutí popela a teplota tání. Teplota tečení se prokazatelně určit nedala, protože při měření došlo opakovaně ke spečení jádra zkušebního válečku. Tím pádem se popel vytvrdil a neroztek se.

Na obrázku 20 je nafocen průběh měření. Snímek (a) nám ukazuje původní stav zkušebního tělíska. Počátky deformace se začaly objevovat při 725°C. (b) Měknutí začalo přibližně při 825°C (c). Tání nastalo přibližně při 1195°C (d). Tečení zkušebního vzorku bohužel nenastalo a tak s přesností nejsme schopni určit teplotu tečení. Při teplotě 1350°C (e) vzorek přestal měnit svoje rozměry. Pro porovnání jednotlivých stavů na snímku (f) je expozice všech předchozích stavů.

Většina odborné literatury uvádí teplotu měknutí a slínování popele stébelnin někde v rozmezí 700 až 800 °C a teplota tavení přibližně v intervalu 925°C až 1025°C, u dřeva pak měknutí v intervalu 1000°C až 1200°C a teplota tavení 1400°C až 1500°C v závislosti na druhu dřeva. Káva se tedy svými charakteristickými teplotami řadí přibližně na pomezí mezi stébelniny a dřevo. Při dostatečné optimalizaci spalující komory bychom měli být schopni eliminovat nadměrné nalepování popela na teplosměnné plochy. S problematikou teplot popela se dále budeme zabývat během spalovací zkoušky, kdy budeme sledovat výhřevné plochy, abychom zjistili, jestli dochází k nalepování popela či nikoliv.



Obr. 20: Průběh měření: a) počáteční stav, b) první deformace, c) měknutí, d) tání, e) finální stav, f) expozice všech snímků dohromady

5.5 PRVKOVÝ ROZBOR

Palivový rozbor byl provedený na elementárním analyzátoru CHNOS vario MACRO cube. Přístroj je schopen provést následující metody analýz:

- elementární analýza prvků CHNS, CNS, CHN, CN, N ze vzorku
- spalování vzorků v katalytické trubici, oddělení cizích plynů
- oddělení požadovaných měřených komponent
- detekce tepelnou vodivostí.



Obr. 21: Přístroj CHNOS vario MACRO cube

Měřením bylo získáno procentuální zastoupení uhlíku (C), vodíku (H), dusíku (N) a prchavé síry (S). Za pomoci výpočetního softwaru bylo následně dopočítáno procentuální zastoupení kyslíku, spalné teplo a výhřevnost při 20°C. Všechny naměřené a vypočítané hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Kávová sedlina							
Parametr			Vzorek v dodaném stavu			Vzorek bezvodý	Hořlavina vzorku
	zkratka	jednotky	hodnota	směrodatná odchylka	interval spolehlivosti	hodnota	hodnota
Voda zbytková	W ^r	% hm.	3,76	-	-	0,00	0,00
Popel	A ^r	% hm.	1,47	-	-	1,53	0,00
Hořlavina	B _p	% hm.	94,78	-	-	98,47	100,00
Uhlík	C	% hm.	53,77	0,06	0,05	55,87	56,73
Vodík	H	% hm.	7,16	0,46	0,40	7,00	7,11
Dusík	N	% hm.	2,68	0,03	0,02	2,78	2,83
Síra prchavá	S	% hm.	0,14	0,06	0,05	0,14	0,15
Kyslík	O	% hm.	34,79	25,51	22,36	32,68	33,19
Spalné teplo	HHV _h	kJ.kg-1	22834	-	-	23725	24093
Výhřevnost	LHV ₂₀	kJ.kg-1	21264	-	-	22190	22533

Tab. 8: Prvkový rozbor kávové sedliny

Parametr	jednotka	hodnota
Sušina vzorku	% hm.	96,25
Ztráta žiháním v sušině	% hm.	94,83
Ztráta žiháním v původním vzorku	% hm.	98,53
Balastních podílů, tj. voda + popel	% hm.	5,22
Podíl hořlaviny v sušině	% hm.	98,47

Tab. 9: Doprovodné hodnoty k palivovému rozboru

6 TGA

Termogravimetrická analýza (TGA) je jedna z nejčastěji používaných metod k tepelné analýze biomasy. Přestože TGA pracuje na jiném principu než skutečné spalování v topném zařízení, poskytuje nám dostatečné osvětlení tepelných degradačních procesů probíhajících v průběhu thermochemické konverze. Cílem tohoto měření bylo prozkoumat pyrolýzní a spalovací charakteristiky čistého SCG, jeho směsi s dřevěnými pilinami a porovnat to se dřevem. Získané údaje by měly být užitečné pro další navrhování energetických systému založených na užívání SCG jako paliva.

6.1 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Předchozí prvkový rozbor ukázal, že SCG má vysokou koncentraci uhlíku, díky čemuž by kávová sedlina mohla být potencionální zdroj pro výrobu pelet. Nicméně ve srovnání s dřevní biomasou SCG má nižší koncentraci O/C. To je způsobeno vyšší koncentrací ligninu v kávě. Výzkumy ukazují, že SCG obsahuje přibližně 33% ligninu, 35% hemicelulózy a 9% celulózy. Lignin má poměr O/C okolo 0,4 a je velmi bohatý na aromatické vazby C=C. Naproti tomu složení dřeva je přibližně 40% celulózy, 27% hemicelulózy a 27% ligninu. Celulóza má oproti ligninu větší zastoupení kyslíku díky čemuž má i větší poměr O/C. [7]

Problémem se může jevit větší zastoupení dusíku a s tím související emisní limity. Větší zastoupení dusíku je přičítáno vysokému obsahu proteinu (13,6%), jehož obsah je o jeden řád vyšší než u dřeva. Již teď lze předpokládat, že pro splnění emisních limitů bude potřeba SCG míchat se dřevem. Z tohoto důvodu byl jedním ze vzorků na analýzu zvolena směs 50/50 SCG a borovicových pilin. [7] [8]

Analýza dále ukázala, že ve dřevní biomase se nachází více těkavých látek než v kávové sedlině. Tato vlastnost je přičítána vyššímu zastoupení holocelulosity (hemicelulózy a celulózy). U dřevin je jí 68% zatím co u SCG je to 46%. Hemicelulózy a celulózy patří mezi těkavé látky. V SCG je tedy obsaženo více stabilního uhlíku. Popel vzniklý při spalování kávové sedliny je tvořen několika minerály, jako je draslík (3,5 mg/g látky), fosfor (1,5 mg/g látky), hořčíku (1,3 mg/g látky) a vápník (0,8 mg/g látky). [7] [8]

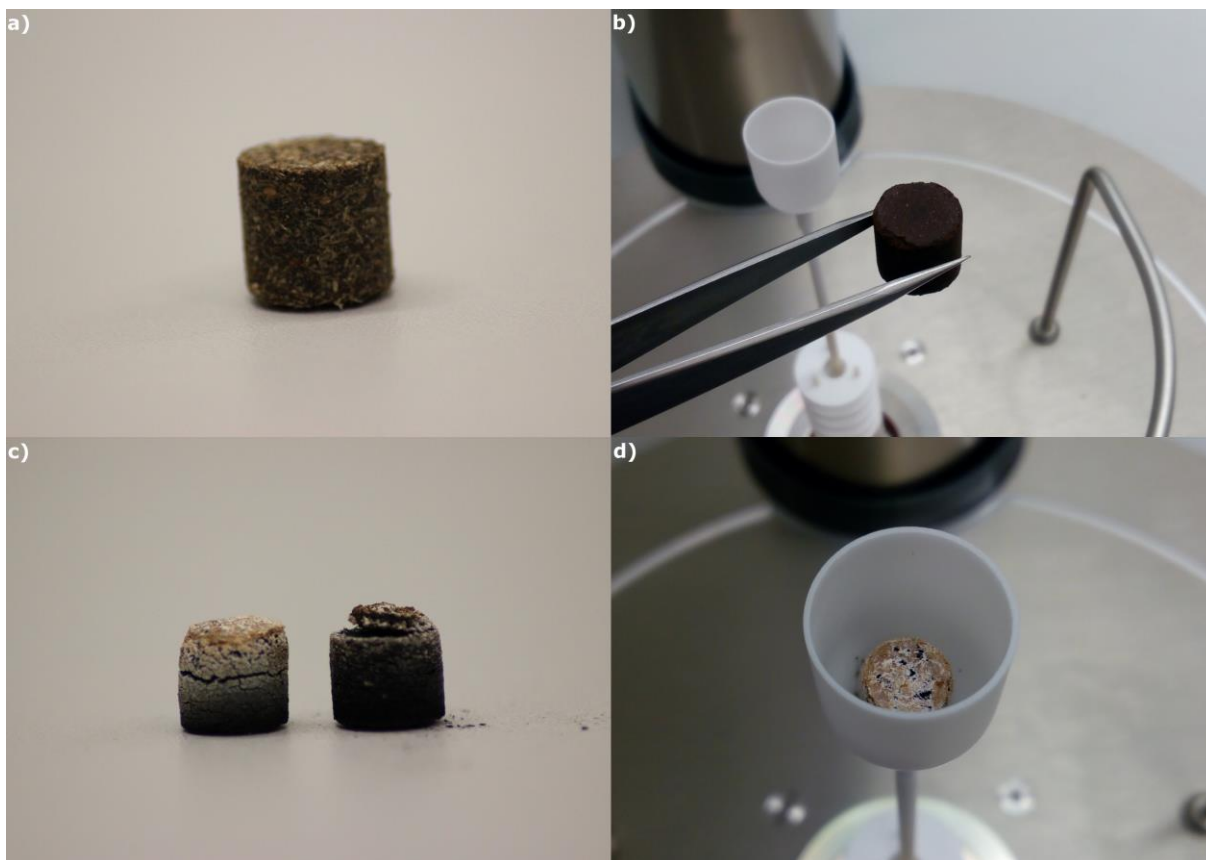
Složka	Složení [%]
Celulóza	8,6 - 13,3
Hemicelulóza	30,0 - 40,0
Proteiny	6,7 - 13,6
Olej	10,0 - 20,0
Lignin	33,6
Polyfenol	2,5
Kofein	0,02

Tab. 10: Chemické složení SCG [8]

6.2 MĚŘENÍ

Příprava zkušební vzorku probíhala za pomoci ručního lisu. Dohromady bylo připraveno 5 zkušebních vzorků a to homogenní SCG z jednoho zdroje, homogenní SCG z druhého zdroje, heterogenní směs SCG, směs heterogenního SCG a pilin z borovice v poměru

hmotnosti sušiny 50/50 a dřevěné piliny z borovice. Všechny vzorky byly slisovány do válečku a průměru a délce 10 mm.



Obr. 22: a, b) zkušební vzorky před měřením; c, d) zkušební vzorky po měření

Měření proběhlo na zařízení NETZSCH STA-449 F3 Jupiter F3. Základní částí přístroje je systém velmi přesných digitálních vah s vertikálním designem. Váhový systém je napojen na ochranný keramický modul – TG modul – v níž jsou umísťovány analyzované vzorky.

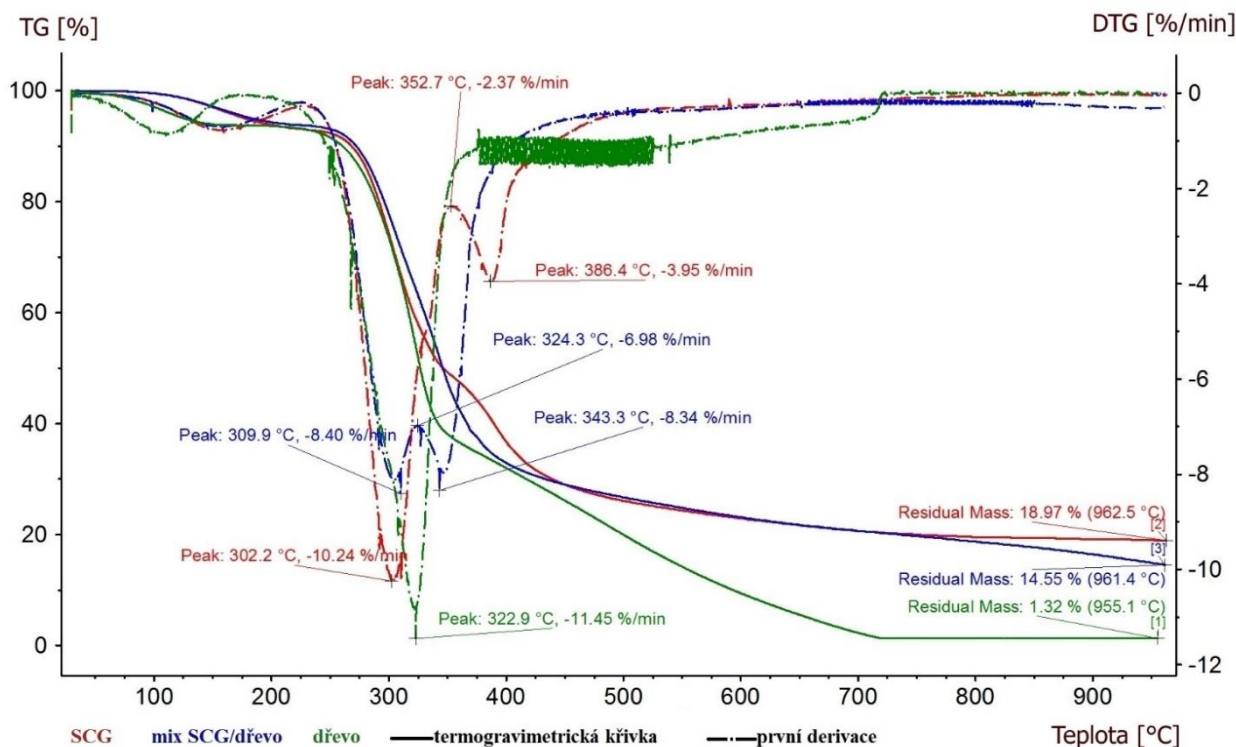
Analyzovaný vzorek je v průběhu měření zahříván ve vzduchotěsné peci s regulovanou rychlostí ohřívání. Je zde možnost nastavení prostředí, ve kterém je dané měření prováděno. V našem případě měření bylo prováděno v směsi 79% dusíku a 21% kyslíku. Jednalo se tedy o oxidační atmosféru. Teplotní gradient byl nastaven na 10°C / min až do dosažení 1100 °C.



Obr. 23: NETZSCH STA-449 F3 Jupiter F3

6.3 VYHODNOCENÍ

Experimentální TGA křivky pro všechny vzorky jsou zobrazeny na obrázku 24. Křivky pro kávovou sedlinu vykazují obvyklý tvar ligninocelulózových materiálů. Dá se tedy předběžně vyhodnotit, že SCG se bude chovat při spalování obdobně, jako dřevní biomasa. U kávy však oproti dřevu nastává o trochu dříve odpařování těkavých látek.



Obr. 24: Graf TGA 1

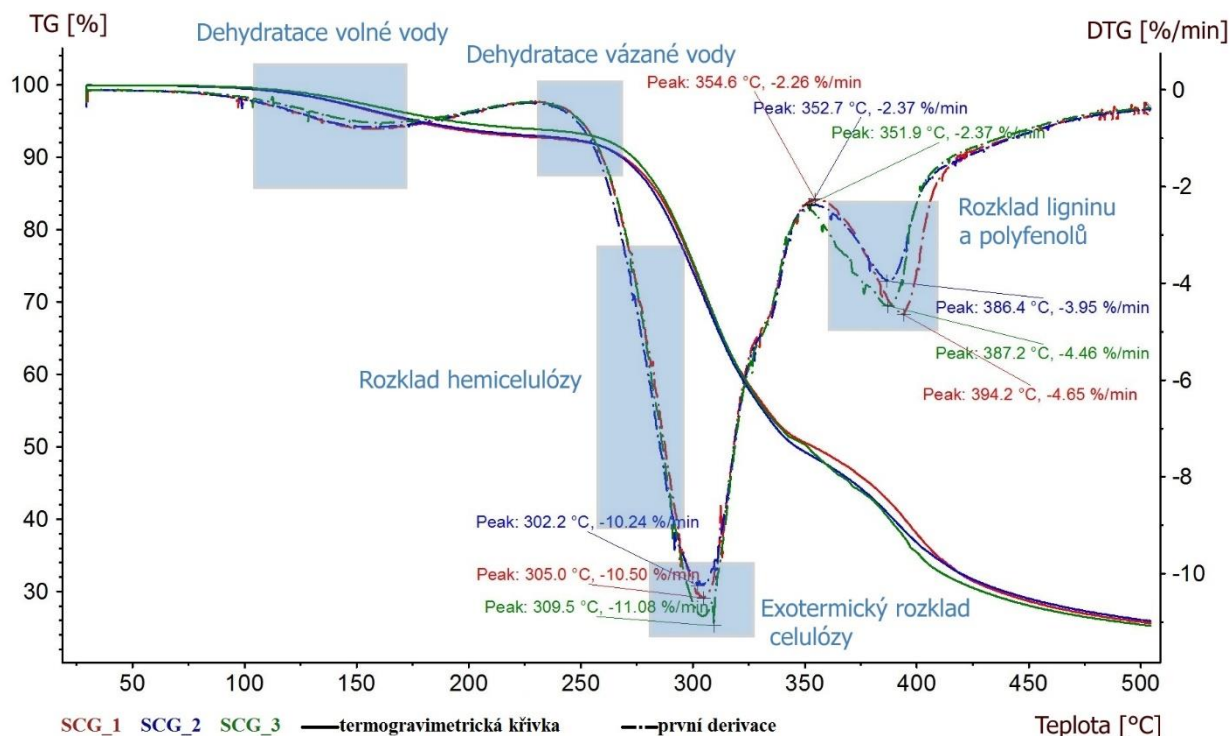
Obrázek 26 nám ukazuje TGA křivky pro 3 vzorky SCG. Odstraňování vlhkosti neboli dehydratace proběhla ve dvou krocích. V prvním kroku došlo k odpaření vody volné a v druhém kroku vody vázané. Při teplotě okolo 250 °C začíná docházet k rozkladu hemicelulózy, která patří mezi těkavé látky. Zhruba při teplotě 300 °C nám začíná exotermický rozklad celulózy. Jako poslední přibližně při teplotě 360 °C probíhá rozklad ligninu a polyfenolů. To je zapříčiněno poměrně vysokou stálostí těchto látek. Z charakteru křivek lze také vyvodit, že typ a původ kávy má zanedbatelný vliv na průběh spalování. V našem případě byl vzorek 1 100% arabika z Afriky, vzorek 2 100% arabika z Kolumbie a vzorek 3 směs 5 blíže nespecifikovaných typů kávy.

Obrázek 27 nám ukazuje porovnání vzorku kávy a směsi 50/50 káva/dřevo. Odstraňování těkavých látek se liší od těch, které byly získány pro čisté dřevo a čistou kávu. Vzorek vykazuje vyšší reaktivitu. Toto chování je pravděpodobně způsobeno heterogenní strukturou a s ní související vzájemná interakce mezi jednotlivými složkami.

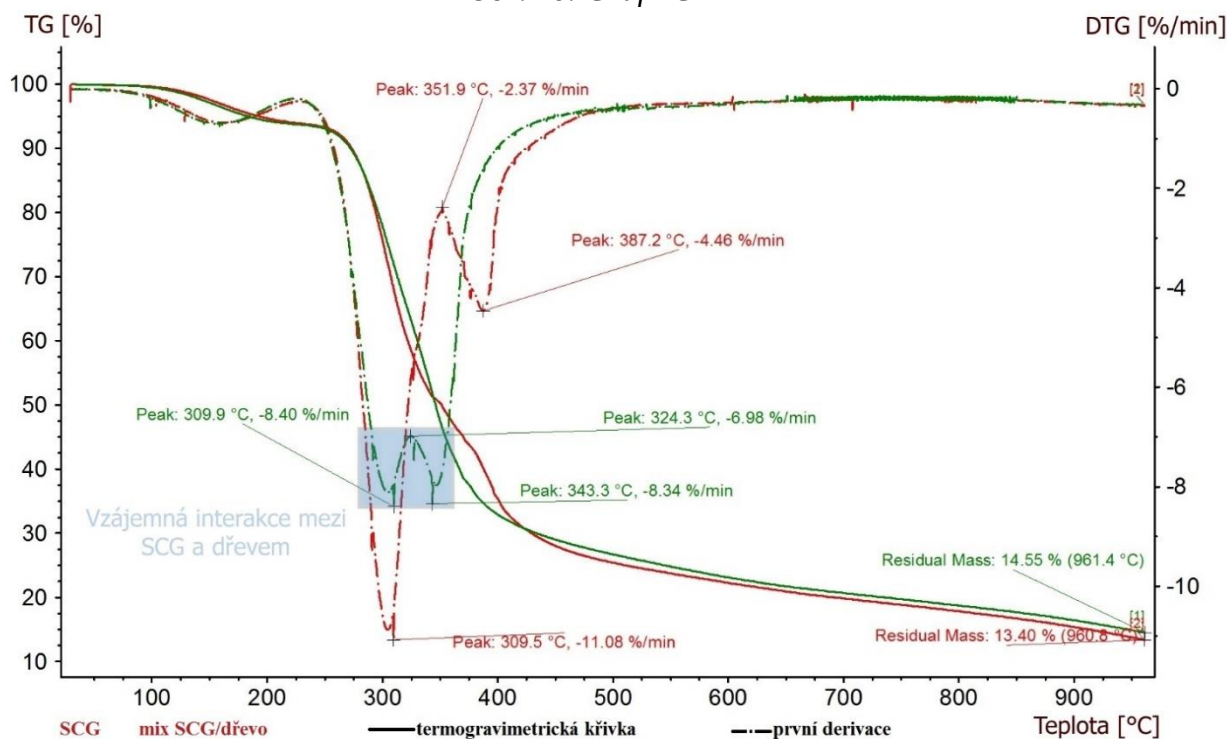
Při termogravimetrické analýze nám vzorky kávy vykazovaly větší procentuální zastoupení tuhých zbytků, než bylo zjištěno při zkoušce popeloviny. Tento jev je pravděpodobně způsoben tím, že TGA analýza probíhá na jiné bázi než samotné spalování. Tím pádem nedošlo k dokonalému spálení vzorku.

Obr. 25: Zkušební vzorek po TGA





Obr. 26: Graf TGA 2



Obr. 27: Graf TGA 3

Na základě dat z termogravimetrické analýzy můžeme předběžně konstatovat, že kávová sedlina vykazuje při spalování obdobné vlastnosti jako dřevní biomasa. Měla by být tedy bez problému spalitelná. Zajímavou alternativou by mohla být směs 50/50 dřevo/káva. Tato varianta by měla lépe splňovat emisní limity a zároveň díky heterogenní struktuře a vzájemné interakci by mohla dosahovat stabilního spalování.

7 SUŠENÍ

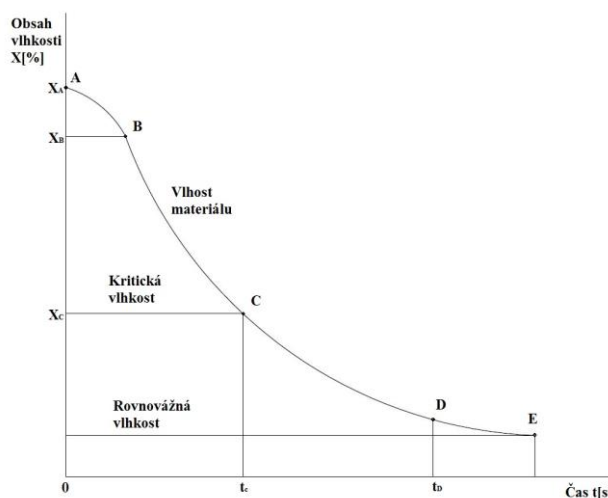
Sušením rozumíme fyzikální děj, při kterém se snižuje obsah vody v látce, aniž by se tím měnilo její chemické složení. Odstranění kapaliny z tuhé fáze může být realizováno mechanicky (filtrací, lisováním, odstředěním), fyzikálně-chemicky (adsorpcí, absorpcí) nebo tepelně (převod kapaliny do par teplem). Energeticky nejnákladnější a tedy nejdražší, je tepelné sušení. Zároveň však pro svojí jednoduchost a univerzálnost v energetice nejvíce využívané. Při tepelném sušení paliv probíhají přenosy tepla a hmoty mezi palivem a sušicím médiem. Přenos tepla probíhá nejčastěji konvekcí (proděním), kdy dochází k výměně tepla a vlhkosti mezi palivem a sušicím médiem proudícím napříč povrchem materiálu. Jako sušící médium lze využít vzduch, inertní plyn, spaliny nebo páru. Další možností přenosu tepla je kondukce (vedení) a radiace (záření). Voda obsažená v palivu se dělí na vodu volnou, vázanou a adsorbovanou (chemickou): [9]

- **Volná vlhkost** – Kapalina zadržená na povrchu tuhé fáze (v cévách a mezibuněčných prostorech), která má stejné vlastnosti, např. tlak par, bod varu a jiné, jako samotná kapalina. Tuto vlhkost lze ze dřeva odstranit i mechanicky, například lisováním.
- **Vázaná vlhkost** – Vázaná vlhkost je kapalina zadržená v malých pórech tuhé fáze. Jde o vlhkost obsaženou v buněčných stěnách pojenou osmotickou vazbou nebo v chemické vazbě s buničitým materiálem. Tuto vlhkost z biomasy nelze odstranit mechanicky.
- **Adsorbovaná (chemická) vlhkost** – Adsorbovaná vlhkost jsou molekuly kapaliny vázané na aktivních místech povrchu silami částečně chemické povahy. Tuto vodu nelze z materiálu úplně odstranit. Pohybuje se v rozmezí 0,5-2% hmotnosti sušiny.

7.1 KINETIKA SUŠENÍ

Závislost rychlosti sušení na čase vyjadřuje kinetika sušení. Průběh sušení je možné znázornit graficky jako závislost obsahu vlhkosti na čase. Z grafu je zřejmé, že obsah vlhkosti v materiálu neklesá lineárně. [9]

- **Úsek AB** - Zpočátku probíhá odstraňování vlhkosti z povrchu materiálu, které nevyžaduje tolik energie, a obsah vlhkosti klesá poměrně rychle (fáze rychlého sušení). Tento úsek často splývá s úsekem BC popřípadě se i zanedbává.
- **Úsek BC** – Probíhá konstantní rychlost sušení. V tomto úseku se teplota materiálu nemění a všechno teplo dodávané sušicím médiem se spotřebovává na odpařování nevázané vody. V bodě C látka dosahuje kritické vlhkosti.
- **Úsek CDE** – V tomto úseku dochází ke klesání rychlosti sušení. Při dosažení bodu C přichází do přímého kontaktu první částice pevného materiálu se sušicím médiem (povrch materiálu již nepokrývá vrstva kapaliny) a materiál se začne ohřívat. Zpomaluje se sdílení tepla a hmoty. V bodě E dosáhne teplota materiálu téměř teploty sušícího plynu, sušení se zastavuje a materiál v daném prostředí již nelze více vysušit. Je dosaženo tzv. rovnovážné vlhkosti.



Obr. 28: Kinetika sušení [9]

7.2 ZPŮSOBY SUŠENÍ

Biomasu lze sušit buď přirozeně (pasivní sušení) nebo uměle (aktivní sušení). Oba tyto způsoby mají své výhody a nevýhody. [9] [10]

7.2.1 PASIVNÍ SUŠENÍ

Pasivní sušení je základním způsobem jak sušit biomasu. Při tomto způsobu sušení se materiál uskladní tak, aby byl ochráněn před deštěm a aby se zajistilo dostatečné proudění vzduchu. Ideální je materiál umístit na přímé slunce. Voda se na povrchu odpařuje a pára difunduje do okolního vzduchu. Hlavní výhodou pasivního sušení je energetická nenáročnost a s tím spojené minimální náklady. Mezi nevýhody patří dlouhá doba sušení a velké nároky na skladovací prostor. Další nevýhodou může být vysušení jen na určitou hodnotu vlhkosti, pod níž se i při delším sušení nedostaneme (u dřeva 15 - 20% vlhkosti). To se odvíjí od struktury a velikosti daného materiálu a od prostředí, ve kterém sušíme. [9] [10]

7.2.2 AKTIVNÍ SUŠENÍ

Pasivní sušení nemusí být vždy vyhovující. Z tohoto důvodu se dnes ve velké míře využívá aktivního sušení. Jeho hlavní výhodou je krátká doba sušení, úspora místa a eliminace degradace vznikem plísní a hub. Aktivní sušení probíhá v sušárnách. Ty se dělí podle různých kritérií do mnoha kategorií. Nejzákladnější je dělení sušáren podle teploty na sušárny sublimační (okolo -30 °C), nízkoteplotní (od -30 °C do 50°C – vymrazovací, kondenzační, solární, vakuové), teplovzdušné (do 100 °C – komorové, tunelové) a vysokoteplotní (do 130 °C – hermetické komory). Další rozdělení sušáren: [9] [10]

- Podle uspořádání provozu:
 - s kontinuálním provozem
 - s periodickým provozem
- Podle převažujícího způsobu sdílení tepla:
 - konvekční sušárny
 - kondukční sušárny
 - sálavé sušárny
 - dielektrické sušárny
- Podle sušícího média:
 - teplovzdušné sušárny
 - spalínové sušárny
 - sušárny s inertním plynem
 - sušárny s přehřátou párou
- Podle provozního tlaku:
 - atmosférické sušárny
 - přetlakové sušárny
 - vakuové sušárny
- Podle charakteru kontaktu sušícího prostředí s materiálem:
 - fluidní sušárny
 - sušárny s impaktním prouděním
 - pneumatické sušárny

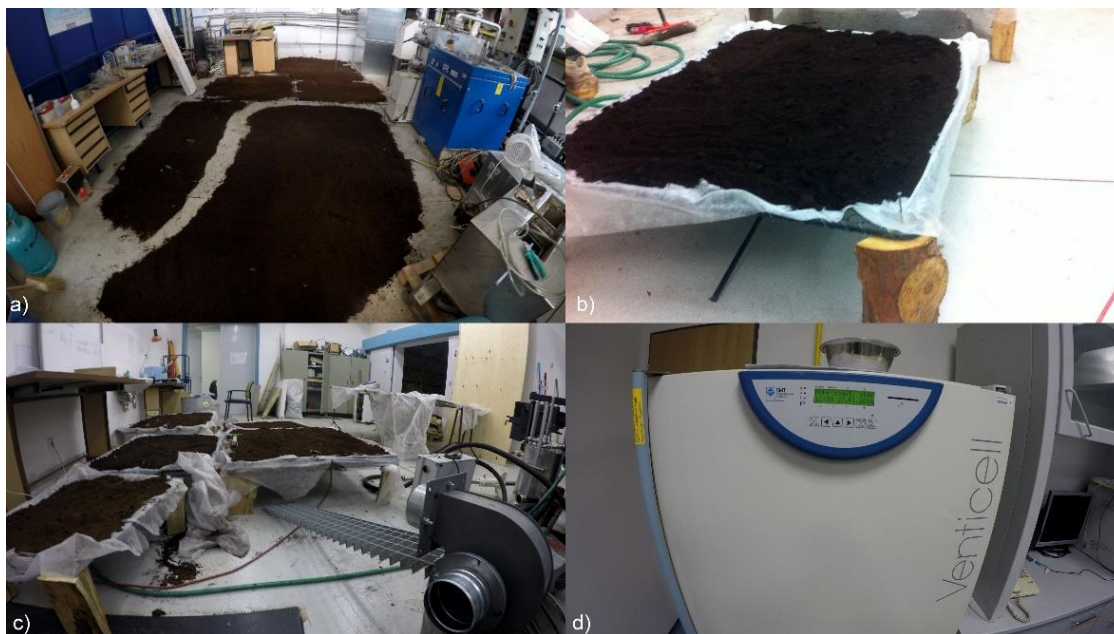
- Podle oběhového systému:
 - uzavřený oběh
 - otevřený oběh
 - s nuceným oběhem
 - s přirozeným oběhem

7.3 SUŠENÍ KÁVY

Sesbíraná kávová sedlina z kaváren měla průměrnou vlhkost 52%. Bylo tedy potřeba ji vysušit. Sušení probíhalo pasivním i aktivním způsobem.

Pasivní sušení kávy nejprve probíhalo ve vrstvě 5 – 8 cm na zemi ve skladovacích nevytápěných prostorech (viz. Obr. 29,a). Při pravidelných jedno až dvou denních intervalech prohrabávání kávová sedlina postupně vysychala. Při více jak týdenní přestávce však veškerý materiál zplsnivěl. Následovně bylo sušení přesunuto do vytápěné (cca 20 °C) palivové laboratoře s nucenou cirkulací (viz. Obr. 29,b,c). Místo skladování na zemi byly vyrobeny provizorní vyvýšené nástavce (síta) ze dřeva, pletiva a netkané textilie. Opětovně byla udělána vrstva 5 – 8 cm. Do okolí sušících nástavců byly umístěny větráky, které pomáhaly s cirkulací vzduchu. Tento postup byl nakonec úspěšný a během cca 7 dnů vedl k vysušení materiálu na vlhkost přibližně 11%. Z důvodů nepříliš velké prostorové kapacity a urychlení sušení probíhalo zároveň i aktivním způsobem a to v laboratorní sušárně VENTICELL (viz. Obr. 29,d). Jedná se o teplotní skříň, určenou pro laboratoře, k rovnoměrnému temperování různých druhů materiálu pomocí horkého vzduchu při nastavitelné teplotě a volitelném časovém režimu. Skříň je vybavena vzduchovou klapkou, která umožňuje vysoušení vlhkého materiálu. Sušení probíhalo při plně obsazené peci o teplotě 105 °C přibližně 6 hodin. Materiál byl nasušen na vlhkost přibližně 9 %.

Kávová sedlina je díky své vysoké jemnosti sušitelná i pasivním sušením. Při uvedení zpracování kávové sedliny do praxe bych z ekonomických důvodů aplikoval právě pasivní sušení s případným dosušením na požadovanou suchost v příslušné sušárně.



Obr. 29: Průběh sušení

8 PELETOVÁNÍ

Peletování se provádí za účelem upravení biomasy do formy ušlechtlejšího paliva. To s sebou přináší snížení vlhkosti, zvýšení energetické hustoty, homogenní tvar a s ním související možnost automatizace procesu spalování. Další výhodou je také lepší možnost skladování a transportu.

8.1 FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ UKAZATELE

Mezi základní fyzikálně-mechanické ukazatele ovlivňující peletování patří: [11]

- **Mechanická odolnost (otěr)** – mechanickou odolnost lze definovat jako schopnost zhutněného paliva zůstat neporušené během veškeré manipulace a přepravy. Mechanická odolnost se stanovuje podle normy ČSN EN 15210-1. Při této zkoušce se vzorky otáčejí v bubnu a naráží do lopatky, kterou je buben rozdělen. Hodnota mechanické odolnosti je důležitá z hlediska kontroly vzniku prachových částic během automatické dopravy pelet.
- **Pevnost v tlaku** – pevnost tlaku slisovaného paliva je zajištěn díky ligninu obsaženého v biomase. Lignin působí jako pojivo a ochranný povlak paliva, který nám do jisté míry brání absorpci okolní vlhkosti. K plastifikaci ligninu je během lisování potřeba dosáhnout dostatečného lisovacího tlaku.
- **Geometrie výlisku** – geometrie výlisku se většinou odvíjí od typu topeniště, pro které je palivo určeno. Tvar a velikost by zároveň neměly způsobovat problémy při dopravě. Rozlišujeme tři základní typy tvarů a to pelety, brikety a granule.
- **Měrná hmotnost** – měrná hmotnost je důležitým ukazatelem kvality výlisku pro porovnání s ostatními palivy.

8.2 PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ PROCES ZHUTŇOVÁNÍ

Proces zhutňování je ovlivněn velkým množstvím faktorů. Největší vliv mají vlastnosti vstupního materiálu. Od nich se dále odvíjí konstrukce lisu a samotné parametry lisování. Parametry ovlivňující zhutňování se experimentálně zjišťují a na základě následného vyhodnocení se provádějí příslušná opatření a optimalizace. [12] [13]

8.2.1 VLASTNOSTI VSTUPNÍHO MATERIÁLU

Mezi nejdůležitější vstupní vlastnosti materiálu patří vlhkost. Optimální vlhkost pro peletování se liší v závislosti na typu materiálu. Většinou to bývá v rozmezí 8 – 16 %. V případě nízké vlhkosti se vstupní materiál jednoduše smočí za pomoci lisovací linky. Naopak v případě vyšší vlhkosti je potřeba materiál sušit, což je energeticky velmi náročné. Experimentální lisy jsou již schopny zvládnout vlhkosti i okolo 25% za pomoci tzv. dýchací lisovací hubice umožňující odvod vody během lisování. Další možností může být zbavení vlhkosti za opakovaným zhutňováním materiálu. To nám však zvedá provozní náklady lisu. [12] [13]

Další důležitou vlastností na straně materiálu je velikost vstupní frakce. Obecně platí, že velikost vstupní frakce by neměla přesahovat 1/5 průměru finálního produktu. S růstem velikosti vstupní frakce klesá smykové napětí a je obtížnější dosáhnout požadované kvality výlisku. [12] [13]

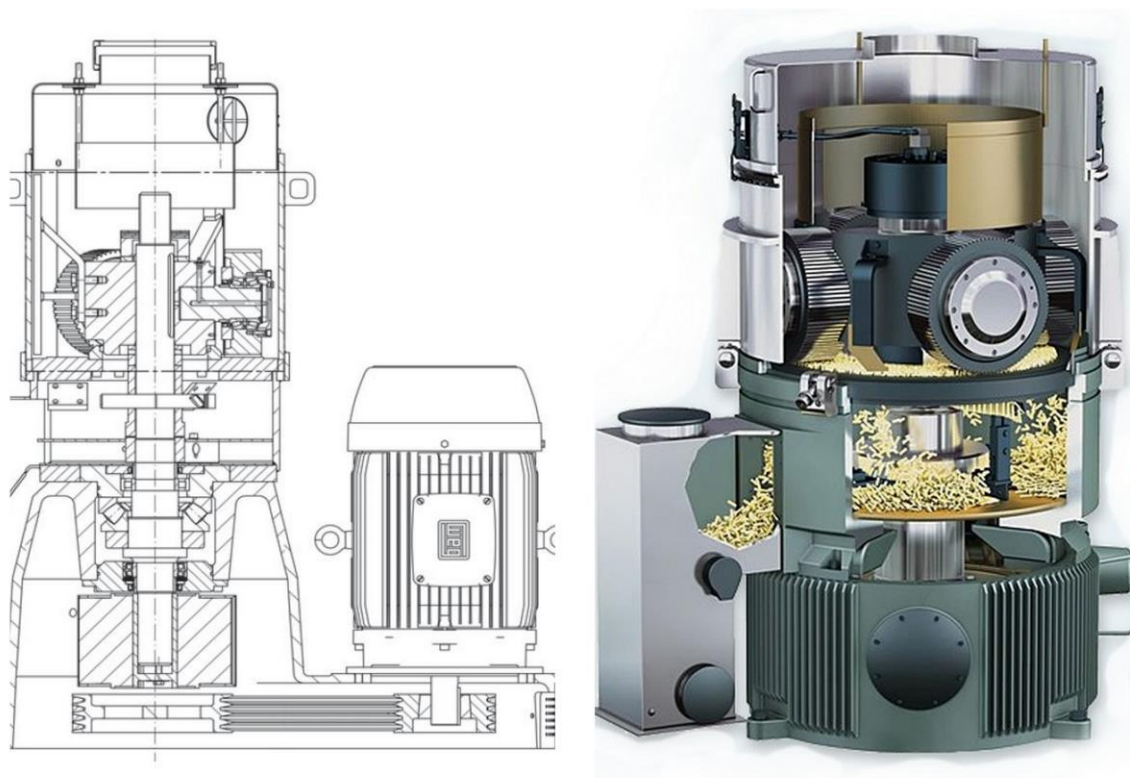
8.2.2 PARAMETRY LISOVÁNÍ A KONSTRUKCE LISU

Stěžejní parametry lisování jsou teplota a tlak. Lisovací teplota má přímý vliv na uvolňování ligninu obsaženého v biomase. Teplota jeho uvolňování se liší v závislosti na materiálu. Obvykle se pohybuje okolo hodnoty 120°C. Lignin je důležitý z hlediska získání pevnosti v tlaku. Lisovací tlak ovlivňuje především pevnost a trvanlivost výrobku. S rostoucím tlakem při lisování také souvisí snižování absorpce vlhkosti při skladování. Obě tyto veličiny jsou spolu velmi provázány. Bylo prokázáno, že při ohřevu materiálu do určité míry, klesá potřebný tlak na slisování materiálu. Další sledované vlastnosti jsou rychlost lisování a doba výdrže výlisku pod lisovacím tlakem. [12] [13]

Pro samotnou konstrukci lisu je důležité znát všechny parametry ovlivňující kvalitu výlisku. Mezi stěžejní parametry zhutňovacích strojů patří geometrie lisovací komory (průměr, délka, kuželovitost stěn, počet lisovacích otvorů), typ lisovacího nástroje, protitlak působící na slisovanou zátku, délka ochlazovacího kanálu, materiál lisovací komory a lisovacího nástroje (s tím souvisí součinitel tření mezi nástroji a lisovaným materiálem). [12] [13]

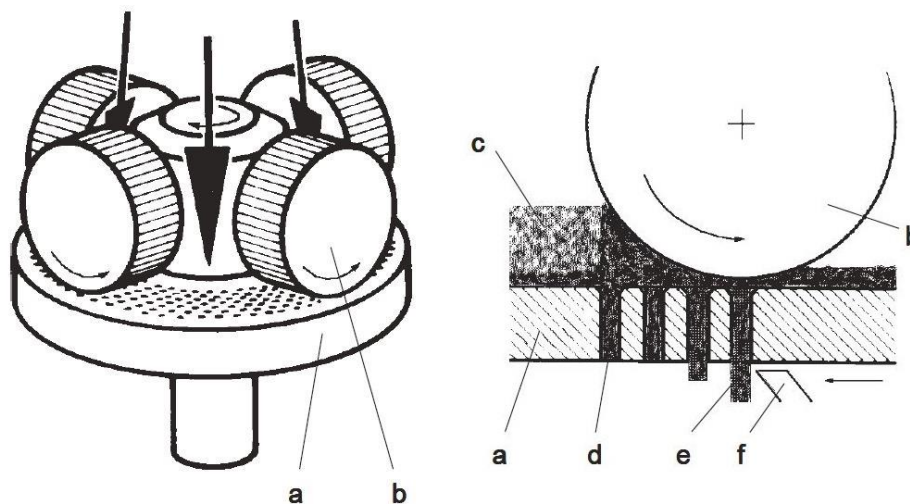
8.3 PELETOVÁNÍ KÁVY

Peletování proběhlo na lisu KAHL 33-390/500 na Slovenské technické univerzitě v Bratislavě na ústavu výrobních systémů, environmentálnej techniky a manažmentu kvality. Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloši Matúšovi, PhD. a doc. Ing. Peteru Křižanovi, PhD., kteří zaštitili celý proces peletování.



Obr. 30: Výkres a model peletovacího lisu KAHL 33-390/500 [14]

Lis se skládá z hlavních dvou součástí a to z matrice (a) a drtícího kola (b), jenž jsou vlastní lisovací nástroje pro výrobu pelet. Všechny ostatní části slouží k umístění pohonu, přivádění lisovaného materiálu a odvodu hotových pelet. Rozdrcený materiál se dopravuje dávkami shora do lisovací komory a na matrici vytváří z materiálu koberec (c). Rotující drtící kola drtiče zhutňují koberec materiálu a následovně protlačují materiál do lisovacích kanálů (d). Tím dochází k jeho peletizaci. Zespodu matrice vystupuje válcová provaz (e), který je následovně odsekáván nožem (f) do potřebné velikosti. [14]



Obr. 31: Schéma peletovacího zařízení [14]



Obr. 32: peletovací zařízení KAHL 33-390/500

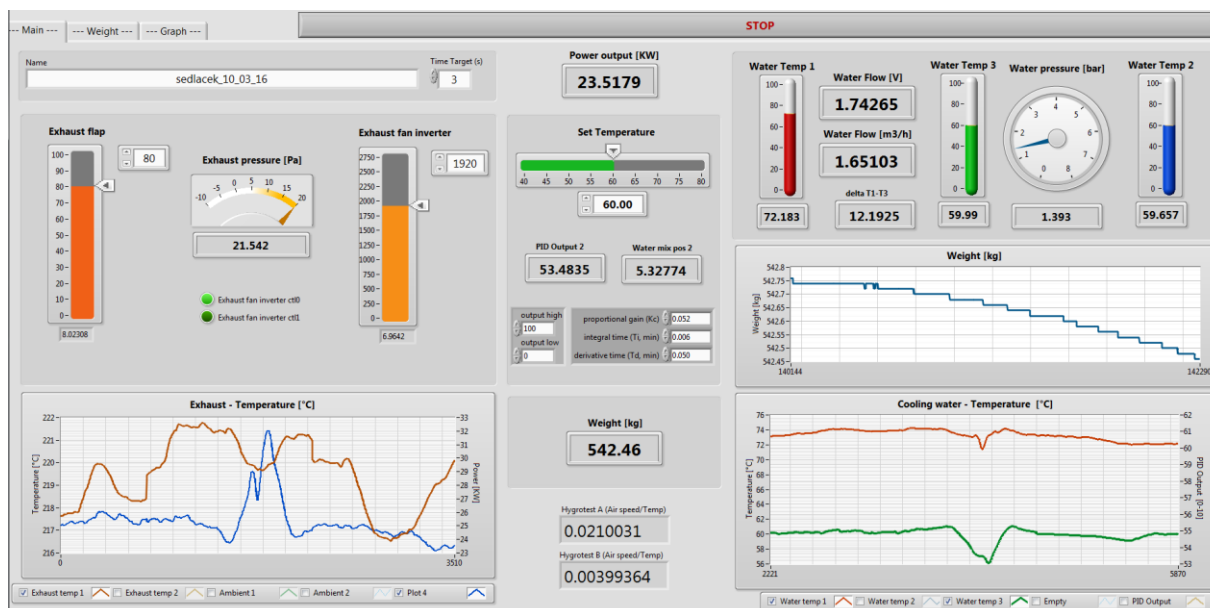
Peletování pro naše potřeby za účelem provedení spalovací zkoušky bylo dostačující. Pro vytvoření směsi kávy/dřevo byly použity piliny z borovicového dřeva. Nicméně pro komerční využití peletky nedosahují dostatečné pevnosti ani délky dle normy. Z tohoto důvodu nemá cenu dělat zkoušku otěrem a další zkoušky, které se při peletování běžně dělají, protože vyhodnocení by bylo neprůkazné.

Tlak lisovací hlavy byl nastaven na 120 baru. Peletovací stroj použitý při peletování byl vybaven matricí s krátkými kanály, které jsou vhodné pro dřevo. Dřevo při lisování klade velký odpor, zatímco káva klade odpor menší. S tímto jevem souvisí délka lisovacího kanálu. Pro optimalizaci peletování by bylo třeba použít matrici s prodlouženými kanály, které poskytují vyšší tlak na peletovaný materiál. Z ekonomického hlediska by to nepředstavovalo další nadbytečné náklady. Každá matrice má omezenou životnost a většinou se dělá na zakázku. Často to finančně vyjde lépe, než od dodavatelské firmy lisu. Další možností je přidání aditiva do peletovaného materiálu. To ale podstatně zvyšuje náklady na peletování.



Obr. 33: Výsledné peletky: a) čisté SCG; b) 75% SCG s 25% dřeva; c) 50% SCG s 50% dřeva

Na obrázku 27 můžeme vidět vedle sebe peletky z 100% SCG, 75% SCG na 25% dřeva a 50% SCG na 50% dřeva. Pelety s vyšším obsahem dřeva jsou lesklejší a tvrdší. To je díky ligninu, který při stlačení na povrchu vytváří ochrannou vrstvu. Aby bylo stejného jevu dosaženo i u kávy, musela by být použita lisovací matrice s delšími kanálky. Kávová sedlina má tedy potenciál k peletování. Je však potřeba přizpůsobit tomu lisovací zařízení a to prodloužením kanálů peletovací matrice.



Obr. 35: Namodelované rozhraní měření v Labview během zkoušky

9.1 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

KOTEL VERNER A251: Automatický teplovodní kotel VERNER A251 je určen pro spalování různých druhů obnovitelných paliv (dřevních, rostlinných pelet, obilí, atd.). Používá se jako komfortní, úsporný a ekologický zdroj tepla pro vytápění, ohřev vody a obdobné aplikace.

PARAMETRY KOTLE	
Jmenovitý výkon	25 kW
Regulovatelnost	7,5 – 28 kW
Účinnost	92%
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu)	
- pelety dřevní	5,8 kg/h (17,5 MJ/kg)
- pelety rostlinné	6,3 kg/h (15,5 MJ/kg)
- obilniny	6,8 kg/h (14,5 MJ/kg)
Objem vodní náplně	85 l
Minimální teplota vratné vody v provozu	60 °C
Teplota spalin na výstupu při jmenovitém výkonu	160 °C
Předepsaný provozní tah komína	15 Pa
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3

Tab. 11: Vybrané technické údaje kotle VERNER A251 [15]

Kotlové těleso je svařeno z ocelových plechů tloušťky 4 až 8 mm. Stěny, které jsou ve styku s plamenem, jsou dvojitě a chlazené vodou. Ve spodní části tělesa je hořákový prostor, stěny hořákového prostoru jsou z kvalitního kotlového plechu. V horní části tělesa je třítahový žárotrubný spalinový výměník, jenž tvoří 24 trubek o světlosti 50 mm. Hořák je obložen tvarovkami ze speciální jakostní keramiky. Zadní stěna hořáku je opatřena 3 otvory zapalovacího vzduchu ve spodní části a 2 otvory sekundárního vzduchu v horní části. Šnekový

dopravník dopravuje palivo z násypky do spadu, odkud propadáva do hořáku. Rozptylovač zajišťuje rovnoměrnější rozmístění paliva po ploše roštu. V hořáku se palivo spaluje a nespalitelné zbytky jsou vytlačovány roštnicemi do popelníku. Roštování je poháněno reverzním chodem pohonu plnicího dopravníku. Spaliny proudí výměníkem, kde předávají teplo do topné vody. Ochlazené spaliny odchází výstupním hrdlem do komína. Vzduch potřebný pro spalování dodává přetlakový ventilátor. Primární vzduch se přivádí do paliva spárami v roštu. Sekundární vzduch se do hořáku přivádí spadem paliva a otvory v zadní stěně hořáku. V našem případě byla regulace vzduchu prováděna mechanicky škrtící klapkou. [15]

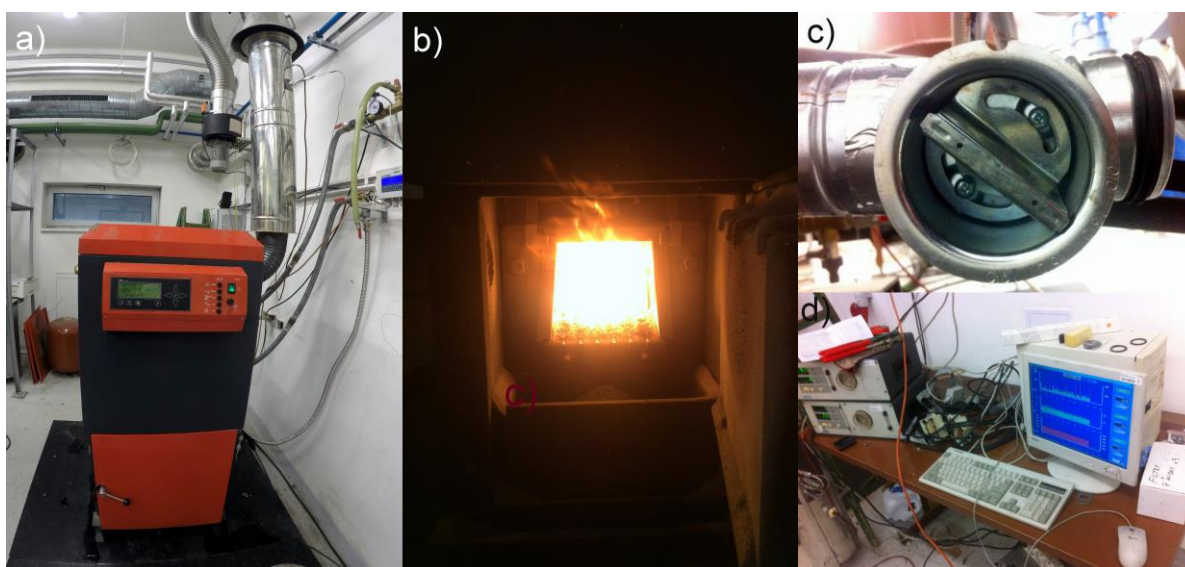
ULTRAMAT SIEMENS 21/O2 A 22: Analyzátor spalin Ultramat umožňuje měření koncentrace až tří sloučenin aktivních v infračerveném záření metodou NDIR (nedisperzní infračervená spektrometrie) a volitelně lze analyzátor vybavit elektrochemickým nebo paramagnetickým článkem pro měření koncentrace O₂ a elektrochemickým článkem pro měření koncentrace H₂S.

DIGITÁLNÍ VÁHA METLER TOLEDO ICS 669 nám slouží k měření úbytku paliva při spalování. Z toho lze dále můžeme vypočítat hodinovou spotřebu.

INDUKČNÍ PRŮTOKOMĚR FLOMAG 3000 s digitálním výstupem, který je napojený na PC a hodnota průtoku spolu s dalšími veličinami je synchronizována v čase.

DIGITÁLNÍ TEPLOMĚR COMET CO301 s připojeným termoelektrickým článkem je napojen na odběr z kouřovodu. Zařízení je vybaveno interní pamětí pro záznam teploty spalin v čase s možností přenést data do externího zařízení.

TAHOMĚR BRIGON měří v průběhu zkoušky předepsaný tah komínu. Připojuje se pomocí gumové hadičky na odběrné místo v kouřovodu. Měřicí rozsah přístroje je 0 -50 Pa s chybou měření max. 0,5 Pa. Před zkouškou je provedena kalibrace na tlak okolí.



Obr. 36: Zařízení během měření: a) Torzo kotle A251, b) Ohniště během zkoušky, c) Regulační klapka, d) Ultramat 21 a 22

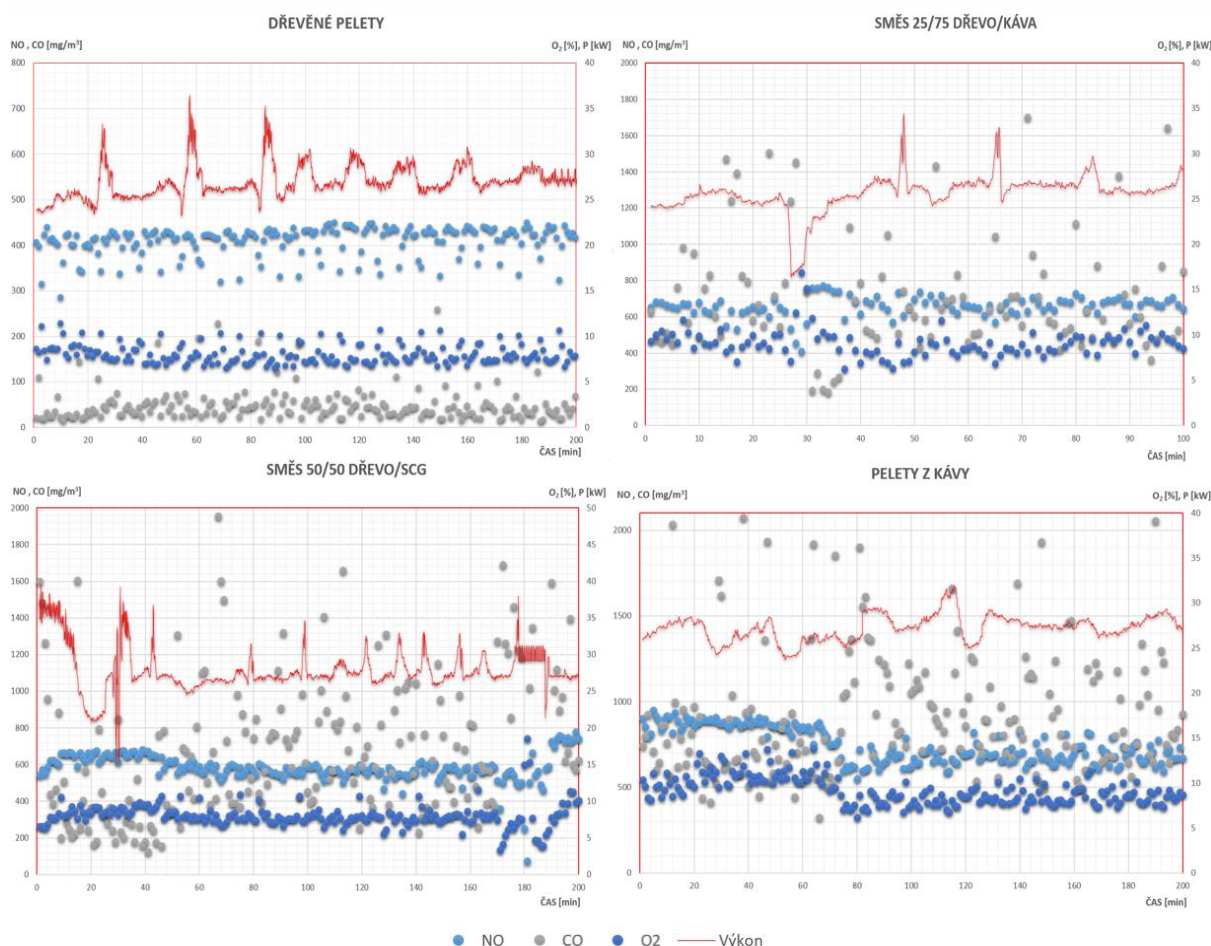
9.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ

Cílem měření bylo zjištění emisí CO, NO a tuhých znečišťujících částic (TZL) vznikající při spalování kávové sedliny a výsledky porovnat se dřevem. Pro lepší srovnání byly na kotli nejprve spalovány čisté dřevěné peletky, následovně směs 50/50 káva/dřevo, 25/75 káva dřevo a nakonec peletky z kávové sedliny. U všech paliv byla před zkouškou změřena vlhkost a výhřevnost.

Typ paliva	Vlhkost [%]	Výhřevnost [MJ/kg]
Dřevo	7,712	17,045
50na50	8,597	18,268
25na75	8,576	19,460
Káva	8,544	20,141

Tab. 12: Parametry paliva před spalováním

V první fázi probíhalo hledání optimálního nastavení procesu spalování. Poté jsme začali s měřením, které u každého paliva probíhalo po dobu nejméně dvou hodin. Na základě naměřených dat byly vyhotoveny následující grafy:

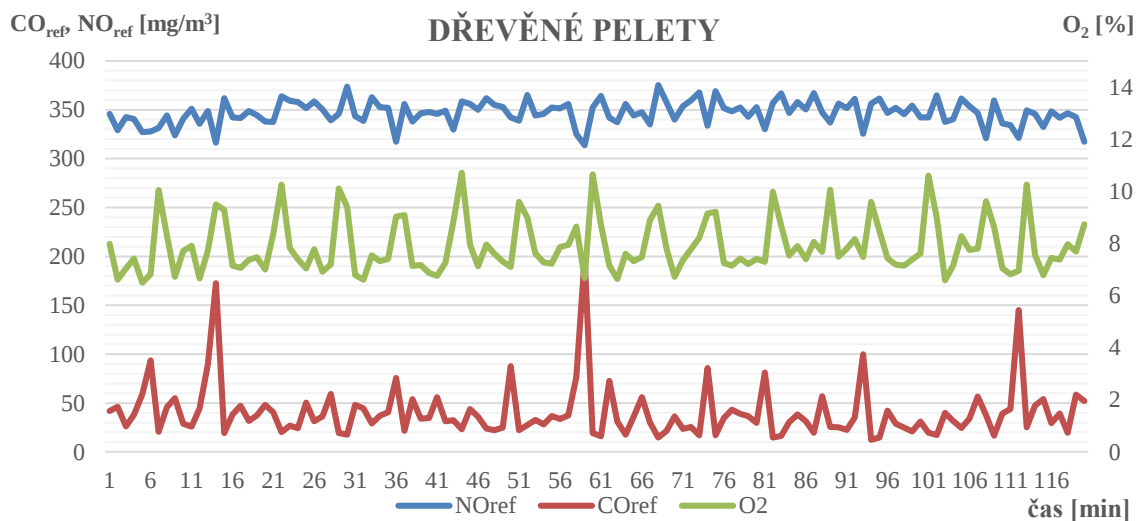


Obr. 37: Graf znázorňující průběhu měření

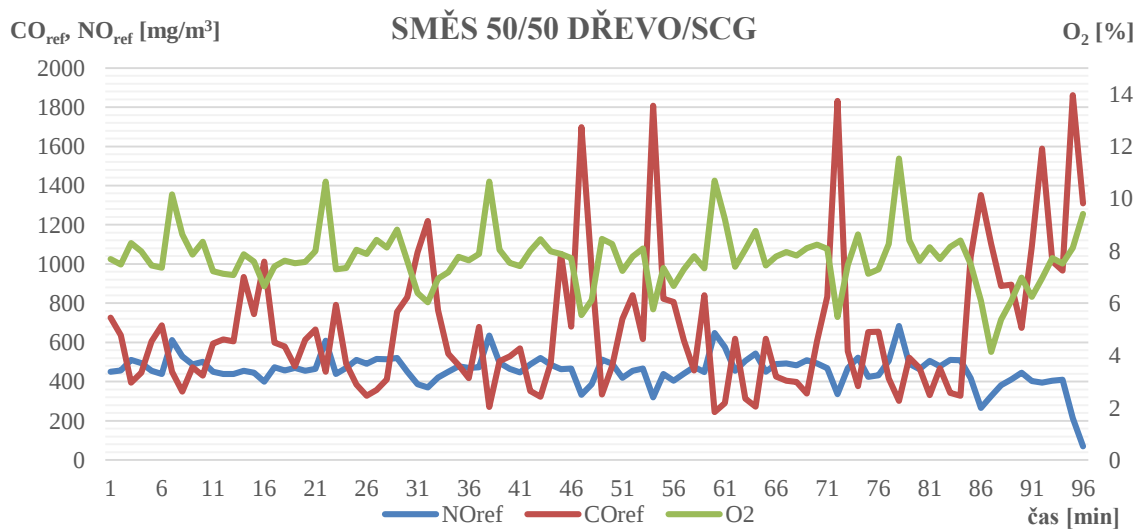
Během každého měření jsme se snažili dosáhnout alespoň 90 minut ustáleného stavu, při kterém nedocházelo k žádným markantním změnám výkonu a tím pádem ani výstupních teplot spalin. Z těchto naměřených hodnoty byly vypočteny referenční hodnoty CO a NO podle normy ČSN EN 303/5. Norma stanovuje, že referenční hodnota kyslíku pro přepočítání má být 10%. Na základě těchto dat byly zhotoveny následující grafy, které slouží k lepšímu vyhodnocení a porovnání paliv.

$$X_{REF} = X \cdot \frac{21 - O_{2,REF}}{21 - O_2} \quad (6)$$

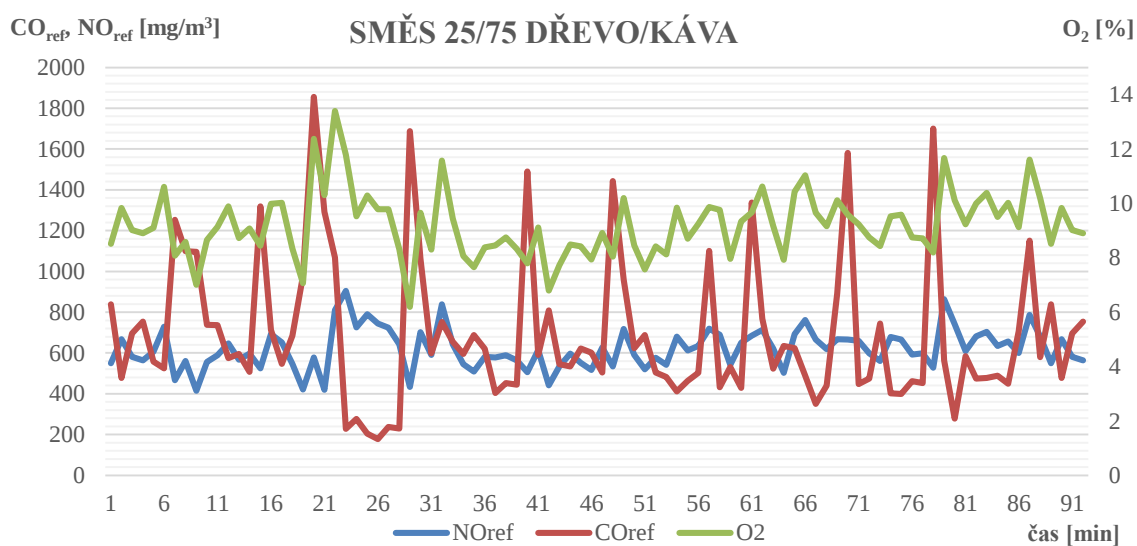
kde: X_{REF} – referenční hodnota plynu [%]; $O_{2,REF}$ – referenční hodnota kyslíku [%];
 O_2 – aktuální hodnota kyslíku [%]



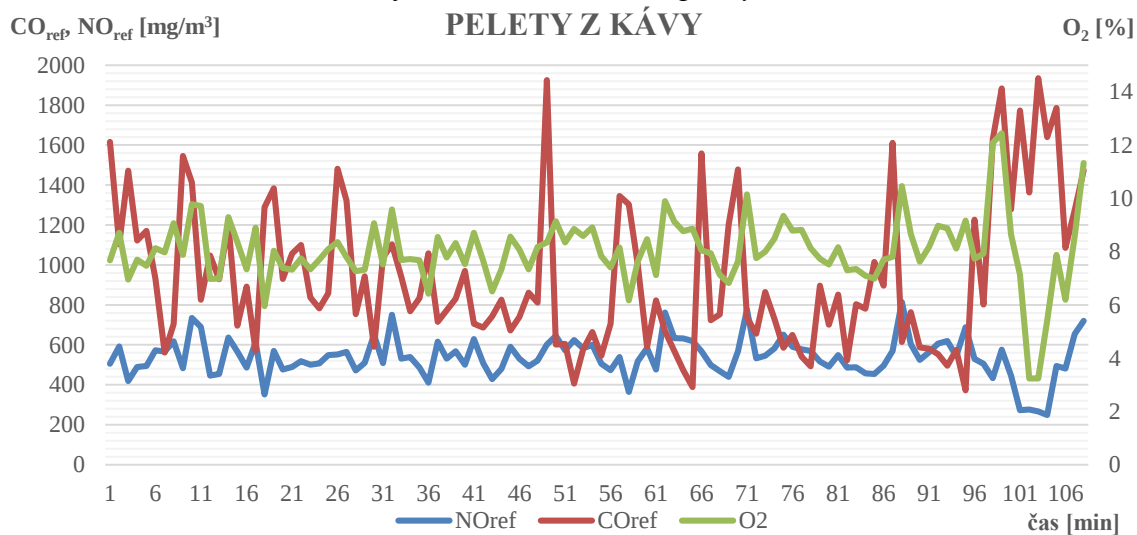
Obr. 38: Graf ustáleného měření – dřevěné pelety



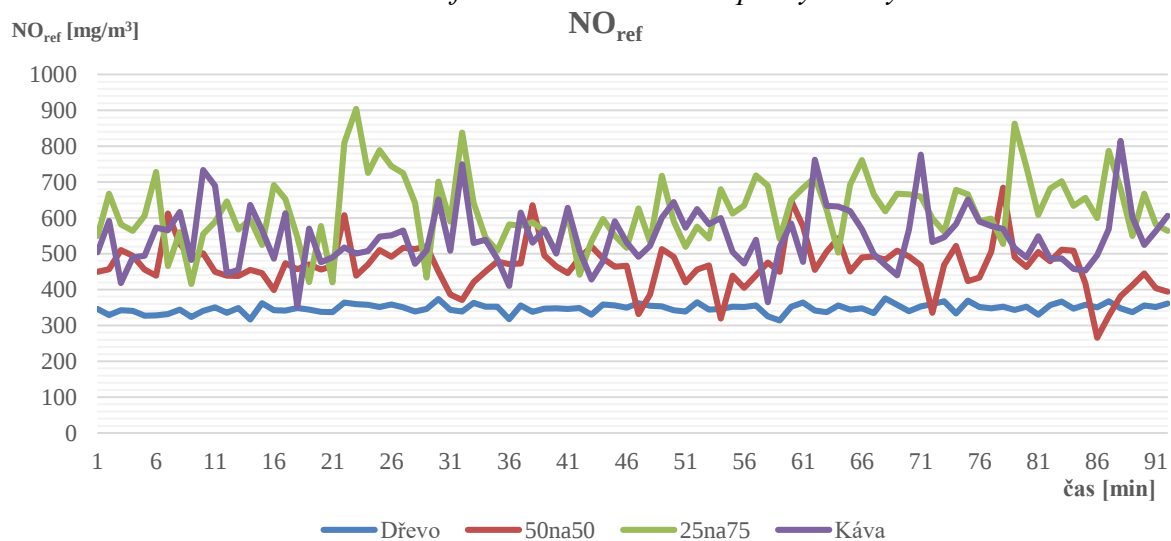
Obr. 39: Graf ustáleného měření – pelety směr 50na50



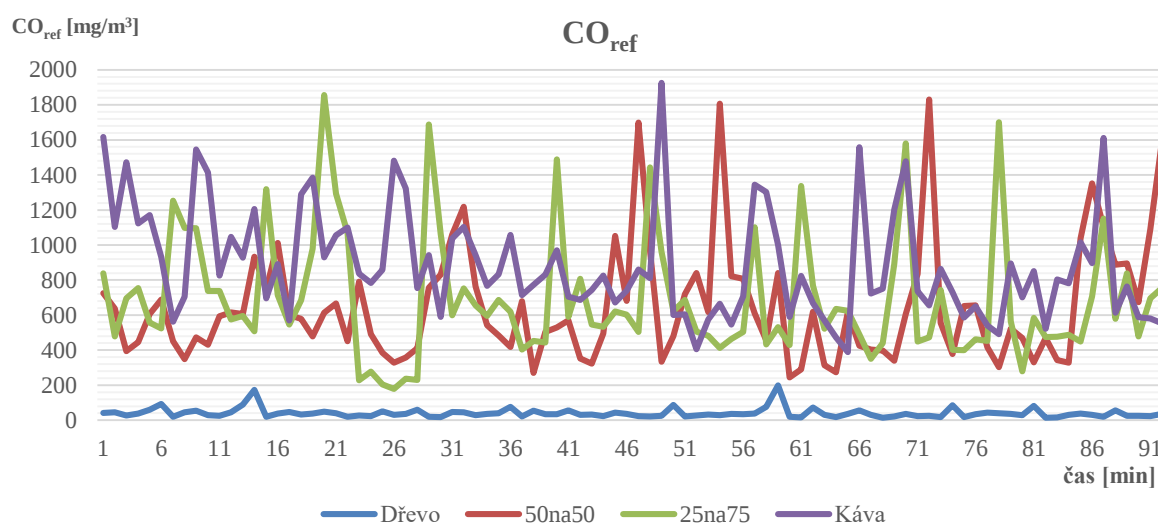
Obr. 40: Graf ustáleného měření – pelety směs 25na75



Obr. 41: Graf ustáleného měření – pelety z kávy



Obr. 42: Graf výsledků měření – referenční hodnoty NO



Obr. 43: Graf výsledků měření – referenční hodnoty CO

Pro lepší porovnání a vyhodnocení byly z dat stanoveny průměrné hodnoty, ze kterých byly zhotoveny následující tabulky:

Typ paliva	NO [mg/ m ³]	CO [mg/m ³]	O ₂ [%]	NO ^{referenční} [mg/ m _n ³]	CO ^{referenční} [mg/ m _n ³]	Teplota spalin [°C]
Dřevo	413,04	48,73	7,89	346,49	40,88	202,72
50na50	549,77	835,87	7,71	455,11	691,95	214,39
25na75	656,00	746,16	9,20	611,73	695,81	222,59
Káva	625,88	1 122,37	8,03	530,89	952,04	245,80

Tab. 13: Přehled průměrných hodnot z ustáleného měření

Jak již bylo řečeno, každé měření jsme se snažili co nejlépe odladit. K tomu nám mimo jiné sloužila škrtkovací klapka, kterou jsme si regulovali množství vzduchu proudícího do kotle. Také jsme regulovali množství paliva přiváděného do kotle šnekovým podavačem. Tato regulace nám činila značné problémy, protože ovládací software kotle má pevně nadefinované intervaly přikládání, které nešlo měnit. Museli jsme si tedy vybrat interval, který byl nejbližší našim požadavkům.

Při měření jsme se snažili dosáhnout hladiny O₂ přibližně 8%. To se nám podařilo skoro u všech měření až na směs 25/75 dřeva/kávy. Zde byla průměrná hodnota o něco vyšší, což se zajímavě projevilo na emisích. Množství přiváděného vzduchu do kotle (množství kyslíku) má velký vliv na charakter spalování. U směsi 25/75 dřeva/káva s množstvím kyslíku 9,2% dosahujeme poměrně příznivých hodnot CO v porovnání se směsí 50/50 dřeva káva. Obě směsi mají skoro stejný průměrný referenční oxid uhelnatý, přičemž jedna směs obsahuje o 25% kávy více než směs druhá. Je tedy patrné, že pro dosažení nižších hodnot CO by bylo lepší přivádět více vzduch. Nepříznivým aspektem této varianty je navýšení produkce NO, což musíme brát v potaz, a proto by bylo zapotřebí jiné řešení.

Při zhodnocení měření z pohledu CO nejlepších výsledků dosahuje dřevo, které dle normy ČSN EN 303/5 (Tab. 14) spadá do kategorie 5. třídy paliv (do 500 mg/m³). Všechny ostatní varianty spadají do čtvrté kategorie (do 1000 mg/m³). Na základě zkušeností nabytých

z příprav experimentu a měření lze předpokládat, že pro dosažení nižších emisí CO, by bylo potřeba lepší rozvržení přívodu vzduchu do spalovací komory (sekundární a terciální přívod). Při hodnocení emisí také musíme vzít v potaz, že kotel VERNER A251 spadá do emisní třídy 3. Nejedná se tedy o příliš ekologický kotel.

Dodávka paliva	Palivo	Jmenovitý tepelný výkon [kW]	Mezní hodnota emisí					
			CO			prach		
			mg/ m ³ při 10% O ₂					
			Třída					
			3	4	5	3	4	5
samočinná	biopaliva	≤ 50	3 000	1 000	500	150	60	40

Tab. 14: Výňatek z normy ČSN EN 303/5 - Mezní hodnoty emisí [17]

Emisemi NO se norma ČSN EN 303/5 nezabývá. Z tohoto důvodu se emise NO u kotlů na biomasu nižších výkonů moc nesledují. Změna ale nastane v roce 2020, kdy začne platit směrnice Evropského parlamentu a Rady 2009/125/ES upravující požadavky na Ekodesign kotlů na tuhá paliva. Tato norma udává maximální koncentraci NO ve spalínách pro daný kotel 200 mg/m³ (automatický kotel do 0,5 MW, ref. hodnota O₂=10%). Těto limitní hodnoty jsme nedosáhli ani při spalování dřeva. Lze tedy předpokládat, že nově certifikované kotle budou muset projít konstrukční úpravou. Zároveň rozdíl mezi peletami ze směsi 50/50 káva/dřevo a peletami čistě ze dřeva není v emisích NO zas tak velký. Můžeme tedy vyvodit, že jestli na kotli při měření NO projdou pelety ze dřeva, měla by také projít pelety ze směsi dřevo káva. Ekodesign také zpříšňuje emisní limity CO. Limitní hodnota pro daný kotel platná od roku 2020 bude 500 mg/m³ CO (ref. hodnota O₂=10%). Při spalování na ekologičtějším kotli a optimalizaci peletování by směs 50/50 neměla překročit danou limitní hodnotu.

Z naměřených dat byly následovně vypočtena hodinová spotřeba paliva, výkon a účinnost:

$$\dot{m} = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 60}{t} \quad (7)$$

kde: $\dot{m}$ – spotřeba paliva [kg/hod]; m_1 – množství paliva na začátku měřeného úseku [kg]; m_2 – množství paliva na konci měřeného úseku [kg]; t – doba měřeného úseku [min]; 60 – konstanta pro přepočítání [min/hod]

$$P = \rho \cdot \dot{V} \cdot c \cdot \Delta t \quad (8)$$

kde: P – výkon kotle [kW]; $\rho = 0,98732$ – hustota vody při 60 °C [kg/m³]; $\dot{V}$ – průtok vody kotlem [m³/s], c – měrná tepelná kapacita vody 4,18 [J/kg.K]; Δt – rozdíl teplot na výstupu a vstupu kotle [°C];

$$\eta = \frac{P}{Q_i \cdot \dot{m}} \quad (9)$$

kde: η – účinnost kotle; P – výkon kotle [kW]; Q_i – výhřevnost paliva [kJ/kg]; $\dot{m}$ – spotřeba paliva [kg/hod]

Vypočtené hodnoty byly vloženy do následující tabulky:

Typ paliva	Výhřevnost paliva [MJ/kg]	Spotřeba paliva [kg/hod]	Výkon [kW]	Účinnost [%]
Dřevo	17,045	6,83	27,10	83,81
50na50	18,268	6,32	27,35	85,26
25na75	19,460	5,99	25,77	79,63
Káva	20,141	5,64	27,85	88,29

Tab. 15: Přehled dopočítaných hodnot z ustáleného měření

Kromě emisí CO a NO jsme měřili také množství TZL. Toto měření probíhalo za pomoci speciální sondy umístěné do komína v jedné třetině od středu. Do měřicí sondy se umístily sběrné filtry, které byly před měřením vyžihány, zváženy a zakonzervovány tak, aby nedocházelo ke změně jejich vlhkosti a váhy. Pro každé palivo proběhly 3 měření.



Obr. 44: Filtry po měření polétavých částic: a) dřevo, b) směs 50na50, c) směs 75na25, d) káva

Hodnoty z měření byly zpracovány, přepočteny, zprůměrovány a vloženy do následující tabulky. Referenční hodnoty jsou orientovány k referenční hodnotě kyslíku 10% dle normy ČSN EN 303/5.

Typ paliva	Provozní podmínky C [mg/m ³]	Vlhké normální podmínky CN [mg/m ³]	Suché normální podmínky CSN [mg/m ³]	Referenční podmínky [mg/m _n ³]
Dřevo	3,4 ± 0,6	5,9 ± 1,1	10,1 ± 1,6	8,5 ± 1,3
50na50	8,3 ± 1,1	14,8 ± 1,9	28,3 ± 2,1	23,3 ± 1,8
25na75	9,8 ± 1,2	17,6 ± 2,2	36,4 ± 2,4	33,9 ± 2,2
Káva	9,9 ± 0,8	18,9 ± 1,5	25,8 ± 1,5	23,8 ± 1,4

Tab. 16: Výsledky měření TZL

Měření ukázalo, že káva má při referenčních podmínkách skoro třikrát více tuhých poléťavých částic než dřevo, nicméně dle normy ČSN EN 303/5 se všechny 4 měření řadí do kategorie paliv 5. třídy (do 40 mg/m³). Z hlediska tuhých poléťavých částic káva spadá do kategorie nejšetrnějších biopaliv. To se nezmění ani s příchodem nové normy Ekodesign, protože limitní hodnota TZL zůstane stejná.

9.3 VYHODNOCENÍ

Z výsledků je na první pohled patrné, že pelety ze dřeva při hoření produkují méně emisí než pelety z kávy. To může být způsobeno dvěma hlavními důvody. První z nich je, že kotel použitý pro spalování není dimenzovaný na typ biomasy, jakou je kávová sedlina. Vzhledem k vysokým výstupním teplotám spalin a vysokým hodnotám CO by bylo vhodné zvolit pro spalování jiný kotel, popřípadě na kotli udělat pár konstrukčních změn. A to zejména změny konstrukce spalovací komory a výměníků tepla. Dále by také bylo třeba upravit přívod primárního a sekundárního vzduchu. Další možné vysvětlení je to, že se pelety z kávové sedliny chovají jinak než pelety ze dřeva. Zatím co dřevěné pelety mají při spalování tendenci expandovat a rozpadat se, pelety z kávové sedliny mají tendenci zůstat strukturované. Tato vlastnost může souviset s jejich vyšší hustotou. To má za následek, že se při spalování k palivu hůře dostává kyslík a tak vznikají vyšší emise CO. Možným řešením je vytvoření delších a tenčích peletek než byly stávající na palivovou zkoušku.

S vyššími hodnotami NO ve spalinách kávové sedliny souvisí vyšší obsah dusíku v počáteční biomase. Zajímavé také bylo, že produkce NO není až tak vysoká, jak se původně dalo očekávat na základě prvkového rozboru, kdy bylo zjištěno, že v kávové sedlině je 2,69% dusíku zatímco u dřeva to je přibližně o řád méně. Zároveň bylo vyvrácen původní předpoklad, že smícháním kávové sedliny ze dřevem bude mít markantní vliv na produkci NO.

Účinnosti udávanou výrobcem 92% jsme nedosáhli. To mohlo být zapříčiněno nepřesným odladěním kotle, kdy jsme nedosáhli optimálního množství vzduchu regulovaného škrticí klapkou. Další důvod může být, že jsme prováděli měření přímou metodou, která většinou vychází nižší než metoda nepřímá. Výrobce pak do parametrů daného spalovacího zařízení udává jakýsi průměr přímé a nepřímé účinnosti. I tak účinnost byla velmi uspokojivá. Nejvyšší účinnost vyšla u kávové sedliny (88,29%). Naopak nejnižší byla u dřeva (83,81%). Pro kontrolu byla orientačně stanovena účinnost také nepřímou metodou za pomoci softwaru. Hodnoty navzájem korespondovaly s rozdílem do 6%.

Cílem tohoto měření bylo zjištění potenciálu kávové sedliny jakožto alternativního paliva. Výsledky ukázaly, že peletky z kávové sedliny jde efektivně spalovat a to i s velmi příznivou účinností. Nepříznivým aspektem je však vyšší hodnota emisí CO, NO a TZL než u dřeva. I tak paliva dle normy ČSN EN 303/5 spadají do 4. kategorie z pohledu CO a 5. z pohledu TZL. Při hodnocení emisí musíme vzít v potaz, že kotel VERNER A251 spadá do emisní

třídy 3. Nejedná se tedy o příliš ekologický kotel. Vhodným opatřením, které by vedlo ke snížení emisí CO, je vytvoření delších a tenčích peletek než byly stávající na palivovou zkoušku. Jako ideální z pohledu emisí se jeví směs 50/50 % kávová sedlina/dřevo. Tato alternativa by mohla být vhodným řešením i bez zásadních úprav kotle a mohla by splňovat emisní normy.

10 EKONOMIKA

V následující kapitole se budu věnovat základní finanční stránce sběru, výroby a distribuce kávových pelet. Ekonomická rozvaha je nezbytná pro zvážení převedení projektu do reality. Již teď lze říct, že životaschopnost celého nápadu s kávovou sedlinou se bude odvíjet od kolekce, sušení a přepracování daného materiálu na palivo a s tím spojenými náklady. Celý proces lze pak rozdělit do 5 základních sektorů:



Obr. 45: Schéma procesu

SBĚR – Jelikož se jedná o surovinu, která v současné době není ve velké míře využívána a běžně končí v koši či specializovaných kontejnerech na bioodpad, lze předpokládat, že by se dala získávat zadarmo, popřípadě si nechávat za odvoz platit částku nižší, než je její cena za odvoz, jakožto odpadu. Z pohledu nákladů by bylo ideální spojit síly s již zavedenou firmou, která se odpadem zabývá a která by měla zájem se na projektu podílet. Tím bychom se mohli dostat na velmi zajímavou částku za svoz.

SUŠENÍ – Z ekonomických důvodů by bylo vhodné zvolit pasivní formu sušení. Odpadly by tak nemalé pořizovací a provozní náklady. Během experimentální části bylo zjištěno, že kávová sedlina k tomuhle typu sušení má díky své vysoké jemnosti předpoklady. Hlavní problém s tímto spojeny se tak bude týkat především získáním vhodných a dostatečně velkých prostor.

PELETOVÁNÍ – Hlavním bodem týkající se peletování je pořízení vhodného peletovacího lisu. S tím jsou spojené pořizovací a provozní náklady odvíjející se od jeho velikosti. V případě peletování pouze kávové sedliny respektive kávové sedliny namíchané půl na půl se dřevem je vhodné vzhledem k množství materiálu pořídit lis s nižší kapacitou.

BALENÍ A DISTRIBUCE – Balení a distribuce by se konkrétněji řešilo v případě vytvoření komplexního business plánu. Balení by vypadalo řádově stejně jako pro klasické pelety z dřevní biomasy. Distribuce a prodej by se soustředila na rozšíření produktu do povědomí. Byla by zde snaha vyčnívat mezi ostatními produkty různým cílením. Například kampaň zaměřená na Vánoce. Kávové pelety při spalování v krbu mají příjemné kávové aroma, což se dá řadit mezi klady.

10.1 POŘIZOVACÍ NÁKLADY

V případě, že by se nepodařila uzavřít spolupráce s již zavedenou firmou zabývající se svozem odpadu, by se sběr realizoval za pomoci užitkového automobilu. Při předběžném prozkoumání trhu by byl volen vůz Dacia Dokker Van 1,6 SCe 75 kW/102 k. Průměrná spotřeba udávána výrobcem je 6,2 l/100 km. Cena daného modelu je 226 149 Kč včetně DPH. Z důvodů snížení počáteční investice je zde možnost si daný tip vozidla koupit na splátky při akontaci 79 152 Kč. Při měsíční splátce 3997 Kč po dobu 48 měsíců pak finální částka včetně zahrnutí úroku činí 325 209 Kč. Výhodou také je, že v ceně je zahrnuto povinné ručení a havarijní pojištění.

Vzhledem k povaze daného projektu by bylo ideální sušící a výrobní prostory zakoupit. Při prohledávání nabídek – kdy bylo požadavkem prostor o velikosti od 200 do 400 m² situovaný nejlépe v oblasti Brno-město respektive Brno-venkov a s dispozicemi vhodnými pro sušení, peletování a následnou distribuci – bylo zjištěno, že cena se pohybuje v rozmezí 2 000 000 až 3 000 000 korun (pro další kalkulacích zvolena hodnota 2,8 miliónu korun). Další investice by byla potřeba na vyrobení sušících sít. Vzhledem k předchozím zkušenostem při experimentálním sušení by se tato částka mohla pohybovat okolo 15 000 Kč za předpokladu nakoupení materiálu z velkoskladu a svépomocné instalaci.

Pro základní kalkulaci potencionálního množství materiálu na výrobu paliva byl pro peletování zvolen lis PM-200 distribuovaný na českém trhu společností Cronimo. Tento lis o efektivitě 150 až 200 kg/h, výkonu motoru 7 kW a výrobním průměru pelet 3-6 mm stojí 44 990 Kč včetně DPH. Cena lisovací nové lisovací matrice vychází na 2700 Kč. Přibližně dalších 5000 by stálo její předělání pro naše účely. Z hlediska balení a distribuce se dá očekávat, že pořizovací náklady se budou pohybovat okolo 10 000 korun.

10.2 PENĚŽNÍ TOK

Pro získání kávové sedliny bylo osloveno 19 kaváren a to převážně ve velkých nákupních centrech. Většina z nichjevila zájem o spolupráci. Nakonec byly vybrány 3 provozovny, které svou lokací a produkcí kávového odpadu nejvíce vyhovovaly. Sběr probíhal každé 2 až 3 dny. Z první provozovny bylo v průměru za den získáno 12 kg kávové sedliny o vlhkosti 52% (při vysušení na potřeby peletování přibližně 7,2 kg), z druhé 10 kg kávové sedliny o vlhkosti 56% (při vysušení na potřeby peletování přibližně 6,6 kg) a z třetí provozovny 9 kg kávové sedliny o vlhkosti 46% (při vysušení na potřeby peletování přibližně 5,9 kg). Průměrně jsme tedy získali z jedné provozovny 6,57 kg kávové sedliny vysušené na potřeby peletování za den. Vezmeme-li v potaz, že sběr probíhal v zimních měsících, kdy je spotřeba kávy vyšší a zároveň že byly vybrány více frekventované provozovny, průměrná hodnota produkce kávy o odpovídající vlhkosti na peletování je stanovena na 3 kg.

Z důvodů efektivity svozu by byl sběr kávové sedliny orientován především na velká nákupní centra a centrum města, kde se nachází více zdrojů na jednom místě. Při prozkoumání situace v Brně bylo odhadnuto, že bychom mohli teoreticky spolupracovat s 64 provozovnami (8x NC Královo pole, 6x OC Velký špalíček, 11x Galerie Vaňkovka, 14x Olympie, 4x Futurum, 6x Avion shopping park, 10x Kampus Square a okolí, 14x centrum města). Pro lepší přesvědčení o spolupráci by bylo potřeba projekt zmedializovat a dostat se do povědomí jako brand razící ekologické smýšlení. Za předpokladu, že by se nám podařilo získat 64 provozoven, by denní zisk materiálu vhodného k peletování činil 192 kg (5,76 tun/měsíc). Nejlepší variantou z hlediska spalování a i z hlediska ekonomiky by bylo kávou sedlinu míchat v poměru půl na půl se dřevem. Náklady na pořízení jedné tuny odpadních pilin se dosti liší. Na základě průzkumu budu uvažovat částku 1 000 Kč za 1 tunu pilin a to včetně dopravy. Denně bychom tak byli schopni vyprodukovat 384 kg peletek (11,52 tun/měsíc). Při ceně 5550 Kč za tunu bez DPH bychom byli schopni dosáhnout denního obrátu 2130 Kč (63 936 Kč/měsíc).

Při sběru kávové sedliny by auto najelo zhruba 150 km. Při průměrné spotřebě 6,2 l/100 km a ceně benzínu 27,3 Kč/l by náklady za jeden sběr činily 254 Kč. Při množství peletovatelného materiálu 384 kg/den (11,52 tun/měsíc) a efektivitě lisu 200 kg/hod by lis byl vchodu 57,6 hodin měsíčně. Spotřeboval by tak 403 kWh za měsíc. Při ceně 4,83 za kWh by tak provoz lisu měsíčně vyšel na 1948 Kč. Dalším výdejem by byly náklady na energie a vodu

a to v předpokládání výši 4000 Kč/měsíc. Náklady na zaměstnance 25 000 Kč/měsíc. Předpokládáme také další vedlejší výdaje ve výši 3000 Kč.

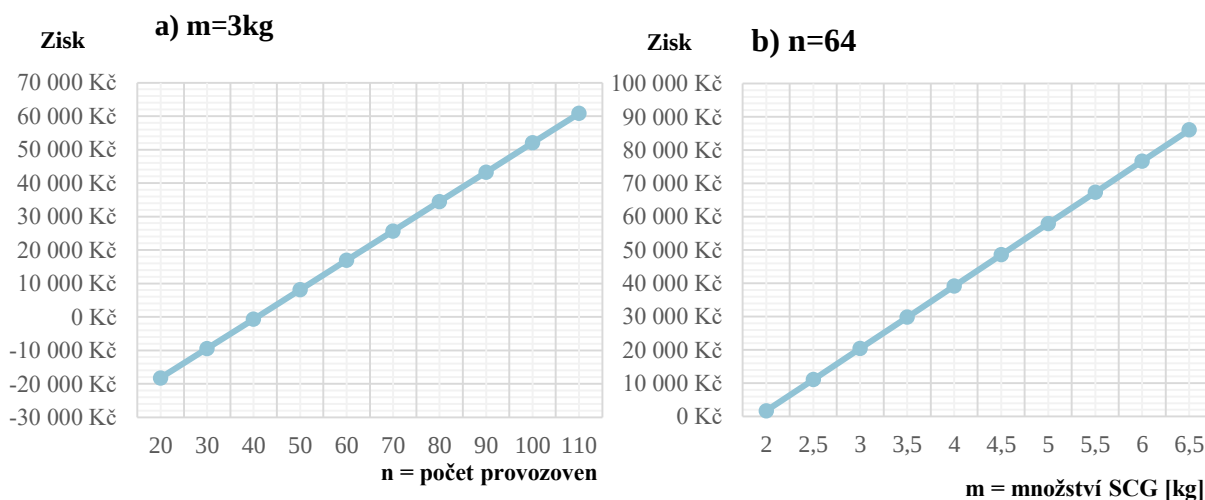
10.3 ZHODNOCENÍ

Všechny náklady a peněžní toky byly zahrnuty do následující tabulky:

Pořizovací náklady	Položka	Cena (včetně DPH)
Sběr	Auto	226 149,00 Kč
	Kontejnery na sběr	70 000,00 Kč
	Prostor	2 800 000,00 Kč
Sušení	Materiál, nářadí, ostatní	15 000,00 Kč
	Peletovací lis	44 990,00 Kč
Peletování	Koupě a následovná úprava lisovací matrice	7 700,00 Kč
	Obaly, nářadí, ostatní	10 000,00 Kč
Balení + Distribuce		
Celkové pořizovací náklady		3 173 839,00 Kč
Peněžní tok (za měsíc)		
Obrat z prodeje pelet (cena 5550 Kč/tuna bez DPH)		63 936,00 Kč
Pohonné hmoty pro svoz		3 810,00 Kč
Piliny (cena 1000 Kč/tuna s DPH)		5 760,00 Kč
Peletování		1 948,00 Kč
Energie + voda		4 000,00 Kč
Další výdaje (kancelářské potřeby, nářadí, atd.)		3 000,00 Kč
Náklady na zaměstnance		25 000,00 Kč
Součet všech provozních nákladů		43 518,00 Kč
Zisk		20 418,00 Kč
Zisk (za rok)		245 016,00 Kč

Tab. 17: Finanční analýza projektu

Pro lepší porovnání závislosti zisku (za měsíc) na množství provozoven a množství kávy z jedné provozovny byly vytvořeny citlivostní analýzy. Zisk v závislosti na počtu provozoven byl stanoven pro množství 3 kg kávové sedliny z jedné provozovny (Obr. 46, a) a zisk v závislosti na množství kávové sedliny byl stanoven pro 64 provozoven (Obr. 46, b).



Obr. 46: Citlivostní analýza

Na základě předběžné finanční analýzy potenciálu peletek vyráběných z kávové sedliny (směs 50na50 dřevo/káva) lze konstatovat, že převedení tohoto projektu do praxe není příliš finančně zajímavé. Návratnost projektu při současné situaci je okolo 13 let. Navíc se dá také předpokládat, že po tuhle dobu by byly vyžadovány určitě nějaké investice do oprav peletovacího lisu a do automobilu. Tím by se návratnost projekt ještě prodloužila.

Situaci by výrazně mohla změnit dotace poskytovaná Českou republikou nebo EU. V současné době je možnost čerpat dotace na obnovitelné zdroje energie. Cílem programu Obnovitelné zdroje energie je podpora využívání alternativních zdrojů. Program disponuje rozpočtem 1,5 mld. korun a je součástí Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost (OPPIK). Pro malý podnik (do 49 zaměstnanců) je možno čerpat až 80% výdajů a to do výše ceny projektu až 100 miliónů korun. Další možností je projekt Inovace, který udává pro malý podnik výši dotace až 45% výdajů a to do výše ceny projektu až 200 miliónů korun.

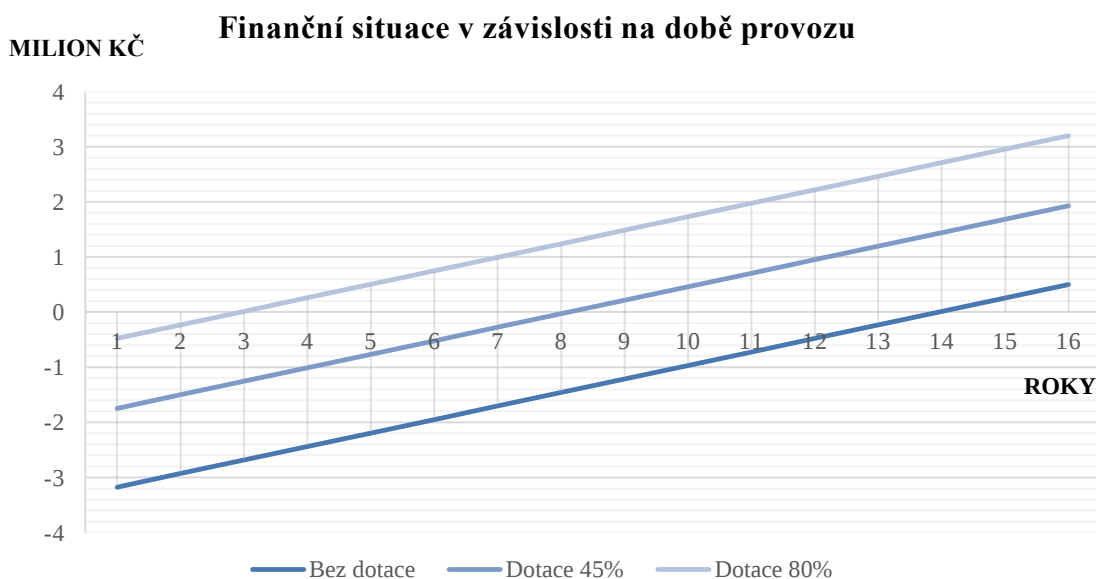
Pro porovnání byla vypočítána návratnost projektu bez dotace, s dotací 45% a 80%.

$$TN_p = \frac{IN}{CF} \quad (10)$$

kde: TN_p – doba návratnosti [rok]; IN – náklady na investice [Kč]; CF – tok peněz [Kč/rok];

	Bez dotace	Dotace 45%	Dotace 80%
Výše dotace	-	1 428 228,00 Kč	2 697 763,00 Kč
Bod zvratu	13,95 roku	8,12 roku	2,94 roku
Rok	Finanční situace v daném roce		
0	-3 173 839,00 Kč	-1 745 611,00 Kč	-476 076,00 Kč
1	-2 928 823,00 Kč	-1 500 595,00 Kč	-231 060,00 Kč
2	-2 683 807,00 Kč	-1 255 579,00 Kč	13 956,00 Kč
3	-2 438 791,00 Kč	-1 010 563,00 Kč	258 972,00 Kč
4	-2 193 775,00 Kč	-765 547,00 Kč	503 988,00 Kč
5	-1 948 759,00 Kč	-520 531,00 Kč	749 004,00 Kč
6	-1 703 743,00 Kč	-275 515,00 Kč	994 020,00 Kč
7	-1 458 727,00 Kč	-30 499,00 Kč	1 239 036,00 Kč
8	-1 213 711,00 Kč	214 517,00 Kč	1 484 052,00 Kč
9	-968 695,00 Kč	459 533,00 Kč	1 729 068,00 Kč
10	-723 679,00 Kč	704 549,00 Kč	1 974 084,00 Kč
11	-478 663,00 Kč	949 565,00 Kč	2 219 100,00 Kč
12	-233 647,00 Kč	1 194 581,00 Kč	2 464 116,00 Kč
13	11 369,00 Kč	1 439 597,00 Kč	2 709 132,00 Kč
14	256 385,00 Kč	1 684 613,00 Kč	2 954 148,00 Kč
15	501 401,00 Kč	1 929 629,00 Kč	3 199 164,00 Kč

Tab. 18: Návratnost projektu



Obr. 47: Graf finanční situace v závislosti na době provozu

Při získání dotace 80% se projekt jeví už z finančního hlediska mnohem zajímavěji. I tak při zvážení dalších možných komplikací se jedná spíše o rizikovou investici. Z tohoto hlediska je převedení projektu do praxe jeví značně komplikované. Možnou alternativou je pořízení výkonnějšího lisu a kromě peletování kávové sedliny se zabývat peletováním dřeva a dalších druhů biomasy.

Další možností by bylo soustředit se na velké pražírny kávy. Při jednání s jednou nejmenovanou značkou sídlící v Německu, bylo zjištěno, že ve své pražírně v Hamburku produkují řádově 300 až 400 tun kávového odpadu měsíčně. V současné době tento odpad není ve větší míře využíván. Zároveň pro pražení a ostatní technologické procesy je potřeba poměrně velké množství tepla. Bylo by tak velmi výhodné kávový odpad energeticky zhodnotit přímo v místě produkce.

11 ZÁVĚR

Cílem mé diplomové práce bylo vypracovat komplexní studii na téma energetického využití kávového odpadu. Práce je rozdělena do dvou základních částí. První část se skládá z rešerše zaměřené na biomasu jako takovou, emise vznikající při spalování biomasy a na vlastnosti paliv. Druhá část se skládá z experimentální analýzy, kdy byly provedeny kompletní palivové rozbor, TGA analýzy, experimentální sušení, peletování a spalovací zkoušky. Celá práce je pak zakončena základní ekonomickou rozvahou. Pro přehlednost a ucelenost byla všechna zjištěná data z celé práce vložena do následující tabulky:

Vlhkost sesbírané kávové sedliny	1. zdroj		2. zdroj	3. zdroj	průměr			
	[%]	54	56	46	52			
Výhřevnost kávové sedliny při dané vlhkosti	Vlhkost	W ^r =10%	W ^r =20%	W ^r =30%	sušina			
	[MJ/kg]	19,861	17,649	15,437	22,073			
Průměrná popelovina kávové sedliny	[%]	1,468529975						
Charakteristické teploty popela kávové sedliny		deformace	měknutí	tání	ustálenost			
	[°C]	725	825	1195	1350			
Prvkový rozbor kávové sedliny		voda	popel	hořlavina	uhlík			
	[%hm.]	3,76	1,47	94,78	53,77			
		vodík	dusík	síra	kyslík			
	[%hm.]	7,16	0,14	0,14	34,79			
Spalné teplo z prvkového rozboru	Vlhkost	W ^r =3,76 %	sušina	hořlavina				
	[MJ/kg]	22,834	23,725	24,093				
	Výhřevnost z prvkového rozboru	[MJ/kg]	21,264	22,190	22,533			
Chemické složení kávové sedliny		Celulóza	Hemicelulóza	Proteiny	Olej			
	[%]	8,6-13,3	30,0-40,0	6,7-13,6	10,0-20,0			
		Lignin	Polyfenol	Kofein				
	[%]	33,6	2,5	0,02				
Parametry paliva před spalovací zkouškou (výhřevnost peletek při dané vlhkosti)		Dřevo	50na50	25na75	Káva			
	Vlhkost	W ^r =7,12%	W ^r =8,6%	W ^r =8,6 %	W ^r =8,54%			
	[MJ/kg]	17,045	18,268	19,46	20,141			
Spalovací zkouška								
Typ paliva	NO [mg/m³]	CO [mg/m³]	O2 [%]	NO ^{referenční} [mg/ m _n ³]	CO ^{referenční} [mg/ m _n ³]	Teplota spalin [°C]	Výhřevnost paliva [MJ/kg]	Spotřeba paliva [kg/hod]
Dřevo	413,04	48,73	7,89	346,49	40,88	202,72	17,05	6,83
50na50	549,77	835,87	7,71	455,11	691,95	214,39	18,27	6,32
25na75	656,00	746,16	9,20	611,73	695,81	222,59	19,46	5,89
Káva	625,88	1122,37	8,03	530,89	952,04	245,80	20,14	5,64
Typ paliva	Výkon [kW]	Účinnost [%]	TZL Provozní pod. C [mg/m³]		TZL Suché pod. CN [mg/m³]	TZL Vlhké pod. CSN [mg/m³]	TZL Referenční pod. [mg/ m _n ³]	
Dřevo	27,10	83,81	3,4 ± 0,6		5,9 ± 1,1	10,1 ± 1,6	8,5 ± 1,3	
50na50	27,35	85,26	8,3 ± 1,1		14,8 ± 1,9	28,3 ± 2,1	23,3 ± 1,8	
25na75	25,77	79,63	9,8 ± 1,2		17,6 ± 2,2	36,4 ± 2,4	33,9 ± 2,2	
Káva	27,85	88,29	9,9 ± 0,8		18,9 ± 1,5	25,8 ± 1,5	23,8 ± 1,4	

Tab. 19: Souhrnné informace

Bylo zjištěno, že kávová sedlina má potenciál jakožto palivo. Dosahuje příznivé výhřevnosti okolo 20 MJ/kg. Díky své poměrně vysoké jemnosti se dá dobře pasivně sušit a následovně při přizpůsobení peletovacího lisu peletovat. Při spalovacích zkouškách bylo zjištěno, že nejvhodnější variantou z hlediska emisí a účinnosti by bylo kávou sedlinu míchat půl na půl se dřevem. Tím bychom dosáhli nižší produkce emisí než při spalování samotné kávové sedliny a zároveň bychom se více přiblížili unifikovaným vlastnostem dřevní biomasy. Lze také konstatovat, že by bylo vhodné lisovat pelety o menších rozměrech. Pelety z kávové sedliny se totiž chovají jinak než pelety ze dřeva. Zatím co dřevěné pelety mají při spalování tendenci expandovat a rozpadat se, pelety z kávové sedliny zůstávají spíše strukturované. To má za následek, že se při spalování k palivu hůře dostává kyslík a tak vznikají vyšší emise CO.

Po technologické stránce je energetické využívání kávy (kávové sedliny) poměrně dobře realizovatelné. Po ekonomické stránce nám však vyvstávají komplikace. Při zhodnocení počátečních investic, provozních nákladů a potencionálních zisků se jedná spíše o rizikovou investici. Tento problém by mohla částečně vyřešit dotace poskytovaná Českou republikou nebo EU. Možnou alternativou by mohlo být pořízení výkonnějšího lisu a kromě peletování kávové sedliny se zabývat peletováním dřeva a ostatních druhů biomasy. Další možností by bylo zaměřit se na velké pražírny kávy, které produkují vyšší množství materiálu na jednom místě. Při jednání s jednou nejmenovanou značkou působící v kávovém průmyslu sídlící v Německu, bylo zjištěno, že ve své pražírně produkuje řádově stovky tun tohoto typu odpadu měsíčně. Pro pražení a ostatní technologické procesy je potřeba poměrně velké množství tepla. Bylo by tak velmi výhodné kávový odpad energeticky zhodnotit přímo v místě produkce.

ZDROJE

- [1] Sciencedirect –ZUORRO Antonio, LAVECCHIA Roberto. Spent coffee grounds as a valuable source of phenolic compounds and bioenergy. [Online]. [Citace: 14.prosinec.2015]. Dostupné z WWW: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611005117> >
- [2] Sciencedirect – AL-HAMAMREA Zayed, FOERSTERB Sascha, HARTMANNB Franziska, KÖGERB Michael, KALTSCHMITT Martin. Oil extracted from spent coffee grounds as a renewable source for fatty acid methyl ester manufacturing. [Online]. [Citace: 14.prosinec.2015]. Dostupné z WWW: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236112000464> >
- [3] OCHODEK Tadeáš, KOLONIČNÝ Jan a JANÁSEK Pavel. Potenciál biomasy, druhy, bilance a vlastnosti paliv z biomasy: studie v rámci projektu Možnosti lokálního vytápění a výroby elektřiny z biomasy. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006, 185 s. ISBN 80-248-1207-X.
- [4] Portál EU VUT – HRDLIČKA Jan, KOUTSKÝ Bohumil, HRDLIČKA František. Problematika tvorby persistentních organický látek při spalování biomasy. [Online]. [Citace: 17.prosinec.2015]. Dostupné z WWW: < http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/246_1_1/ >
- [5] Transformační technologie – technický web. [Online]. [Citace: 21.prosinec.2015]. Dostupné z WWW: < <http://www.transformacni-technologie.cz/biomasa-jako-zdroj-energie.html> >
- [6] Portál EU VUT – BALÁŠ, M., ŠEN H.: Negativní vlivy energetického využití biomasy - emise, Energie biomasy, sborník přednášek, Brno, 2006 [Online]. [Citace: 26.prosinec.2015]. Dostupné z WWW: < http://www.eu.fme.vutbr.cz/file/199_1_1/ >
- [7] Sciencedirect – JEGUIRIM M., LIMOUSY L., DUTOURNIE P. Pyrolysis kinetics and physicochemical properties of agropellets produced from spent ground coffee blended with conventional biomass. [Online]. [Citace: 2.únor.2016]. Dostupné z WWW: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263876214001944> >
- [8] Studie v rámci MATERIALS RESEARCH CENTRE – OBRUČA Stanislav, BENEŠOVÁ Pavla, PETRIK Siniša, KUČERA Dan, MÁROVÁ Ivana. Biotechnological conversion of spent coffee grounds into polyhydroxyalkanoates. Faculty of Chemistry, Brno University of Technology, Czech Republic
- [9] Portál ČVUT – GRDZELIŠVILI Gulnara, HOFFMAN Pavel. Sušení rostlinných materiálů. [Online]. [Citace: 12.únor.2016]. Dostupné z WWW: < <http://chps.fsid.cvut.cz/pt2010/pdf/GrdzelisviliGulnara.pdf> >
- [10] ŠESTÁK, Jiří a Rudolf ŽITNÝ. Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006c1997, 165 s. ISBN 80-01-03475-5.

- [11] MATÚŠ, Miloš; KRIŽAN, Peter. Technológia zhutňovania biomasy do nového tvaru biopaliva. In Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy IX“. VUT v Brně, 2008. ISBN 978-80-214-3803-3.
- [12] KRIŽAN, Peter; MATÚŠ, Miloš. Dôležitosť druhu lisovaného materiálu pri briketovaní a peletovaní. In Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy X“. VUT v Brně, 2009. ISBN 978-80-214-4027-2.
- [13] KRIŽAN, Peter; MATÚŠ, Miloš. Význam a vplyv vlhkosti materiálu a veľkosti frakcie v procese zhutňovania. In Sborník příspěvků ze semináře „Energie z biomasy IX“. VUT v Brně, 2008. ISBN 978-80-214-3803-3.
- [14] Návod na obsluhu lisu KAHL 33-390/500. 113s., č. z.78794/2012
- [15] Návod na obsluhu a instalaci automatického kotle VERNER A251, 44s. ,č.v. b026.66200.010311, vydáno 01.03.2011
- [16] ČSN EN 303-5: Kotle pro ústřední vytápění – Část 5: Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW – Terminologie, požadavky, zkoušení a značení, TZ: 075303. Praha, ČSN, 2013.

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1: KÁVOVÁ SEDLINA NA VÝSTUPU Z KÁVOVARU	11
OBR. 2: FOTOSYNTÉZA [5].....	13
OBR. 3: GRAF ZÁVISLOST VÝHŘEVNOSTI BIOMASY NA OBSAHU VODY [3].....	19
OBR. 4: GRAF ZÁVISLOSTI OBSAHU POPELA VE DŘEVĚ A KŮŘE NA VLHKOSTI PALIVA [3]	21
OBR. 5: PŘÍSTROJ KERN MLS	25
OBR. 6: KALORIMETR IKA C 200.....	26
OBR. 8: VYLISOVANÝ VZOREK PALIVA	26
OBR. 7: PRACOVNÍ PLOCHA PŘI MĚŘENÍ.....	26
OBR. 9: BAVLNĚNÉ ZÁPALNÉ VLÁKNO VISÍCÍ DO NEREZOVÉHO KELÍMKU	27
OBR. 10: SESTAVENÁ ARMATURA.....	27
OBR. 11: GRAF VÝHŘEVNOSTI KÁVOVÉ SEDLINY.....	27
OBR. 12: SPALOVACÍ PECE VEB ELEKTRO	28
OBR. 13: DIGITÁLNÍ VÁHY EXPLORE PRO EP 114C	29
OBR. 14: POHLED DO SPALOVACÍ PECE VEB ELEKTRO	29
OBR. 15: SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ TAVENÍ POKUSNÉHO VÁLEČKU POPELE DLE NORMY	29
OBR. 16: VYLISOVANÝ ZKUŠEBNÍ VZOREK	30
OBR. 18: ZKUŠEBNÍ VZOREK PO MĚŘENÍ.....	30
OBR. 17: ZKUŠEBNÍ VZOREK PŘED MĚŘENÍM	30
OBR. 19: MĚŘÍCÍ APARATURA BĚHEM ZKOUŠKY.....	31
OBR. 20: PRŮBĚH MĚŘENÍ:	32
OBR. 21: PŘÍSTROJ CHNOS VARIO MACRO CUBE.....	33
OBR. 22: A, B) ZKUŠEBNÍ VZORKY PŘED MĚŘENÍM; C, D) ZKUŠEBNÍ VZORKY PO MĚŘENÍ	35
OBR. 23: NETZSCH STA-449 F3 JUPITER F3	35
OBR. 24: GRAF TGA 1	36
OBR. 25: ZKUŠEBNÍ VZOREK PO TGA ANALÝZE	36
OBR. 26: GRAF TGA 2	37
OBR. 27: GRAF TGA 3	37
OBR. 28: KINEMATIKA SUŠENÍ [9]	38
OBR. 29: PRŮBĚH SUŠENÍ.....	40
OBR. 30: VÝKRES A MODEL PELETOVACÍHO LISU KAHL 33-390/500 [14].....	42
OBR. 31: SCHÉMA PELETOVACÍHO ZAŘÍZENÍ [14]	43
OBR. 32: PELETOVACÍ ZAŘÍZENÍ KAHL 33-390/500	43
OBR. 33: VÝSLEDNÉ PELETKY	44
OBR. 34: SCHÉMA MĚŘÍCÍHO OKRUHU	45
OBR. 35: NAMODELOVANÉ ROZHRAŇÍ MĚŘENÍ V LABWIEW BĚHEM ZKOUŠKY	46
OBR. 36: ZAŘÍZENÍ BĚHEM MĚŘENÍ	47
OBR. 37: GRAF ZNÁZORNŮJÍCÍ PRŮBĚHU MĚŘENÍ	48
OBR. 38: GRAF USTÁLENÉHO MĚŘENÍ – DŘEVĚNÉ PELETY	49
OBR. 39: GRAF USTÁLENÉHO MĚŘENÍ – PELETY SMĚS 50NA50	49
OBR. 40: GRAF USTÁLENÉHO MĚŘENÍ – PELETY SMĚS 25NA75.....	50
OBR. 41: GRAF USTÁLENÉHO MĚŘENÍ – PELETY Z KÁVY.....	50
OBR. 42: GRAF VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ – REFERENČNÍ HODNOTY NO	50
OBR. 43: GRAF VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ – REFERENČNÍ HODNOTY CO.....	51
OBR. 44: FILTRY PO MĚŘENÍ POLÉTAVÝCH ČÁSTIC	53
OBR. 45: SCHÉMA PROCESU.....	56
OBR. 46: CITLIVOSTNÍ ANALÝZA	58
OBR. 47: GRAF FINANČNÍ SITUACE V ZÁVISLOSTI NA DOBĚ	60

SEZNAM TABULEK

TAB. 1: CHARAKTERISTICKÁ VLHKOST DRUHŮ BIOMASY [3].....	19
TAB. 2: PŘEPOČET ENERGETICKÉ A DŘEVAŘSKÉ VLHKOSTI [3].....	20
TAB. 3: VÝHŘEVNOST BIOMASY PŘI DANÉ VLHKOSTI [3].....	21
TAB. 4: OBSAH POPELA U VYBRANÝCH TYPŮ BIOMASY [3].....	22
TAB. 5: ORIENTAČNÍ VLASTNOSTI A SLOŽENÍ HOŘLAVIN VYBRANÝCH DRUHŮ PALIVA [3]	23
TAB. 6: OBJEMOVÉ JEDNOTKY [3]	23
TAB. 7: PŘEPOČET OBJEMOVÝCH JEDNOTEK [3]	24
TAB. 7: POPELOVINA KÁVOVÉ SEDLINY	28
TAB. 8: PRVKOVÝ ROZBOR KÁVOVÉ SEDLINY	33
TAB. 9: DOPROVODNÉ HODNOTY K PALIVOVÉMU ROZBORU	33
TAB. 10: CHEMICKÉ SLOŽENÍ SCG [8]	34
TAB. 11: VYBRANÉ TECHNICKÉ ÚDAJE KOTLE VERNER A251 [15]	46
TAB. 12: PARAMETRY PALIVA PŘED SPALOVÁNÍM	48
TAB. 13: PŘEHLED PRŮMĚRNÝCH HODNOT Z USTÁLENÉHO MĚŘENÍ	51
TAB. 14: VÝŇATEK Z NORMY ČSN EN 303/5 - MEZNÍ HODNOTY EMISÍ [17].....	52
TAB. 15: PŘEHLED DOPOČÍTANÝCH HODNOT Z USTÁLENÉHO MĚŘENÍ	53
TAB. 16: VÝSLEDKY MĚŘENÍ TZL	54
TAB. 17: FINANČNÍ ANALÝZA PROJEKTU	58
TAB. 18: NÁVRATNOST PROJEKTU	59
TAB. 19: SOUHRNNÉ INFORMACE	61

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ICO	International Coffee Organization	
SCG	Spent coffee grounds	
$C_6H_{12}O_6$	Glukóza	
CFC	Freony	
PCDD	Dibenzodioxiny	
PCDF	Dibenzofurany	
PAH	Aromatické uhlovodíky	
w_{df}	Dřevařská vlhkost	[%]
w_{en}	Energetická vlhkost	[%]
plm	plnometr	[m ³]
prm	prostorový metr	[m ³ p.o.]
pems	prostorový metr sypaný	[m ³]
Q_i^r	Výhřevnosti	[MJ/kg]
Q_s^r	Spalné teplo	[MJ/kg]
LHV_{20}	Výhřevnost	[KJ/Kg]
HHV_h	Spalné teplo	[KJ/Kg]
A^r	Popel	[%hm]
W^r	Zbytková voda	[%hm]
B_p	Hořlavina	[%hm]
TGA	Termogravimetrická analýza	
DH	Odvzdušňovací hrníček	
X_{REF}	Referenční hodnota plynu	[%]
X	Naměřená hodnota	[%; mg/m ³]
$O_{2,REF}$	Referenční hodnota kyslíku	[%]
$\dot{V}$	Průtok vody kotlem	[m ³ /s]
TZL	Tuhé znečišťující částice	
TNp	Doba návratnosti	[rok]
IN	Náklady na investice	[Kč]
CF	Tok peněz	[Kč/rok]