



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

ANALÝZA POPELOVIN Z KRBOVÉ VLOŽKY ANALYSIS OF ASH FROM FIREPLACE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB DRÁPELA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAELA HRNČÍŘOVÁ

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Drápela

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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 bakalářské práce:

Analýza popelovin z krbové vložky

v anglickém jazyce:

Analysis of ash from fireplace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při spalování různých druhů paliv vznikají nespalitelné zbytky. Tyto zbytky se mohou lišit ve velikosti částic v závislosti na použitém druhu paliva.

Cíle bakalářské práce:

Rešeršní zpracování přeměny biomasy na energii.

Popis konkrétní krbové vložky.

Praktické měření velikosti částic popela z krbové vložky.

Budoucnost ve využití odpadů z kotelen na biomasu.

Seznam odborné literatury:

- [1]Rybín,M.:Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích, SNTL Praha 1978
- [2]Budaj,F.:Parní kotle, skripta VUT 1995
- [3]PABST, W., GREGOROVÁ, E. Charakterizace částic a částicových soustav, 2007
- [4] HEMERKA, J.,: Odlučování tuhých částic, Praha: ČVUT, 1994
- [5]Firemní podklady
- [6]Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michaela Hrnčířová

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 20.11.2013

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce má za cíl seznámit čtenáře s velikostní analýzou popelovin z krbové vložky. Práci lze rozdělit na dvě části, přičemž první se věnuje popisu krbových vložek, palivům. Následným procesům při spalování v krbových vložkách a jednotlivým metodám používaných pro velikostní analýzu částic. Druhá část je již zaměřená na praktické měření jednotlivých vzorků popelů a následnému vyhodnocení.

Klíčová slova

popel, částice, paliva, biomasa, krbová vložka

ABSTRACT

This bachelor thesis should familiarize readers with the size of analysis of ashes of fireplace inset. The work is possible to divide into two parts, when the first one is devoted to a description of fireplace insets, fuels and subsequent processes during burning in fireplace insets and to individual methods used for size analysis of particles. The other part is focused on practical measurements of individual samples of ashes and subsequent evaluation.

Key words

ash, particles, fuels, biomass, fireplace

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁPELA, J. *Analýza popelovin z krbové vložky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michaela Hrnčířová.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma **Analýza popelovin z krbové vložky** vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce s použitím svých znalostí a odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu.

V Brně dne 28.5.2014

.....
Jakub Drápela

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucí bakalářské práce Ing. Michaele Hrnčířové za pedagogickou pomoc, rady a čas věnovaný konzultacím při zpracování této práce. Zároveň bych chtěl poděkovat svým rodičům, kteří mi umožnili vystudovat vysokou školu a mé přítelkyni za korektury jazyka a trpělivost.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Krbové vložky.....	12
2.1 Ocelové krbové vložky.....	12
2.2 Litinové krbové vložky	12
2.3 Teplovzdušné krby	13
2.4 Teplovodní krbová vložka.....	14
2.5 Sálavá kamna.....	14
2.6 Krbová vložka s roštem.....	14
2.7 Bezroštová krbová vložka	15
3. Přeměna paliv na energii.....	16
3.1 Paliva používaná v krbové vložce	16
3.2 Možnosti přeměny biomasy na energii	17
3.2.1 Spalování paliva.....	19
3.2.2 Děje při spalování	19
3.2.3 Popelovina a popel.....	21
4. Metody určování velikosti částic	23
4.1 Sítová analýza.....	23
4.2 Sedimentační metoda	24
4.3 Laserová metoda.....	26
4.4 Dynamický rozptyl světla (DLS)	28
5. Praktická část	30
5.1 Použité palivo	30
5.2 Popis krbových vložek	31
5.3 Průběh experimentu a výsledky	32
5.3.1 Akát.....	35
5.3.2 Švestka	36
5.3.3 Buk 1	37
5.3.4 Smrk 1	38
5.3.5 Buk 2.....	39
5.3.6 Smrk 2.....	40

5.4	Zhodnocení výsledků	41
5.5	Budoucnost ve využití popelů z kotelen na biomasu	42
6.	Závěr	43
	Seznam použité literatury:	44
	Seznam použitých internetových zdrojů:	44
	Seznam použitých zkratek a symbolů:	46

1. ÚVOD

Vytápění prostřednictvím krbů a krbových kamen bývá často spojeno s relaxačními pobyty na chatách a chalupách, kde se lze nejčastěji setkat s klasickými otevřenými krby.

Ty zajišťují kontakt s ohněm a plní jednak svoji estetickou funkci, ale pro vytápění nejsou příliš vhodné. Otevřená konstrukce nezachytává vyprodukované teplo hořením, teplo pak uniká ve spalinách komínem a také se vyznačuje vyšší spotřebou paliva. Zvyšováním účinnosti a bezpečnosti se postupným vývojem přešlo na krby uzavřené. V dnešní době jsou nedílnou součástí krbů krbové vložky. Jejich obliba je v současnosti na vzestupu z důvodu právě vysoké efektivity a zajištění tak téměř dokonalého vyhoření paliva, přičemž jeho spotřeba není příliš velká. Dalším důvodem může být vhodné doplnění interiéru domu, protože na trhu je široká nabídka mnoha typů a variant. V moderních domech mohou tvořit část topného systému a nesloužit pouze jako lokální zdroj tepla. Odpadním produktem spalovacího procesu je popel a právě velikostní analýzou popele se budu zabývat v této bakalářské práci. Jako palivo je nejčastěji používáno dřevo, které se vyznačuje obsahem malého množství popelovin.

Jedním z důvodů vybrání tohoto tématu byla jednak právě stoupající obliba krbu s krbovými vložkami a také mé povrchní znalosti o popelu. Téma bych chtěl pojmout komplexně, aby čtenář této práce měl přehled nejen o tvorbě a vlastnostech popele, ale také o krbových vložkách, celém procesu spalování a o vhodných metodách použitelných pro velikostní měření malých částic nacházejících se v popelu. Na tento úsek práce bych rád navázal praktickou částí, kde bych měřil jednotlivé vzorky popelů ze dvou krbových vložek. Prvotní domněnkou, použití dvou krbových vložek s různými účinnostmi, je vliv na velikost částic v popelu. Následné vyhodnocení a závěry by měly potvrdit, či vyvrátit tuto domněnku.

2. KRBOVÉ VLOŽKY

Samotná krbová vložka je často obestavěná různými materiály vhodnými pro stavbu krbu. U těchto materiálů bychom měli dbát na odolnost vůči vysokým teplotám. Nejčastěji to jsou různé typy cihel či keramických obkladů. Složitější a větší obestavbou se vzduchovými nebo spalinovými vnitřními cestami vznikají teplovzdušné, teplovodní krby. Dalším faktorem rozdělení je absence nebo přítomnost roštu. V neposlední řadě je lze rozdělit podle druhu materiálu, který je použit na jejich výrobu. Nejčastěji to je ocel a litina. Účinnost a výkon se liší podle typu, obecně lze říci, že účinnost se pohybuje okolo 70 – 85 %.

2.1 Ocelové krbové vložky

Krbové vložky z žáruvzdorné oceli patří k nejrozšířenějším, a to hlavně z důvodu své nízké ceny. Při výrobě se používají plechy o tloušťkách 3 - 7 mm, které jsou spojovány svařováním. Ocel však musí být na vnitřní straně chráněna žáruvzdorným materiálem, například šamotem. Předností krbové vložky z oceli je vysoká tepelná vodivost, teplo je rychle předáváno do okolí, dobrá odolnost - pružnost vůči teplotním šokům a za pomoci svařování je dosažena velká těsnost celé vložky. Mezi nevýhody patří náchylnost svarových spojů na korozi a tímto i nižší životnost oproti výrobkům z jiných materiálů. [1] [2]



Obr. 1 - Ocelová krbová vložka [21]

2.2 Litinové krbové vložky

Při použití litiny se vložky vyznačují rozmanitými tvary a širokou škálou zdobení. Výrobky z litiny se téměř nedají svařovat, a proto jsou jednotlivé odlité části do sebe šroubovány. Tím je ale významně snížena těsnost. Vložky z šedé litiny, která je nejužívanější, dosahují dlouhé životnosti a jejich součásti se téměř neopotřebovávají. Za výhodu lze považovat akumulaci schopnosti materiálu, teplo je dlouho předáváno i po vyhasnutí ohně. To je ale spojeno s delší dobou nahřívání. Další nevýhodou výrobků z litiny je jejich vyšší cena a váha, křehkost a po delší době užívání možná lomivost.

Z důvodu zvyšování kvality se tyto dva nejpoužívanější materiály často kombinují. Vyměnitelné součásti jsou vyrobeny převážně z litiny, kostra je pak zhotovena z oceli. To má za následek také snížení ceny. [1] [2]

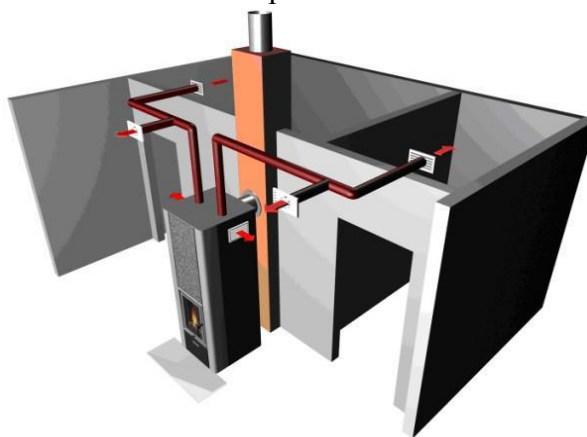
Jako žáruvzdorná hmota se používá u krbových vložek šamot nebo vermikulit. Šamot dobře odolává vysokému žáru (až 1650 °C) a akumuluje teplo. Umožňuje rozkládat teplotu z bodového zatížení na celou plochu a tím snižuje celkové pnutí na materiál. Vermikulit se používá u novějších typů krbových vložek a vyznačuje se nízkou váhou, která usnadňuje manipulaci. Při zahřívání se bez jakéhokoliv poškození rozpíná a zvyšuje tak izolační možnosti. Nevýhodou je o něco nižší akumulace tepla, než má šamot. [1] [8]



Obr. 2 - Litinová krbová vložka [22]

2.3 Teplovzdušné krby

Jádrem teplovzdušných krbů je krbová vložka, která je obestavěná druhým pláštěm. Při stavbě se ponechává 6 - 8 mm mezera. Vznikne tak dutý prostor, do kterého je ze spodu přiveden studený, čerstvý vzduch. Velikost otvorů pro vstup by měly být v rozmezí od 600 do 1000 cm². Proudící vzduch ochlazuje z vnější strany krbovou vložku a sám je v komoře ohříván a vzniká tak přirozený tah. Vychází nahoře otvory zpět do místnosti, nebo je distribuován soustavou teplovzdušných trubek do dalších prostor domu.



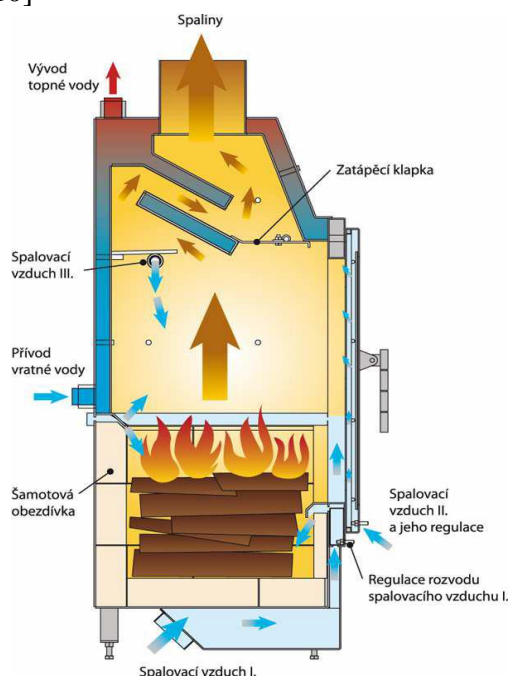
Obr. 3 - Krbová vložka s teplovzdušným rozvodem [9]

Tah může být zvětšen přidáním ventilátoru do vstupního prostoru. Ventilátor je závislý na elektrické energii a při výpadku by se vložka mohla začít přehřívat. Nevýhodou představuje nerovnoměrné vytápění přilehlých místností a různý výškový gradient teploty. Název teplovzdušný krb je odvozen od způsobu předávání tepla. To je realizováno z velké části konvekcí – proudění teplého vzduchu. Malá část tepla se předává sáláním, například skrze dvířka. [1] [9]

Nejčastěji se používá jednostupňová krbová vložka, u které je plocha na vnější straně zvětšena žebrováním. To přispívá k předání tepla do vnitřní části krbu. Někdy se používají vložky, které mají zdvojené stěny. Takovým vložkám se říká dvouplášťové. V tomto vzniklém prostoru dochází k intenzivnímu ohřevu přivedeného vzduchu, ten je pak odváděn k vytápění. Tato vložka dokáže poměrně rychle vytopit celou místnost. [1] [9]

2.4 Teplovodní krbová vložka

V krbové vložce se nachází teplovodní výměník. Je tvořen soustavou trubek, do kterých je přiváděna vratná voda. Část vyprodukovaného tepla z ohniště se přenáší sáláním do okolí a část tepla do výměníku. Ohřátá voda z výměníku může sloužit jako voda do topení nebo jako užitková voda. Nutné je však podotknout, že tento systém se používá jako sekundární, spolu s jiným zdrojem teplé vody. Poměr přeneseného tepla do výměníku závisí na konstrukčním řešení dané vložky. Výměník nesmí být umístěn tak, aby docházelo k přílišnému ochlazování spalin. To by mělo za následek snížení účinnosti, vzniku nízkoteplotní koroze. [1] [10]



Obr. 4 - Krbová vložka s teplovodním výměníkem [9]

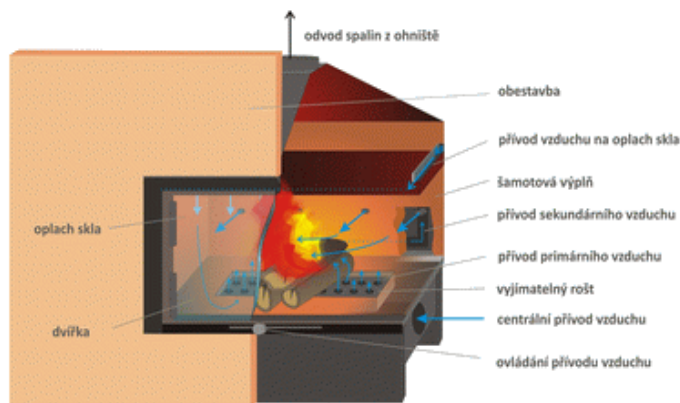
2.5 Sálavá kamna

U předchozích dvou typů sloužila krbová vložka více méně jako výměník, nikoliv však u sálavých kamen. Tepelná energie se akumuluje do jednoplášťové vložky a poté vyzařuje do místnosti. Tímto ohřívá částečně i vzduch. Výhody a nevýhody jsou závislé na typu zvoleného materiálu pro výrobu. Tyto výrobky mají nižší tepelný výkon a jsou tak vhodné jako zdroj tepla v menších prostorách. Například pro chaty. [1] [11]

2.6 Krbová vložka s roštem

Roštová tělesa jsou nejvíce tepelně namáhané části krbové vložky. Proto je kladen důraz na jejich dlouhou životnost a odolnost. Vyrábějí se především z litiny a jsou ochlazovány primárním vzduchem.

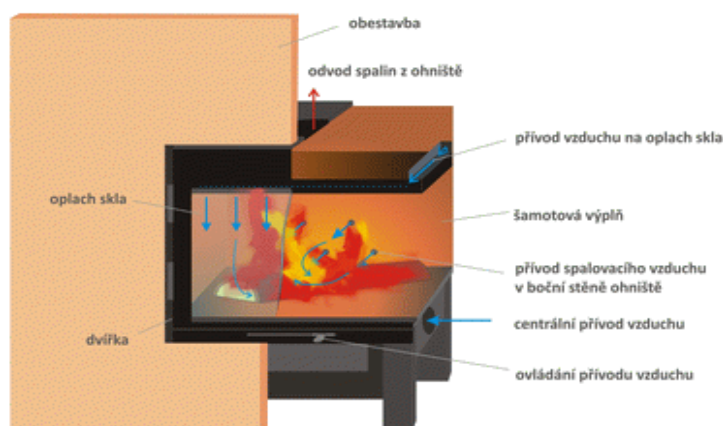
Ten je přiváděn do spalovací komory pomocí otvorů, které se nachází ve spodní části dvířek. Rošt se hlavně používá při spalování paliv, které se vyznačují velkým obsahem popelovin. Dále podpírá kusové palivo a umožňuje vytvoření vrstvy požadované tloušťky a zajišťuje kontinuální odvod tuhých zbytků po spalování do popelníku, který je pod roštem. Spolu s tuhými zbytky odchází i částí paliva, ve kterých je obsažen uhlík - C. Tuto ztrátu nazýváme mechanický nedopal a snižuje účinnost vložky okolo 1 %. [1] [2]



Obr. 5 - Krbová vložka s roštem [23]

2.7 Bezroštová krbová vložka

U bezroštových krbových vložek je přívod primárního vzduchu řešen pomocí otvorů těsně nad dnem, v některých případech na zadní stěně. Je to z důvodu, aby se otvory neucpaly popelem. V mnoha případech je vzduch předehříván, tím nedochází ke snižování teploty v ohništi. Dochází tak k dokonalejšímu spalování. Z důvodu absence roštu nedochází k propadu tuhých zbytků do popelníku a tím je snížena ztráta mechanickým nedopalem. Nespálené uhlíky zůstávají v ohništi a slouží tak jako iniciátor dalšího hoření. Jsou opětovně spalovány, a tak dochází k vyhoření téměř veškerého množství hořlaviny obsažené v palivu. S použitím bezroštových krbových vložek se často říká, že jde o tzv. bezodpadová hospodářství. Avšak vždy nějaké množství popele vznikne. Lze jej ale ovlivnit kvalitou a vysušením použitého paliva. [1] [2]

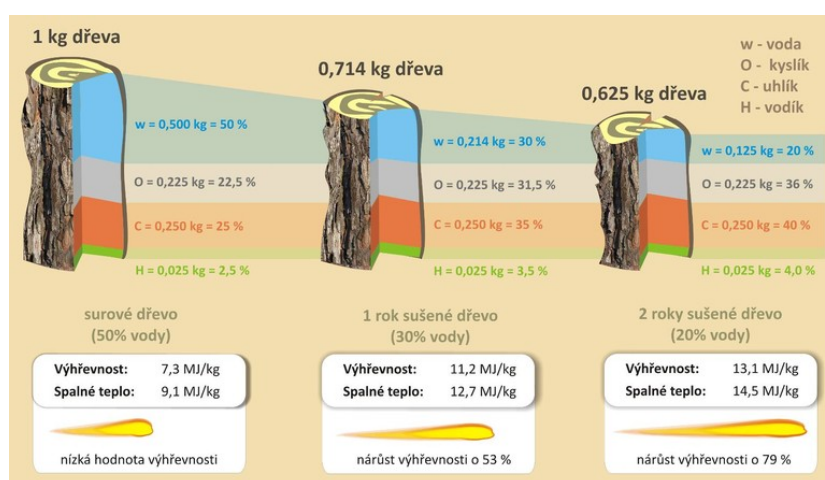


Obr. 6 - Krbová vložka bez roštu [24]

3. PŘEMĚNA PALIV NA ENERGII

3.1 Paliva používaná v krbové vložce

Nejrozšířenější krbové vložky jsou tenkostěnné konstrukce a jako palivo je výhradně používáno dřevo. To má ojedinělé vlastnosti mezi tuhými palivy, především pro svoje složení hořlaviny - h^f . Ta je u dřeva tvořena především organickou hmotou, ve které je zastoupen především uhlík - C, vodík - H a kyslík - O. Další složky ve dřevě tvoří tzv. balast - popelovina - A^f a voda - W^f . Jsou to pro nás nežádoucí složky, protože snižují kvalitu dřeva a energetickou hodnotu. Popelovina ve dřevě je vytvořena z anorganické hmoty, která se do něj dostala při růstu. Množství popeloviny není příliš velké, okolo 1% z celkové hmoty, a proto není tak zásadní jako množství vody. Při vzniku organických paliv je nedílnou součástí a její obsah je velmi proměnný. Pro snížení obsahu vody ve dřevě se doporučuje dřevo sušit.



Obr. 7 - Vysušování dřeva a průběh snižování vlhkosti [12]

Dalším možným palivem je uhlí. To sebou ale nese zvýšené požadavky na konstrukci a tak tyto vložky nejsou příliš rozšířené. Mezi rozdílné vlastnosti uhlí od dřeva lze zmínit lepší výhřevnost, ale vyšší prašnost a pořizovací cenu. [3] [12]

Hojně rozšířenou variantou je dnes topení peletami nebo granulami. Jsou vyrobeny ze dřeva nebo obecně z biomasy. Z definice biomasy vyplývá, že jde o hmotu organického původu. Řadíme sem tedy i dřevo, ale také záměrně pěstované (energetické) rostliny vhodné pro spalování. Jako biomasu lze brát také odpady, zbytky ze zpracování z průmyslu (piliny, hobliny, kůry, štěpky atd.). Podrobnější rozdělení, včetně druhů, je uvedeno v tabulce 1. [4]

Tabulka 1. Rozdělení biomasy [4]

DRUH	TYP		KATEGORIE		PŘEDSTAVITEL
STÉBELNINY	Odpadní biomasa	Jednoletá	Obilnina	Slámy	Pšenice
			Olejnina	Slámy	Řepka olejná
			Přádná rostlina	Odpady ze zpracování	Len setý
			Obilnina		Kukuřice
			Pseudoobilnina	Celé rostliny	Amarant
		Víceletá	Pícnina	Celé rostliny	Šťovík krmný
DŘEVINY	Odpadní biomasa	Víceletá	Listnaté		Buk
					Bříza
					Akát
	Záměrné pěstovaná biomasa		Jehličnaté		Borovice
					Smrk
			Listnaté		Topol
					Vrba

Pro chemické složení biomasy obecně platí, že nejvíce zastoupenými prvky jsou uhlík - C a kyslík - O. Dalšími prvky jsou vodík - H, méně zastoupeny dusík - N, síra - S, chlór - Cl. Ve stopovém množství jsou zastoupeny kovy. Obsah popelovin není příliš velký, pouze u slám může dosahovat až 8 %. Obsah vody je značně proměnný, podobně jako u dřeva. Při hoření biomasy je charakteristický dlouhý plamen. [16]

Tabulka 2. Chemické prvky v biomase a jejich % zastoupení [16]

PRVEK	ZASTOUPENÍ [%]	PRVEK	ZASTOUPENÍ [%]
uhlík - C	40 - 47	křemík - Si	0,05 - 3
kyslík - O	40 - 44	chlór - Cl	0,02 - 1
vodík - H	6 - 7	síra - S	0,05 - 0,8
dusík - N	0,1 - 5	fosfor - P	0,05 - 0,8
vápník - Ca	0,3 - 5	hořčík - Mg	0,02 - 0,5
draslík - K	0,3 - 5	sodík - Na	0,02 - 0,5

Prvky v palivu jako síra- S, chlór - Cl jsou z hlediska konstrukce krbové vložky nežádoucí. Snižují odolnost vnitřních prostor, což má dopad na její životnost a mohou způsobovat korozi materiálu.

3.2 Možnosti přeměny biomasy na energii

Spalování představuje celosvětově nejrozšířenější možnost, jak přeměnit biomasu na energii. A to buď na tepelnou, která může být využita na vytápění, technologické procesy, nebo na elektrickou energii. Technologie, které se při tom používají, jsou značně pokročilé a pro uživatele i cenově dostupné. Tuto konverzi lze označit za ověřenou technologii. Biomasu lze spalovat v zařízeních malých výkonů, od několika kW (klasická kamna, krbové vložky atd.), až po velké zdroje v řádech MW. Etapy při spalování jsou popsány v samostatné kapitole. [4]

Další možností je zplyňování biomasy. Při tomto způsobu dochází k přeměně biomasy na nízkovýhřevný plyn (CO_2 , H_2 , CH_4 , CO_2 , N_2). Reakce je endotermická a potřebné teplo se získává nejčastěji částečnou oxidací (vzduchem, nebo kyslíkem) zplyňovacího materiálu nebo je obstaráváno z externích zdrojů. Ke zplyňování dochází za vyšších teplot, okolo $750\text{ }^\circ\text{C}$ až $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Vzniklý plyn může být používán na provoz kotlů, turbín. Výhřevnost plynu se pohybuje od 4 do 15 MJ/m^3 . Toto široké rozpětí je dáno použitým typem zplyňovacího média. Při použití vzduchu se výhřevnost pohybuje od 4 do 7 MJ/m^3 . Při použití směsi vzduchu s kyslíkem, případně využití vodní páry dochází k nárůstu výhřevnosti.

Aparáty pro zplyňování biomasy jsou technologicky náročnější než u spalování, a proto jsou náklady na pořízení a provoz vyšší. Avšak velkou výhodou představuje vyšší účinnost a v některých technologických procesech náhrada zemního plynu. [4]

Konstrukce zplyňovacích zařízení lze dělit na:

- souproudé zplyňovače
- protiproudé zplyňovače
- zplyňovače s fluidním ložem

Zásadní rozdíl následující popisované přeměny oproti předchozím dvěma metodám je, že probíhá za nepřístupu oxidačních látek (kyslíku). Tento typ termického rozkladu paliva se nazývá pyrolýza. Reakce probíhají při sníženém, nebo zvýšeném atmosférickém tlaku a v širokém rozmezí teplot od $150\text{ }^\circ\text{C}$ až po $900\text{ }^\circ\text{C}$. Dochází k uvolňování těkavých látek a rozkladu vícemolekulárních látek na látky jednodušší. Výsledkem je produkce kapalných paliv a pyrolýzních olejů. Ty mohou být využívány jako palivo pro vytápění nebo výrobu elektrické energie. Předurčování vlastností produktů je obtížné především proto, že záleží na mnoha ovlivňujících faktorech: teplotě procesu, délce ohřevu, přítomnosti kyslíku, vody, ostatních plynů v procesu a v neposlední řadě původu biomasy. [4]

Využívaná technologie je oproti klasičtějšímu způsobu přeměny (spalování) teprve na počátku, proto jsou náklady vysoké. Pyrolýza se ubírá dvěma cestami.

Rychlá pyrolýza - probíhá při vyšších teplotách ($500\text{ }^\circ\text{C}$ - $900\text{ }^\circ\text{C}$) a je pro ni charakteristické rychlé zahřívání suroviny, kdy dojde ke krátkému vypařování a následnému co nejrychlejšímu ochlazení, aby produkt zkondenzoval a vytvořil se tak bio - olej. Ten lze lehce skladovat, použít jako palivo pro výrobu elektrické energie nebo pro chemickou výrobu. Při procesu vznikají jako vedlejší produkty pyrolýzní plyn a pyrolýzní koks a jsou často využívány ve vlastním procesu. [4] [13]

Za nižších teplot, oproti rychlé pyrolýze, a pomalým zahříváním dochází k dlouhé době vypařování. Mluvíme tak o pomalé pyrolýze. Používá se například k výrobě dřevěného uhlí. [13]

Předešlé způsoby rozložení paliva byly vhodné pro biomasu, která se vyznačovala nízkým obsahem vody. Pro materiály s vysokým podílem vlhkosti - vody, je přijatelnou alternativou použití biochemické konverze, mezi níž se řadí anaerobní digesce. Jde o soubor dějů, po sobě navazujících (hydrolýza, acidogeneze, acetogeneze, metanogeneze). Pokud dojde k přerušení jediného děje, dojde k narušení celého procesu.

Děje se odehrávají za nepřístupu kyslíku a za lehce zvýšené teploty (35 °C - 55 °C). Dochází k rozkládání hmoty (především odpadní biomasy) a tvorbě plynů (CH₄, CO₂, H₂, N₂) a tuhého zbytku. [4]

Dalším možným procesem je fermentace, při níž dochází k alkoholovému kvašení a po následné destilaci k oddělení etanolu. Dalšími produkty jsou glycerol, oxid uhličitý, methanol atd. Používané materiály jsou například cukrová řepa, kukuřice, obilí. Výsledný etanol, díky své vysoké kvalitě, lze používat jako náhradu za palivo do motorů. [4]

3.2.1 Spalování paliva

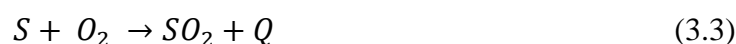
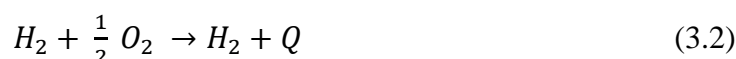
Spalování je fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla. Reakci lze nazvat jako exotermní. Nás, jako uživatele krbové vložky nejvíce zajímá právě množství uvolněného tepla. To je spjato s výhřevností paliva Q_i^r . Definice výhřevnosti: Množství uvolněného tepla při dokonalém spálení 1 kg paliva, při ochlazení spaliny na teplotu 20 °C za vzniku vody v plynné formě. Výhřevnost nelze experimentálně změřit, a proto se určuje výpočtem pomocí spalného tepla Q_s . Definice spalného tepla: Množství uvolněného tepla dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C, kdy voda je v kapalném stavu. Spalné teplo se stanovuje pomocí kalorimetrické metody a je o něco vyšší než výhřevnost. [5]

Tabulka 3. Výhřevnost používaných paliv pro spalování [16]

DRUH PALIVA	VLHKOST [%]	VÝHŘEVNOST [MJ.kg ⁻¹]
Smrk	25	13,1
Jedle	25	14,0
Borovice	25	13,6
Bříza	25	13,5
Jasan	25	12,7
Buk	25	12,5
Dub	25	13,2
Habr	25	12,1
Akát	25	13,2
Dřevní štěpka	20 - 55	5 - 13
Obilní slámy	12	15

3.2.2 Děje při spalování

Pracovní látky spalovacího procesu (palivo, okysličovadlo) prochází těmito chemickými pochody a vznikají tak produkty spalování.



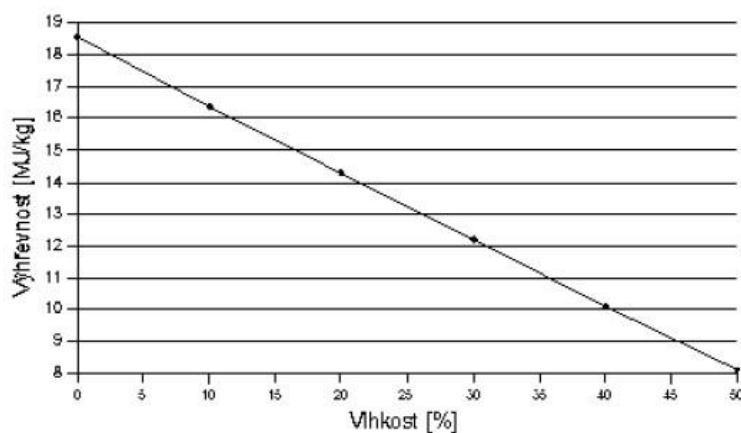
Tyto rovnice platí pouze pro dokonalé spalování, kdy dojde ke spálení veškerého množství paliva a jako okysličovadlo je použit čistý kyslík - O₂. V obvyklých případech plní funkci okysličovadla vzduch.

Spolu s ním do spalovacího procesu vstupuje nejenom kyslík, ale i další prvky. Z těchto prvků významně zasahuje do spalování převážně dusík - N. Dusík se může slučovat s kyslíkem a vytvářet, ve stopovém množství, škodlivý oxid dusičitý - NO_2 a oxid dusnatý - NO. Pokud se reakce neúčastní, může odcházet jako balastní složka v kouřových plynech. Další sloučeniny obsažené v kouřových plynech jsou produkty spalování tj. CO_2 , H_2O , SO_2 , SO_3 . [5]

Z pohledu paliva, ať už jde o dřevo samotné nebo biomasu, je spalování cyklický děj. Začíná přiložením nového kusu a končí odvodem zbytků po spalování. Proces můžeme rozdělit do několika fází, ovšem ve skutečnosti se odehrávají současně.

1. Vysušení paliva

Po vstupu paliva do spalovací komory nastává proces, při kterém teplem dovedeným, nebo již vyrobeným dojde k odpařování vody. Voda tvoří nehořlavou složku, snižuje tepelnou hodnotu paliva, spotřebovává vyrobené teplo a zvyšuje objem spalin. Snižuje tak účinnost zařízení a je nežádoucí. Obsah vody v palivu se mění v závislosti na typu paliva a jeho geologickým stářím. Dosahuje hodnot od 1 % do 60 %. Největší množství vody v palivu představuje voda hrubá. V živém stromu dopravuje výživné látky a nachází se v dutinách buněk. Ihned po skácení se začne snižovat a odpařovat se při volném vysychání. Voda hygroskopická (zbytková) je kapilárně vázaná a vypařuje se až po vodě volné a až tehdy se významně mění mnohé vlastnosti dřeva. K těmto vodám se může ještě přidat voda přimíšená, která se do paliva dostane po těžbě.



Graf 1. Závislosti výhřevnosti na vlhkosti [12]

2. Odplynění

Nad $700\text{ }^\circ\text{C}$ se u dřeva uvolňují prchavé složky, které počínají vznik plamene. Přivádí se sekundární vzduch nad vrstvu paliva a umožňuje tak vyhoření prchavé hořlaviny (u biomasy představuje velký podíl). Její množství je závislé na stáří a druhu paliva. Objem sekundárního vzduchu musí být tím větší, čím je větší obsah prchavé hořlaviny.

3. Hoření

Vstupující primární vzduch umožňuje zapálení tuhé hořlaviny (C, H, S), která je nositelem energie.

Při hoření jde o řetězový děj, který začíná působením tepelného impulzu nebo samovznícením, část vyrobeného tepla je odváděna a další část tepla slouží jako iniciátor pro zachování řetězové reakce.

4. Dohořívání tuhé fáze a chladnutí zbytků

Nespalitelné části paliv zůstávají v ohništi a chladnou, přitom vytváří popel. Konec hoření nastává vyčerpáním buď hořlavé směsi, nebo intenzivním odvodem tepla a tím přerušením řetězové reakce.

3.2.3 Popelovina a popel

Poslední etapou paliva, jak bylo uvedeno v předešlé podkapitole, je vznik popele. Tomu předchází řada dějů začínající v popelovině, která je již přítomna v palivu. Její množství se liší v závislosti na typu paliva. Můžeme ji rozdělit na primární a sekundární. Primární se dostane do paliva již při samotném vzniku a sekundární se přimísí do paliva během dopravy nebo těžby. Primární popelovina u biomasy je tvořena směsí různých vázaných minerálů, převážně křemičitany hliníku, vápníku, železa, sodíku a draslíku, uhličitany vápenatý - CaCO_3 , uhličitany hořečnatý - MgCO_3 a uhličitany železnatý - FeCO_3 . Dále malé množství alkalických kovů a ve stopovém množství řadu jiných minerálů. Poměrové zastoupení popeloviny v palivu se stanovuje žiháním vzorku paliva a změřením zbytkové hmotnosti. Během spalování probíhají v popelovině chemické reakce a vzniká popel. Postupně se složení i hmotnost mění, v důsledku ztráty hydrátové vody (vázaná v popelovinách) nebo některých minerálů. Změny a reakce probíhají v oxidačním prostředí. Tímto vznikají směsi kyslíčků: oxid křemičitý - SiO_2 , oxid hlinitý Al_2O_3 , oxid železitý - Fe_2O_3 , oxid vápenatý CaO , oxid hořečnatý - MgO , oxid sodný - Na_2O , oxid draselný - K_2O , oxid manganatý - MnO , oxid fosforečný - P_2O_5 . Dále může popel obsahovat také rizikové prvky olova - Pb, kadmium - Cd, niklu - Ni, arsenu - As, mědi - Cu, chromu - Cr, rtuti - Hg a dalších látek. [5] [14]

Změknutím a spečením popele vzniká škvára, pórovitá hmota, zatímco přetavením popele vzniká sklovitá tuhá hmota nazývaná jako struska. Teploty, při kterých dochází k těmto změnám stavů, se označují jako charakteristické teploty popele. Stanovují se laboratorně ohřevem zhotoveného vzorku v pícce a vyhodnocením změn tvaru tělíška se vzrůstající teplotou.

Z pohledu legislativních předpisů České republiky se popel řadí do skupiny „Ostatní odpad“ a velká část vzniklého popele ze spalování biomasy se v ČR skládá. Ovšem v některých případech v ČR a řadě zemí Evropské unie se popel, protože je významným zdrojem živin pro půdu, využívá jako hnojivo. Pro takovéto aplikace nejsou popele v současné době v ČR v legislativách zmíněny, a tudíž pro další nakládání s nimi je nutné vytvořit legislativu novou. Tato v budoucnu vytvořená norma by měla vycházet z bilance dávky živin a vnosu rizikových prvků do půdy. Popřípadě by měl být přijat obecnější předpis, který bude omezovat celkové vložené množství rizikových prvků za určité sledované období. Vzhledem ke strategickým dokumentům EU (např. Rámcová smlouva o odpadech) by bylo bezesporu vhodnější a žádoucí upřednostnit zhodnocení a využití těchto odpadů před skládkováním.

V současné době se v České republice využívá pro uvádění popele do oběhu, užití jako hnojiva či pomocných rostlinných přípravků zákon č. 9/2009 Sb., přičemž limitní hodnoty rizikových prvků upravuje Příloha č. 1k vyhlášce č. 271/2009 Sb. o stanovení požadavků na hnojiva. [7]

V porovnání limitů ČR s limity USA a vybraných států Evropské unie (tabulka 4) lze zjistit, že naše norma je jednoznačně nejpřísnější s nejnižšími limity pro obsah rizikových prvků. Státy jako Rakousko, Dánsko, Finsko, Švédsko mají navíc ve svých speciálně vytvořených legislativách pro popel ze spalování biomasy jako hnojivého materiálu zanesena některá další omezení. Nejčastěji to jsou určené maximální aplikační dávky, minimální obsahy živin a stanovení jednotlivých druhů popele na konkrétní kultury půd (lesy, pole). [7]

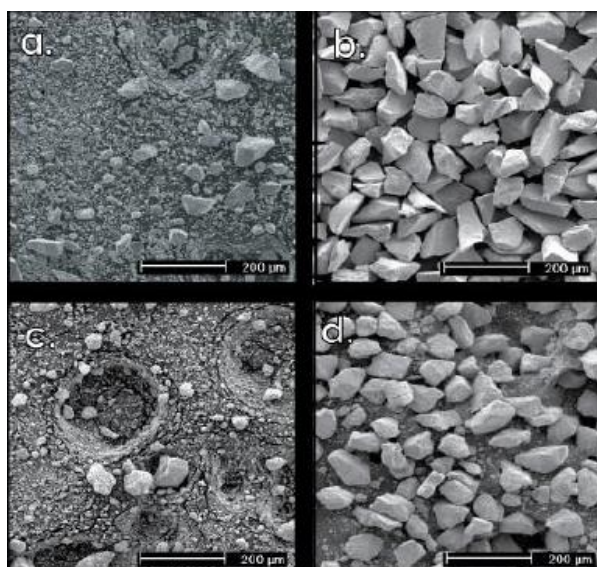
Tabulka 4. Limitní obsahy rizikových prvků pro použití hnojiva (popele) na zemědělskou půdu a lesy ve vybraných státech Evropy a v USA v mg/kg [7]

	ČR	Slovensko	Rakousko	Dánsko zem./lesy	Finsko zem./lesy	Švédsko	USA
As	10	10	20		25/30	30	41
Cd	1	2	8	5/15	1,5 / 17,5	30	39
Cr	50	100	250	100	300 / 300	100	3000
Cu		200	250		600 / 700	400	1500
Hg	1	1		0,8	1 / 1	3	17
Ni		50	100	30/60	100 / 150	300	300
Pb	10	100	100	120	100 / 150	300	300
Zn		400	1500		1500 / 4500	7000	2800

Nevýhodou je lepení se malých částic na velké částice. Rozšíření suché metody představuje síťování v proudu vzduchu – Air jet. Nasávaný vzduch prostupuje přes štěrbinovou rotující hubici, síto s částicemi jsou nad ní. Proud vzduchu pročišťuje oka síť a rozbíjí slepené částice. Ty, které propadnou sítím, jsou přesunuty pomocí hubice a proudu vzduchu do cyklónu, pro zachování kompletního vzorku. Tento způsob rozšiřuje použití suchého síťování do cca 25 μm . [18]

Mokrý metoda

Pro materiály v suspenzi nebo pro prášky, které se mohou při suchém síťování spojovat (agregovat), je často používána mokrá cesta síťování. Základ této metody spočívá opět v rozvibrování soustavy sítí, ale hnací síla je často rozšířena o proplachování sítí nebo sání. Tím se zlepšil tok suspenze přes síta. K proplachování se nejčastěji používá samotná voda, nebo voda s rozkládajícím činidlem. Je možné užit i jiné kapaliny. Nevýhoda metody je ve zdlouhavém průběhu. To je ovlivněno dobou síťování (1-2 hodiny), proces probíhá až do té doby, dokud není procházející kapalina prakticky čirá a dobou sušení jednotlivých frakcí před zvážením. [18]



Obr. 9 - Srovnání suché (a, c) a mokré (b, d) metody síťování, velikost částic je a, b 63-75 μm , c, d 44-75 μm . [18]

4.2 Sedimentační metoda

Sedimentační analýza se skládá z rychlosti pohybu částic v kapalném médiu a velikostí těchto částic (sedimentační rychlost). Dojde k rozdělení zkoumané směsi na jednotlivé velikostní frakce. Hybnou silou pro pohyb a usazování je gravitace. Proto je tato metoda někdy označována také jako gravitační. Sem řadíme i sedimentaci v poli centrifugy a ultracentrifugy, i když nazývat tyto dvě velikostní analýzy jako gravitační není příliš opodstatněné. Metoda je vhodná pro velikosti částic od 1 do 100 μm . Spodní mez intervalu můžeme výrazně posunout vhodně zvolenou metodou, například použitím centrifugy. Malé částice jsou ale ovlivněny Brownovým pohybem – neuspořádaným pohybem malých částic. Zatímco horní mez nelze příliš zvýšit, protože velké částice vytvářejí v kapalině turbulentní proudění.

Důležité podmínky pro použití sedimentační analýzy a následného získání věrných výsledků jsou následující: nerozpustnost částic v kapalině, vzájemná nereaktivnost částic v kapalině, nižší hustota částic než hustota kapaliny a laminární tok (je nutné odstranit příliš velké částice před měřením). [18] [19] [20]

Sedimentace v gravitačním poli

Ve většině případů tvoří vybavení při sedimentaci v grav. poli Andreasenův přístroj. Jedná se o válec (obsahu cca 600 ml a výšce nad 20 cm) s pipetou s trojcestným ventilem. Do tohoto válce se nalije připravená suspenze podle normovaného procesu (rozdužení aglomerátů, míchání, třepání, ultrazvukování, popř. vaření atd.) a nechá se stát. V daných časových intervalech sledujeme v určitých výškách sedimentačního sloupce koncentraci suspenze.

Sedimentační rychlost částice určuje Stokesův zákon:

$$v = d^2 * (\rho_p - \rho_L) * \frac{g}{18\eta_L} \quad (4.1)$$

Doba mezi jednotlivými odběry vzorků by měla růst geometrickou řadou. Tím docílíme co nejpřesnějšího měření, ale naopak stoupá celkový čas. Pro zkrácení doby měření používáme přístroje, ve kterých je průběžně zaznamenáván příbytek hmotnosti způsobený usazováním jednotlivých frakcí. Tento rozšířený způsob sedimentační analýzy je uskutečňován pomocí tzv. sedimentačních vah. Jako další můžeme použít foto- resp. rentgen – sedimentograf. Tyto přístroje postupně skenují celý sedimentační sloupec od zdola nahoru a obráceně a dynamicky vyhodnocují zpět odražené záření. To je po určitém čase sedimentace zeslabováno. Tímto se významně zkracuje měření, až o řadu minut. [18] [20]

Sedimentace v poli centrifugy

Použití sedimentace v poli centrifugy je doporučováno zejména pro suspenze, kde většina částic je menší než 1 μ m. U částic těchto velikostí se projevuje Brownův pohyb, a proto není klasická sedimentace příliš vhodná. Výhoda významného snížení velikosti měřených částic je často vykoupená velmi vysokou pořizovací cenou zařízení. Měření spočívá v oddělení velikostních frakcí v důsledku odstředivé síly, která je generována pohybem centrifugy. Pro rychlost částic platí vztah:

$$U = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (4.2)$$

Podkladem pro sestavení distribučních křivek je získání dat o rozdělení koncentrace částic v závislosti od geometrické vzdálenosti od středu otáčení v jednotném čase. Nebo získání časové závislosti koncentrace částic ve stejném místě od středu. [18] [19]

Rotační rychlosti centrifugy jsou od 500 do 24 000 otáček za minutu. Vyšší počet otáček, tím tedy i vyšší rotační rychlost, se používá pro opravdu malé částice, okolo 0,1 μ m. Průměr rotujícího disku bývá 15 cm. Doba měření je oproti klasické metodě sedimentace výrazně zkrácena na 10 až 20 minut. Pro detekci částic se využívá rentgenové záření nebo bílé, či monochromatické (má jen jednu vlnovou délku) světlo. [18]

SFFF

Sedimentace v poli proudění (Sedimentation Field Flow Fractination) slouží k oddělení, separaci částic podle jejich velikostí s využitím silového pole centrifugy. Převážně se vyhodnocují částice podmikronových velikostí ($<1 \mu\text{m}$). V separačním kanálku proudí laminárně kapalina, nejčastěji voda, do které přivedeme 10 – 50 μl analyzované směsi. Laminární tok má parabolický rychlostní profil a ten způsobuje rozmístění částic v proudu.

Na čele paraboly je rychlost nejvyšší a nacházejí se zde ty nejlehčí částice, naopak ty největší jsou umístěné u stěn, kde je rychlost proudění nejmenší. Těmto částicím trvá také jinak dlouho, než projdou separačním kanálkem. Na jeho výstupu se pro detekci částic nachází UV extinkční detektor. [18]



Obr. 10 - Separační kanálek s laminárním prouděním [24]

4.3 Laserová metoda

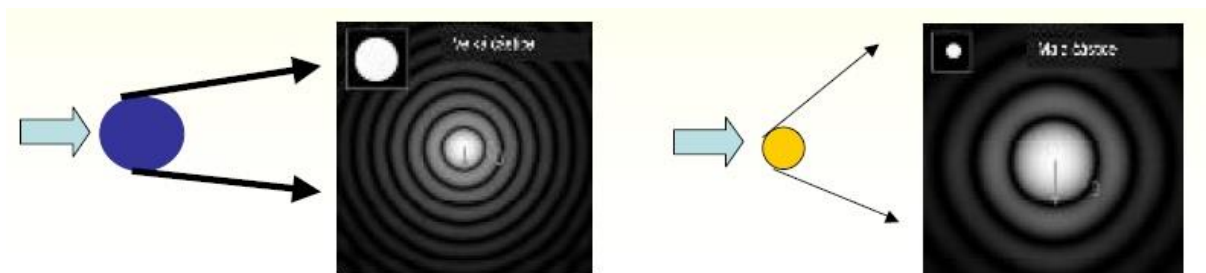
Laserová difrakce patří k nejvíce používaným metodám k analýze částic. Z tohoto důvodu ji v této podkapitole bude věnován značný prostor. Základní fyzikální principy této metody jsou již z roku 1908 (Mieova teorie), ale hojně používaná mohla být až po době vynálezu laseru (1960). S přispěním zvyšující se výkonosti počítačů jsou dnešní dostupné přístroje rychlé, flexibilní, vhodné pro velikosti částic od několika nm až po několik mm. Vyhovují jak pro suspenze, tak i pro prášky. Metoda je nenáročná na přípravu vzorku a obvykle podává výsledky s vysokou reprodukovatelností. Ovšem jedná se o analýzu submikronových částic a nanočástic a zvláště u nich musíme počítat se silnou aglomerací. Pokud je to proveditelné lze deaglomeraci docílit přidáním specifických ztekutiv. Výhody použití laserové techniky jsou v dlouhé životnosti, vysoké stability monochromatického záření. U detekčního systému jsou to pak výhody vysoké citlivosti a také dlouhé životnosti. Rychlost měření též představuje silnou stránku a pohybuje se do 30 s. Tímto postupně vytlačuje jiné metody velikostních analýz, především pak sedimentační metody.

Jak již bylo napsáno, základním prvkem přístroje je zdroj laserového světla, tedy laser nebo wolfram halogenová lampa. Vygenerovaný paprsek prochází optikou, ta upravuje vlastnosti generovaného laserového svazku. Poté následuje tzv. cela. Je to průtočná zóna pro měření vzorku specifické geometrie. Tvoří ji dvě přesně paralelní okna, spojené s reservoirem vzorku, popřípadě s kádinkou. Po dobu měření je připravená suspenze kontinuálně pumpována celou a rychlost toku je zvolena podle hustoty částic tak, aby nedošlo k usazování částic v tomto prostoru. Některé přístroje navíc umožňují měření za sucha s využitím tzv. dry dispersion unit. [18] [20]

Suchá směs, prášek je dopravován přes prostory cely proudem suchého vzduchu. Dále je zabudován detekční systém. Ten se skládá z řady diskretních senzorů s velmi malou odrazivostí, jejichž funkce spočívá v převedení intenzity světla na difrakční obrazec s využitím závislosti na úhlu rozptylu, protože část světla je pohlcena po dopadu do vzorku, část je propuštěna a další je rozptýlena s odlišnou intenzitou a odlišnými úhly.

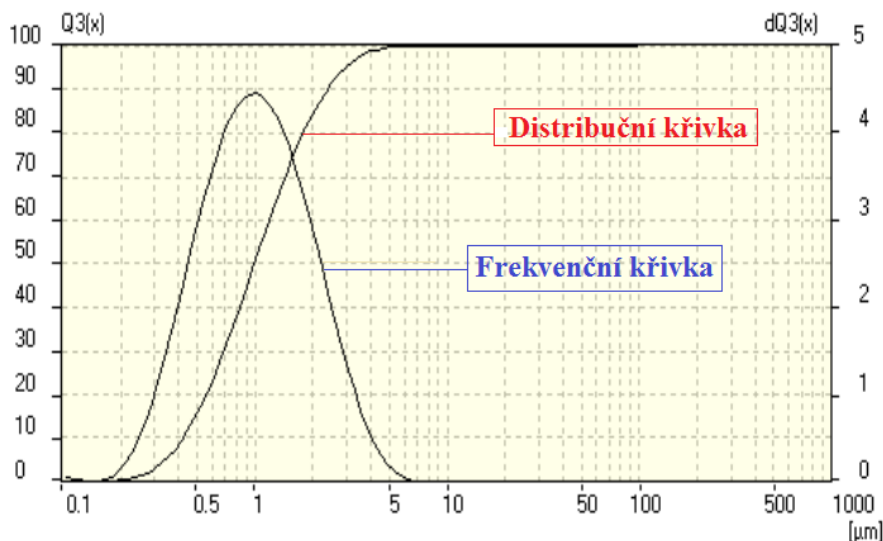
Velké částice ve vzorku zapříčiňují rozptyl laserového paprsku pod malým úhlem, ale silnou intenzitou dopadu na detektor. Mále částice naopak rozptylují paprsek pod velkým úhlem a jeho intenzita při dopadu na detektor je malá. Difrakční obrazec se pak použije pro výpočet velikosti částic. Vzdálenosti mezi jednotlivými zařízeními (laserem, optickou celou a fotodetektoem) určují rozsah měření. V typickém případě od 0,1 μm do 1 mm.

S použitím Fourierovy optiky lze měřit až v nano oblasti, a to buď s Fourierovou čočkou, nacházející se mezi optickou celou a fotodetektoem, nebo s Fourierovou inverzní optikou. Ta využívá konvergentní laserový paprsek a čočka je umístěna mezi samotným laserem a celou. Celou soustavu uzavírá elektronický systém (počítač), který transportuje difrakční údaje na objemová distribuční data. Možné zdroje chyb představují aglomerace nebo drcení původních částic, rozpouštění částic a částice s hrubým povrchem, přítomnost bublin vzduchu, příliš vysoká, nízká koncentrace částic ve směsi a špatně vymytý přístroj. [18] [20]



Obr. 11 - Rozptýlené světlo malou a velkou částicí a následný difrakční obrazec částice [19]

Pro analýzu naměřených dat (difrakčního obrazce) jsou vhodné tři teorie. Mieho, Fraunhoferova a Rayleighova. Správnost zvolené teorie spočívá ve velikosti částic, tedy na úhlu, pod jakým rozptylují světlo a také parciálně na jejich tvaru. Pro netransparentní částice větší jak 100 μm se Fraunhoferova teorie příliš neliší od Mieho, avšak u částic v rozmezí od 10 do 100 μm jsou již viditelné rozdíly. U tohoto velikostního rozhraní se nejčastěji používá Mieho teorie. Částice pod 10 μm jsou vhodné pouze pro aplikaci Mieho teorie. Ta se tedy jeví jako nejpřesnější a je také nejpoužívanější. Je založena na předpokladu kulového tvaru částic, což znamená, že výsledná vypočtená velikost částic není jejich absolutní velikostí, ale odpovídá velikosti teoretické koule, která má stejný objem jako analyzovaná částice. Použití této teorie požaduje znalost relativního indexu lomu měřených částic vzhledem k měřenému mediu. [18] [20]



Obr. 12 - Výsledný graf měření, popis křivek [18]

Frekvenční křivka charakterizuje rozdělení velikosti částic vztažené na celkový objem částic. Distribuční křivka udává procentuální zastoupení částic ve vzorku, které jsou menší, než je zvolená velikost částice.

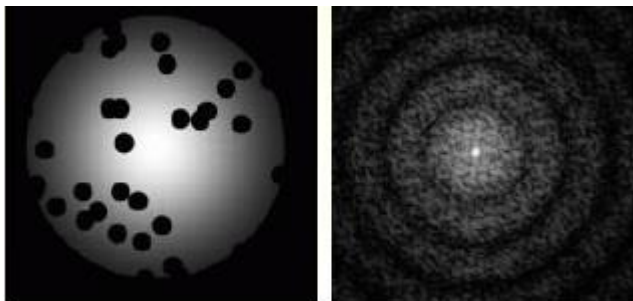
4.4 Dynamický rozptyl světla (DLS)

Podmikronové částice se v kapalině postupně rozptylují do celého prostoru a postupně tak vyrovnávají koncentraci v kapalině. Pohyb je způsoben tzv. Brownovým pohybem. Metoda vhodná pro analýzu takto velkých částic je právě DLS, která zkoumá Brownův pohyb opticky. Ten závisí na viskozitě okolní kapaliny, velikosti a teplotě částic. Podobně jako u laserové metody je výsledkem difrakční obrazec. Termální pohyb molekul kapaliny způsobuje změnu pozic námi sledovaných částic. Což zapříčiňuje změny difrakčního obrazce, dochází k fluktuaci intenzity sledovaného bodu difrakčního obrazce v čase. Zavádíme korelační funkci, která sleduje fluktuaci intenzity v závislosti na čase.

Světelný zdroj vytváří monochromatické koherentní světlo, to prochází přes soustavu čoček do vzorku. Vzorek je umístěn v kruhové, nebo hranaté tepelně sledované měřící cele. Intenzita částicemi rozptýleného světla je vyhodnocována a konvertována v lavinovém fotodiodovém detektoru (APD) nebo fotomultipléru. Úhel detekce je u některých zařízení fixní (90°), v jiných je proměnný (20° - 160°).

Signály z detektoru jsou zpracovány v korelátoru, který vypočte korelační funkci. Ta je zpracována v počítači na rozdělení velikosti částic. Nejvíce ovlivňující faktory měření jsou velikost a koncentrace částic. U částic větších jak $0,5 \mu\text{m}$ se může projevit velmi pomalý Brownův pohyb. To s sebou nese dlouhé měřící časy. Naopak malé částice ($0,005 \mu\text{m}$) omezují měření špatným rozptýlením světla. [18] [20]

U nízkých koncentrací může dojít rozptylu světla s menší intenzitou (speciálně u malých částic). Zabraňuje se tomu použitím vyšších koncentrací nebo použitím silnějšího laseru. Vysoké koncentrace vedou k násobnému rozptylu (nad $0,5 \mu\text{m}$) nebo k interakci částic. [18] [20]



Obr. 13 - Metoda DLS použitá pro silné koncentrace a velmi zředěné roztoky [18]

5. PRAKTICKÁ ČÁST

5.1 Použité palivo

Pro praktickou část jsem se rozhodl spalovat pouze dřevo, které je jako palivo pro krbovou vložku nejvhodnější. Z tohoto důvodu jsem vybral několik jeho druhů. A to jak dřeva tzv. měkká, tak i tvrdá. Toto označení je spojeno se silou (tlakem), která je potřebná k průniku cizího tělesa do dřeva. Čím je tato hodnota vyšší, tím je dřevo tvrdší. Typickým představitelem měkkého dřeva je smrk, kde se pohybuje síla (tlak) k průniku do 35 MPa. Akát, buk a švestku řadíme do tvrdých dřev, síla k průniku je větší jak 65 MPa. Označení tvrdé, či měkké dřevo nemá žádný vliv na výhřevnost daného kusu dřeva, což může být často domněnka. Na druhou stranu je nutné říci, že při spálení tvrdého dřeva se uvolní více tepla, než při spálení měkkého. Je to dáno především váhou samotného dřeva. Tvrdá dřeva jsou těžší, mají větší hustotu ($\text{kg}_{\text{dřeva}}/\text{m}^3_{\text{dřeva}}$) a výhřevnost je vyjádřena na množství na kilogram paliva. Zde je stručná charakteristika jednotlivých druhů (výhřevnosti v tab. 3.) [21] [23]

Akát - čerstvé dřevo má silné aroma a hnědo - zelenou barvu. Dřevo je tvrdé, hodně houževnaté a dobře odolává povětrnostním podmínkám. Po spalování nechává více popele.

Švestka - dřevo ovocného stromu je velmi husté a tvrdé. Při sušení se silně kroutí a dochází k praskání. Hojně využíváno k uzení. Barva dřeva je tmavě hnědá.

Buk - patří k nejtěžším dřevinám, rychle vysychá a vyznačuje se dobrou výhřevností. Je velmi oblíben jako palivové dříví. Dřevo je světle hnědé, bělavě až narůžovělé. Při vyšší vlhkosti vyšší sklon k hnilobnému procesu.

Smrk - měkká dřevina, poměrně lehké a dobře štípatelné, přitom pružné a pevné. Rychle vzplane a hoří. Je vhodné pro rychlé dosažení vysoké teploty. Lesklé, bílé až žluté barvy. Náchylné na dřevokazný hmyz. [21]



Obr. 14- Řez dřevem - akát [21]



Obr. 15- Řez dřevem švestka [21]



Obr. 16- Řez dřevem - buk [21]

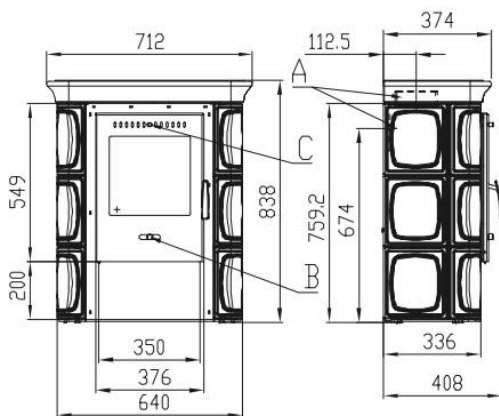


Obr. 17- Řez dřevem - smrk [21]

5.2 Popis krbových vložek

Dále jsem se rozhodl pro spalování využít dvou krbových vložek s rozdílnými účinnostmi. V první jsem spaloval všechny druhy uvedených paliv a ve druhé s horší účinností (dále označováno jako krbová vložka 2.) jsem spaloval smrk a buk. Tato paliva z této krbové vložky budou následně označována jako smrk 2 a buk 2. Při měření jsem se snažil o přibližně stejné množství paliva pro každé spalování.

Krbová vložka 1.



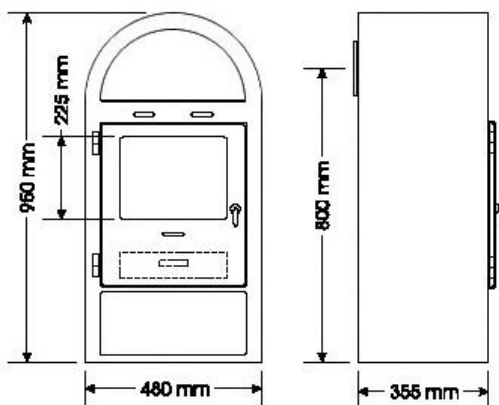
Obr. 18 - Rozměry krbových kamen 1



Obr. 19 - Příklad spalovacího vzduchu

Krbová kamna od firmy Romotop jsou vyrobena z ocelových plechů o síle 4 - 5 mm. Vnější plášť je obestaven keramickými kachlemi, které zlepšují akumulaci a plní estetickou funkci. Vzniklý prostor mezi pláští je využíván k ohřevu vzduchu. Ten vstupuje do místnosti výdechy, jež se nachází v horní části kamen. Dále je tepelná energie předávána pomocí sálání. Průměrná vytápěcí schopnost je 160 m^3 s deklarovanou účinností - $\eta 82 \%$. Celkový regulovaný výkon činí 6 - 11 KW. Vnitřek krbové vložky je vyložen šamotovými deskami a prostor topeniště je $0,07 \text{ m}^2$.

Krbová vložka 2.



Obr. 20- Rozměry krbových kamen 2



Obr. 21 - Příklad spalovacího vzduchu

Tyto kamna, od výrobce Neriet, jsou vyrobená z 2-3 mm silného plechu a vybavena opět šamotovou vyzdívkou. Prostor topeniště činí 0,08 m². Nominální výkon je 7 kW s účinností - η 70 % a veškerou tepelnou energii předávají pomocí sálání do místnosti. Můžou tak vytápět prostor od 125 do 160 m³. Ovšem kamna mohou být vybavena teplovodním výměníkem o výkonu 2,3 kW, což umožňuje dostatečný přívod tepla do cca 2 radiátorů.

5.3 Průběh experimentu a výsledky

Vzniklý popel jsem odebral z popelníku krbových vložek do skleněných nádob. Vyvaroval jsem se použití polypropylenových sáčků z důvodu, že elektrostatická síla v sáčku může zachytit ty nejmenší částice a došlo by tak k ovlivnění vzorku. Následně jsem popel analyzoval na následujících přístrojích a vyhodnotil výsledky.

Sítový analyzátor

Jednotlivé popele byly na začátku měření v laboratoři zváženy a následně přesítovány na přístroji Analysette 3 PRO, jehož nastavení bylo: doba sítování 2 minuty po 5 s intervalech a amplituda vychylování byla nastavena na 0,5 mm. Použité síto bylo o velikosti ok 1mm. Princip tohoto sítování byl již popsán v kapitole 4.1. Sítování jsme provedli, abychom odstranili větší části (nespálené kousky dřeva) obsažené v popelu a nedošlo tak k poškození laserového přístroje, kterého jsme využili k následné velikostní analýze zbylé frakce.

Laserový analyzátor

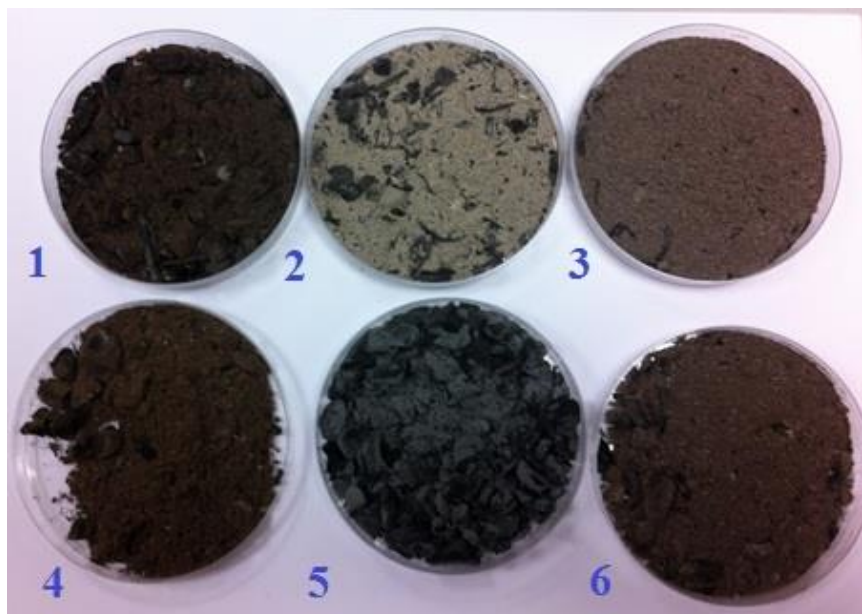
Pro samotnou analýzu velikosti částic jsme využili laserový analyzátor Analysette 22 Micro Tec plus od výrobce Fritsch, který dokáže spolehlivě vyhodnotit vzorky s širokou škálou vlastností. Způsob měření je popsán v kapitole 4.3. Pro každý druh paliva jsme měření opakovali dvakrát, přičemž při druhém proměřování byl přístroj nastaven tak, aby daný vzorek opětovně změřil třikrát. Tak jsme dostali celkem pro jeden druh paliva 4 výsledky. Z těchto výsledků jsme do této části bakalářské práce zvolili vždy jeden ke každému druhu palivu, dle kvality zastínění laserového paprsku.



Obr. 22- Sítový prosévač - Analysette 3 PRO



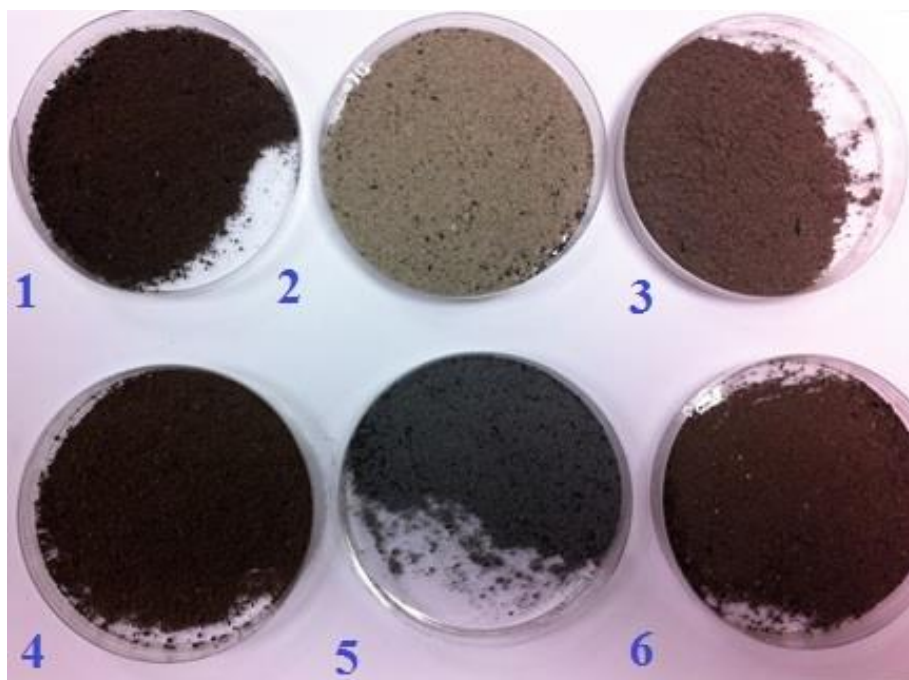
Obr. 23 - Laserový analyzátor - Analysette 22 Micro Tec plus



Obr. 24 – Odebrané vzorky z popelníku krbových vložek

1 – Smrk, 2 – Akát, 3 – Buk 1, 4 – Smrk 2, 5 – Švestka, 6 – Buk 2

Na Obr. 24 jsou znázorněny jednotlivé vzorky popele po odebrání z krbové vložky. Již na první pohled je patrné, že vzorky obsahují velké množství malých prachových částic, ale i velké kusy nespáleného dřeva. Jisté rozdíly lze spatřovat i mezi jednotlivými druhy popela nejen co do velikosti částic, ale i v barevnosti.



Obr. 25 – Jednotlivé vzorky po síťování

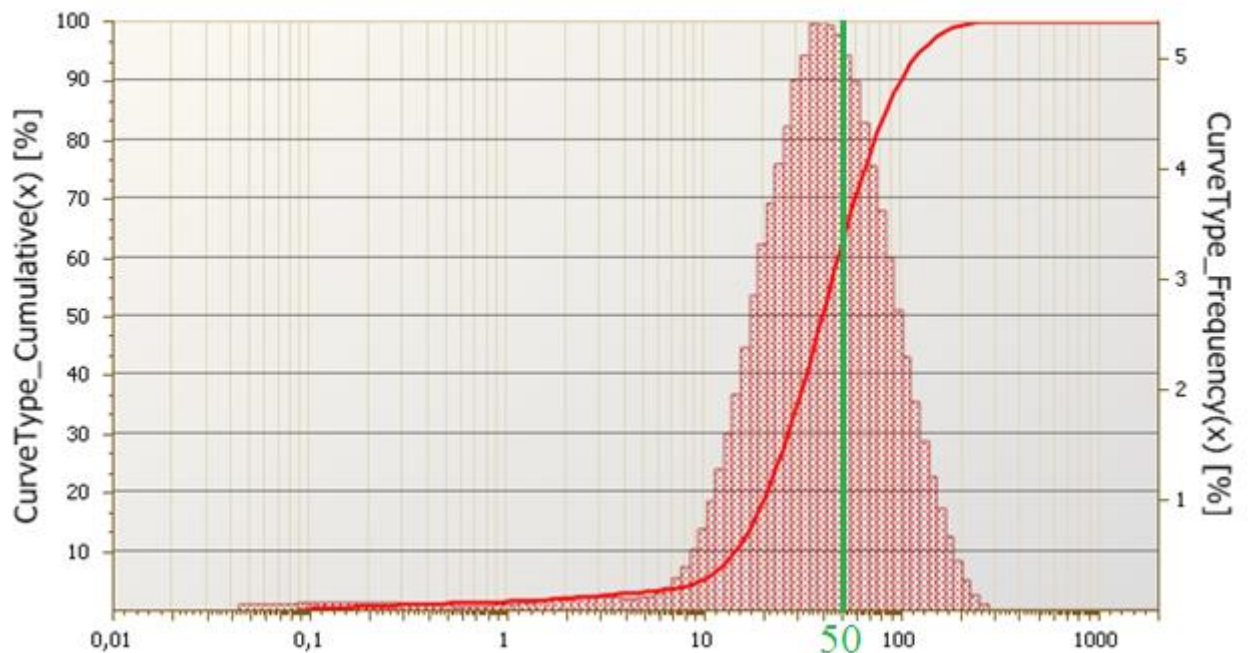
Vzniklé jednotlivé frakce a zbytky po sítování byly opět zváženy na digitální váze s přesností na 3 desetinná místa. V přesítovaném zbytku se nacházely především nespálené kousky dřeva vzniklé nedokonalým hořením v krbové vložce. Těchto tzv. uhlíků bylo nejvíce obsaženo ve švestce - 79,9 % z celkové hmotnosti a smrku 2 - 59,4 %. U smrku 2 lze toto množství vysvětlit horší účinností krbové vložky, ve které tento vzorek byl spalován, protože i buk 2 měl vyšší hodnoty zbytku, oproti buku 1, který byl spalován v krbové vložce s vyšší účinností.

Tabulka 5. Jednotlivé váhy vzorků po přesítování

DRUH DŘEVA	VÁHA VZORKU [g]	VÁHA PO SÍTOVÁNÍ - FRAKCE [g]	VÁHA PO SÍTOVÁNÍ - ZBYTEK [g]	VÁHA PO SÍTOVÁNÍ - FRAKCE [%]	VÁHA PO SÍTOVÁNÍ - ZBYTEK [%]
smrk 1	2,754	1,500	1,375	54,5	45,5
akát	9,754	7,936	1,781	81,4	18,6
buk1	5,439	4,554	0,598	83,7	16,3
švestka	12,522	2,516	10,050	20,1	79,9
smrk 2	3,564	1,447	1,990	40,6	59,4
buk 2	4,566	3,049	1,384	66,8	33,2

Následující grafy 2. - 7. jsou výsledky z laserového analyzátoru a pro jejich srovnatelné vyhodnocování jsme zvolili jako referenční hodnotu 50 μm . Pro snazší orientaci byla v grafech dodělaná zelená příčka právě v této ref. hodnotě. Spolu s grafy je ke každému vzorku přidána tabulka procentuálního zastoupení jednotlivých velikostních frakcí.

5.3.1 Akát



Graf 2. Velikostní rozdělení částic - akát



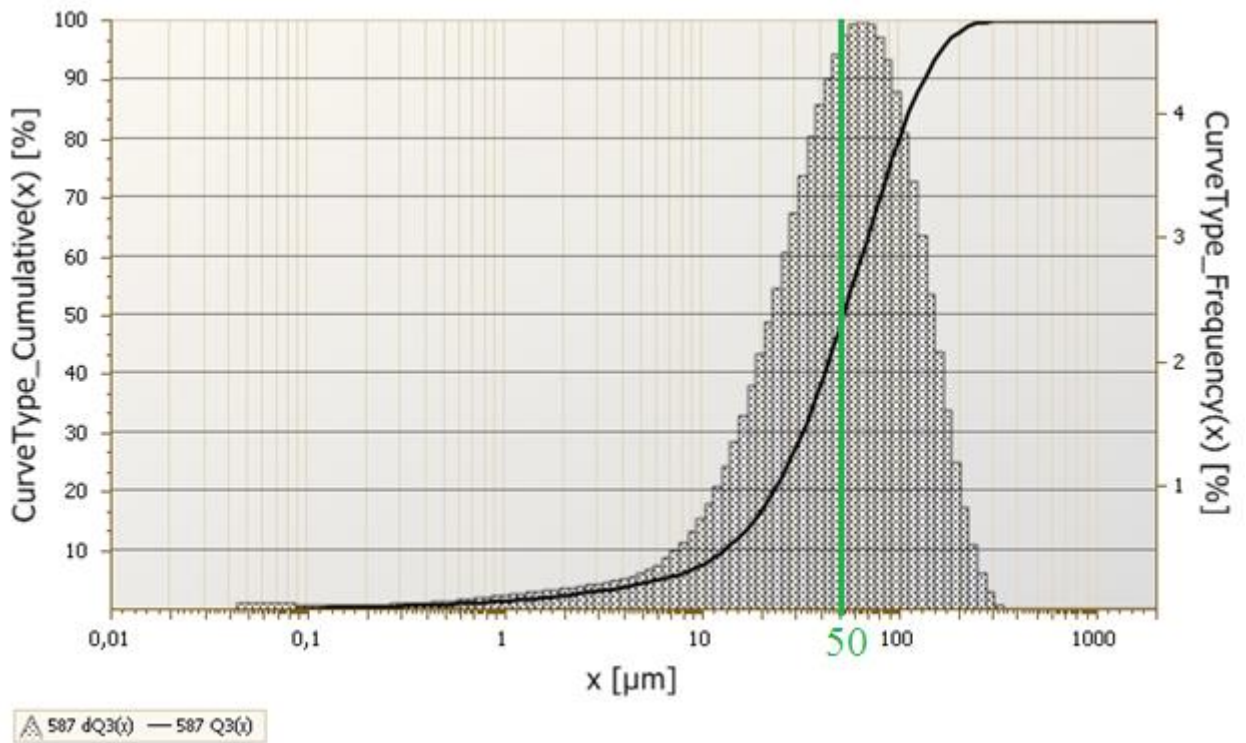
Obr. 27 - Přesítovaný popel - akát

Q3(x) %	x [μm]
5	9,7
10	14,5
25	24
50	40,1
75	65,8
90	100,4
95	127
99	184,2

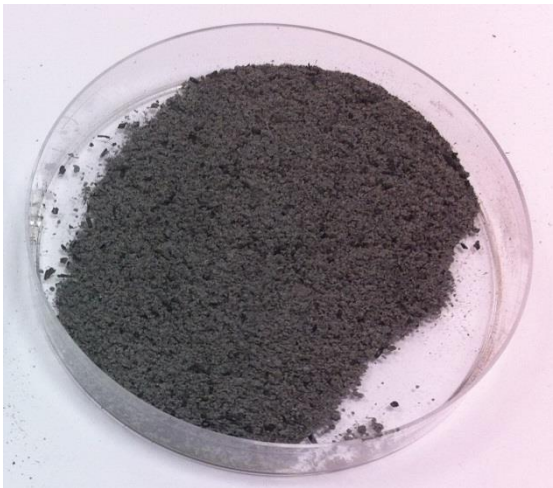
Tabulka 6. Velikost částic v procentuálním vyjádření - akát

Pro popel z akátu lze z grafu a tabulky vyčíst velikost největší částice, která měřila 200 μm, přitom 90 % částic se pohybovalo do hodnoty 100,4 μm. Nejmenější částice ve vzorku tvořily 5 % a dosahovaly hodnot do 9,7 μm. Pro hodnotu 50 μm lze z grafu odečíst hodnotu 60%, což znamená, že částice do této velikosti tvořilo právě 60 % vzorku a zbylých 40 % byly částice větší jak 50 μm. Na obrázku 26 lze vidět převážně jemnou skladbu částic, doplněnou místy o větší částice.

5.3.2 Švestka



Graf 3. Velikostní rozdělení částic - švestka



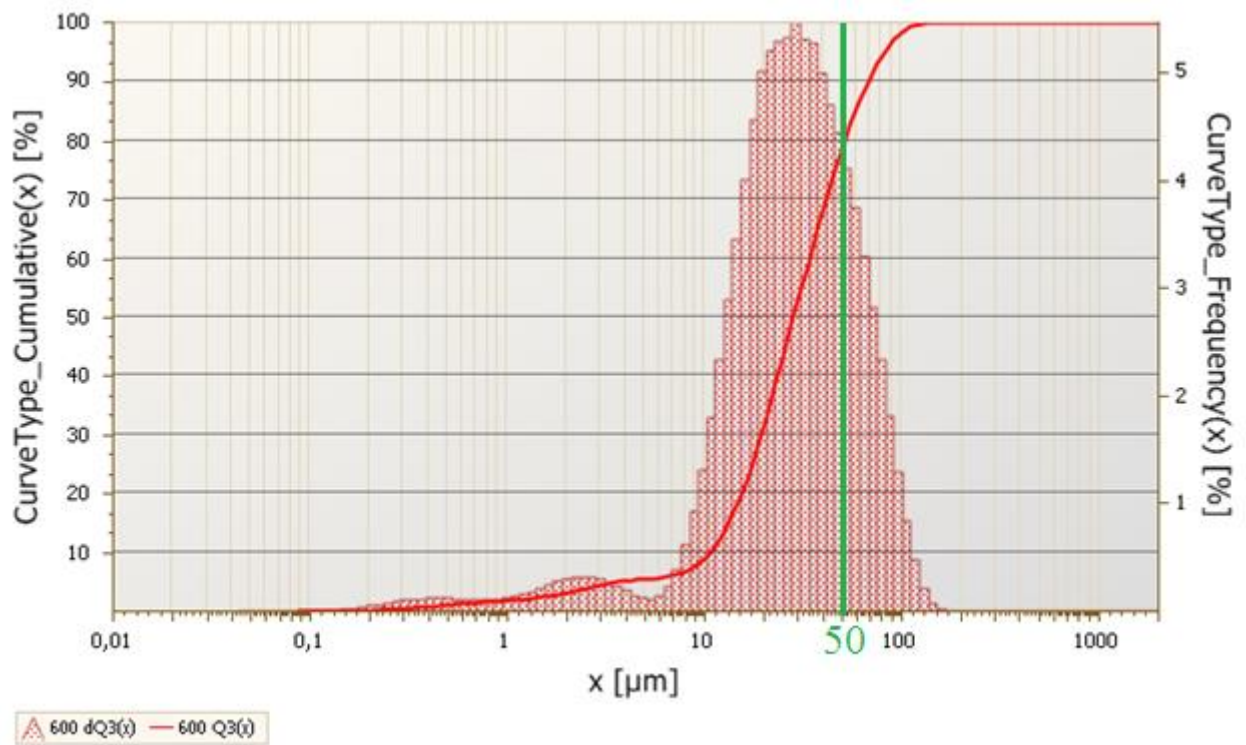
Obr. 28 - Přesítovaný popel - švestka

Q3(x) %	x [μm]
5	6,4
10	13,2
25	27,9
50	52,8
75	90
90	134,4
95	165
99	225,8

Tabulka 7. Velikost částic v procentuálním vyjádření - švestka

Z grafu a tabulky jsou patrné hodnoty největších a nejmenších částic, které jsou pro daný vzorek 225,8 μm a 0,3 μm. Na přiloženém obrázku je vidět hrubší struktura popele oproti ostatním a také 90 % částic ve vzorku byly do hodnoty 134,4 μm. Referenční hodnota 50 μm dosahuje 47 %. To potvrzuje domněnku, že popel ze švestky je hrubší oproti ostatním.

5.3.3 Buk 1



Graf 4. Velikostní rozdělení částic - buk 1



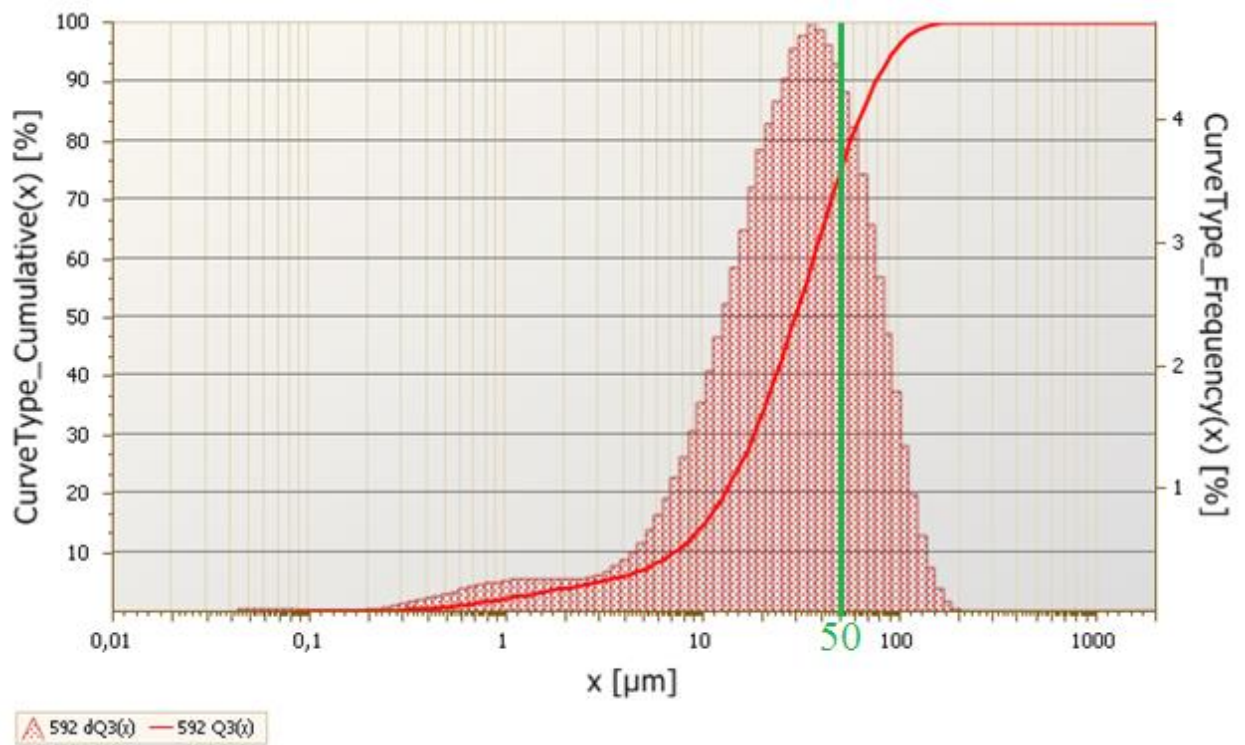
Obr. 29 - Přesítovaný popel - buk 1

Q3(x) %	x [μm]
5	3,9
10	10,9
25	17,7
50	28,7
75	46,7
90	68,5
95	82,9
99	110,2

Tabulka 8. Velikost částic v procentuálním vyjádření - buk 1

Popel z buku se vyznačoval jemnou strukturou, ale z grafu nelze přesně vyčíst hodnoty nejmenších částic, z důvodu zavlňení na začátku frekvenční křivky, která tak není v tomto intervalu příliš objektivní. Zmíněné zavlňení mohlo být způsobeno horší zastíněností laseru, nebo spojením některých částic ve větší, či usazením v přívodných hadicích k měřicí cele. Částice menší jak 82,9 μm byly ve vzorku zastoupeny v 90 %. Částic menších jak 50 μm tvořilo 82 %.

5.3.4 Smrk 1



Graf 5. Velikostní rozdělení částic -smrk 1



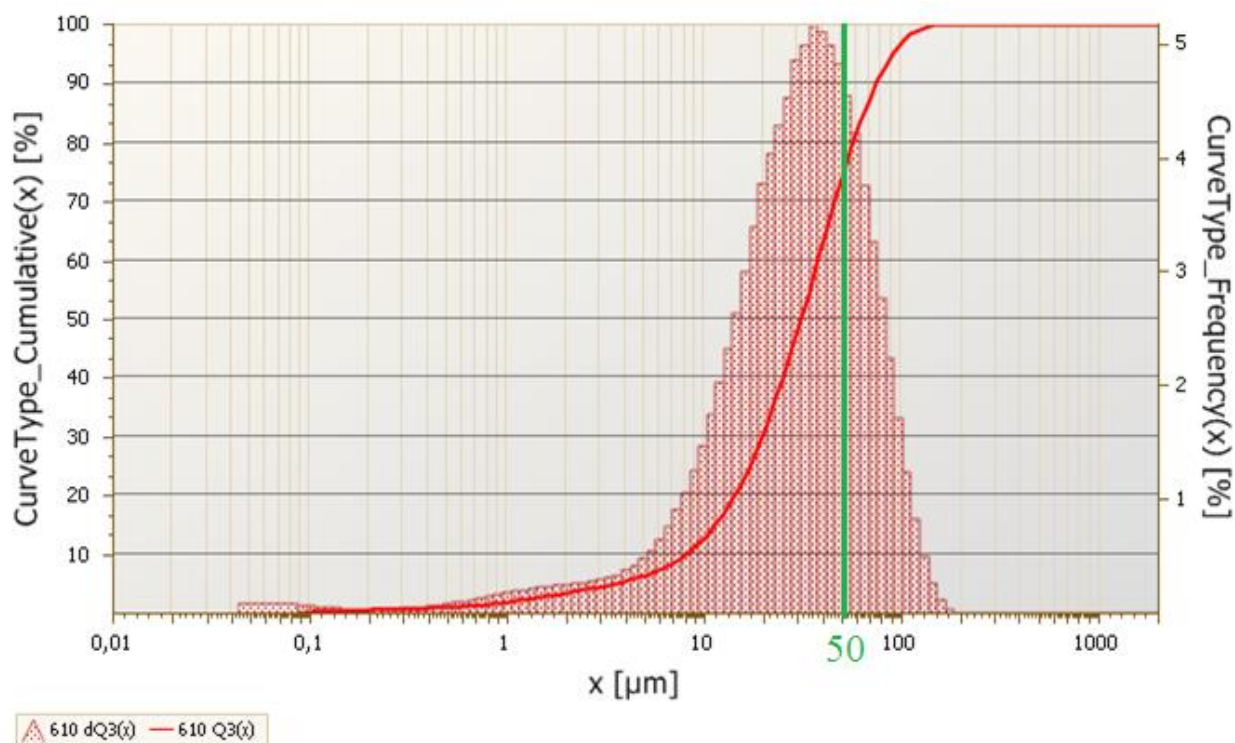
Obr. 30 - Přesítovaný popel - smrk 1

Q3(x) %	x [μm]
5	3,1
10	7,4
25	15,8
50	30
75	51,2
90	76,8
95	94,4
99	130

Tabulka 9. Velikost částic v procentuálním vyjádření - smrk 1

Popel ze smrku 1 je na první pohled hrubší než popel z buku 1. Nejmenší částice byly o velikosti 3,1 μm a ve vzorku se jich nacházelo do 5 %. Lze konstatovat, že téměř většina částic se pohybovala do velikosti 76,8 μm, zatímco 73 % částic je do velikosti 50 μm.

5.3.5 Buk 2



Graf 6. Velikostní rozdělení částic - buk 2



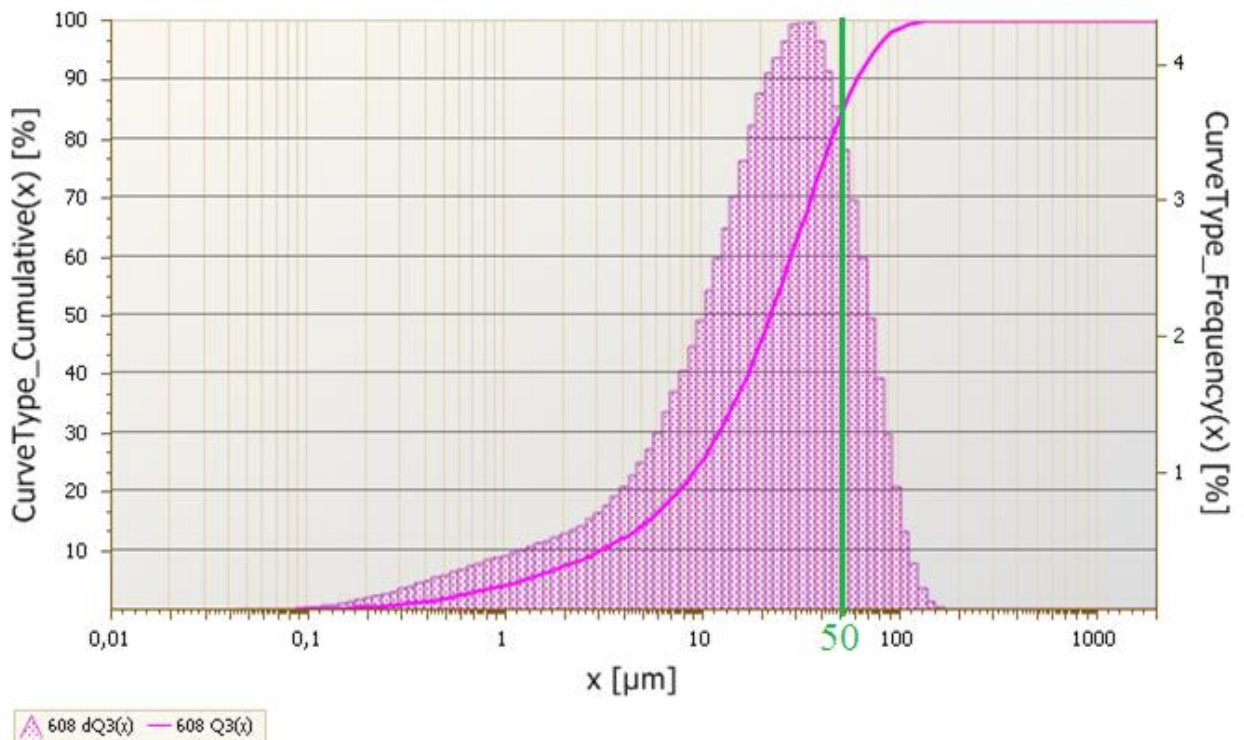
Obr. 31 - Přesítovaný popel - buk 2

Q3(x) %	x [μm]
5	3,6
10	8,3
25	17,2
50	31,4
75	51,6
90	75,3
95	91,5
99	123,8

Tabulka 10. Velikost částic v procentuálním vyjádření - buk 2

Při srovnání obrázku buku 1 (obr. 28) je vidět, že vzorek buku 2 je o něco hrubší a nacházejí se v něm místy větší částice. Největší částice v měřeném vzorku měřila 190 μm, přičemž 90 % částic nepřesáhlo hodnoty 75,3 μm. Pro referenční hodnotu zjistíme z grafu hodnotu 73 %.

5.3.6 Smrk 2



Graf 7. Velikostní rozdělení částic - smrk 2



Obr. 32 - Přesítovaný popel - smrk 2

Q3(x) %	x [μm]
5	1,3
10	3,1
25	10
50	22,5
75	40,6
90	61,7
95	76
99	104,8

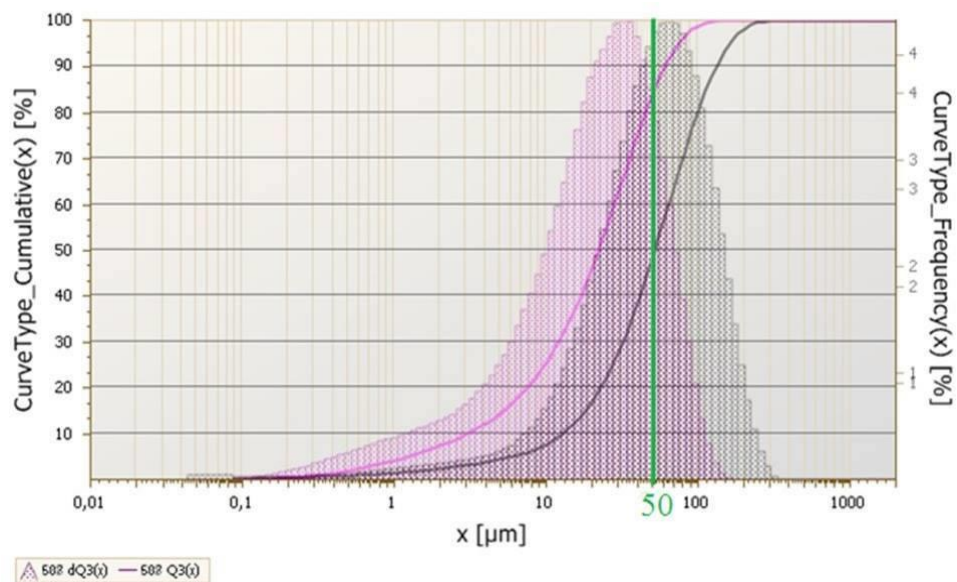
Tabulka 11. Velikost částic v procentuálním vyjádření - smrk 2

Při pohledu na obrázek popele ze smrku 2 vidíme převážně jemné složení s minimálním zastoupením velkých částic. Ze všech měřených popelů se jedná o nejjemnější, kdy 5 % ze vzorku měřilo méně než 1,3 μm, 90 % částic ve vzorku bylo menších jak 61,7 μm. Tato hodnota je ze všech měřených vzorků nejmenší. Pro referenční hodnotu bylo odečteno z grafu 85 %. Tento údaj potvrzuje velké množství malých částic v tomto popelu.

5.4 Zhodnocení výsledků

Před praktickým měřením jsem se domníval, že účinnost krbových vložek bude mít vliv na velikosti částic nacházejících se v popelu. To je možné potvrdit z tabulky 5., ale pouze pro částice viditelné okem, v oblasti mm. Tyto částice vznikly neúplným spálením paliva (nedokonalé spalování). To může být zapříčiněno nedostatečným množstvím spalovacího vzduchu, nebo konstrukcí krbové vložky. Často jsou tyto částice označovány jako tzv. uhlíky. Pro částice v mikrometrové oblasti nelze potvrdit vliv účinnosti krbové vložky na velikost částic. Tyto velmi malé částice tvoří výhradně směsi kysličníků a minerálních látek a při spalování za daných podmínek, při kterých jsem měření prováděl, již nelze dosáhnout zmenšení, zjemnění částic konkrétního druhu paliva. Toto vychází z porovnání hodnot například smrku 1 a smrku 2. Ovšem pro komplexní potvrzení či vyvrácení vlivu krbové vložky na velikost částic v popelu bychom měli zanalyzovat mnohem více vzorků za přibližně stejných podmínek.

Dále z naměřených hodnot a grafů vyplývá následující závěr. Jako nejjemnější (nejmenší velikost částic) ze všech proměřovaných vzorků byl popel ze smrku 2, který při srovnání námi stanovené referenční hodnoty (50 μm) dosahoval 86 %. To znamená, že jen 14 % částic bylo větších jak 50 μm . Naopak popel s největšími částicemi je dle výsledku popel hrušky, kde odečtená hodnota na distribuční křivce pro referenční hodnotu nedosáhla ani hodnoty 50 %. Tento údaj vypovídá o hrubosti popele dostatečně. Popel ze švestky se též vyznačoval největším množstvím nepřesítovaných částic (uhlíků) viz. tabulka 5. Toto mohlo být způsobeno tvrdostí a větší náchylností ovocných dřev při spalování ke kroucení a praskání dřeva



Obr. 33 - Srovnání velikosti částic nejjemnějšího popele (růžový graf) a nejhrubšího popele (černý graf)

5.5 Budoucnost ve využití popelů z kotelen na biomasu

Jak již bylo řečeno, množství vzniklého popele v krbové vložce není příliš velké, ale ve větších zařízeních, či provozech lze popel dále využívat, distribuovat, i když se jedná v podstatě o odpadní produkt spalování. Jako příklad bych uvedl centrální výtopnu na spalování biomasy ve městě Žlutice, jihovýchodní část okresu Karlovy Vary, kde je instalovaný tepelný výkon 7,9 MW. Jako palivo se v kotlích s účinností 82 - 85 % používá štěpka a obilná sláma. Celkem se tak ročně spálí cca 5000 t biomasy. Roční produkce popele činí cca 100 t a tento popel využívají místní zemědělci jako hnojivo. Popel ze dřeva a biomasy obsahuje cenné minerály pro půdu, jako jsou vápník - Ca, draslík - K, fosfor - P. To s sebou nese i ekonomické zhodnocení. Lze uvažovat, že v tuně popele je obsaženo celkové množství hlavních živin přibližně za 7 tisíc Kč. To představuje snížení nákladů jednak pro zemědělce, tak hlavně pro výtopnu, která by jinak vzniklý popel musela skládkovat. Výdaje spojené s uskladněním 1 tuny se pohybuje od 800 do 1400 Kč. Dále je možné biomasový popel aplikovat přímo do kompostů. Ovšem jeho použití má určitá pravidla. Před větší aplikací bychom měli znát zastoupení nebezpečných prvků v něm obsažených a pH půdy. Toto je jeden z možných budoucích směrů, kterým se nakládání s popelem z biomasy může vyvinout při větší výstavbě výtopen na biomasu.

Další možné využití je například v neutralizaci skládek. Třebíč, která je zároveň mým rodištěm, je z větší části vytápěná biomasou. Výkon lokálních tepláren je 27MW_t. Vzniklý popel se nejen distribuuje zpět k zemědělcům na hnojení, ale také pomáhá neutralizovat pH přílehlé skládky komunálního odpadu. Rozloha skládky je 7 ha a na této ploše se počítá s uskladněním 600 000 m³ odpadu. Prostředí skládky je kyselé (pH < 7) a pro optimalizaci rozkladných procesů ve skládce a tvorbě skládkového plynu (je vytvářen při rozkladu biologických složek) je ideální prostředí neutrální, až mírně zásadité (pH 6,5 - 8). Popel je silně zásaditý (pH okolo 12), a tak přispívá k zajištění správných pochodů ve skládce. Vzniklý skládkový plyn (bioplyn) se skládá především z metanu - CH₄ a oxidu uhličitého - CO₂ a dále se dá využívat k výrobě tepla, nebo elektrické energie.

6. ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem se zabýval analýzou popelovin z krbové vložky. Na začátek práce jsem pro seznámení s tématem zařadil popis krbových vložek a možnosti jejich použití. Další kapitola v mé práci je věnovaná převážně spalování. V tomto oddílu se zabývám jednotlivými etapami tohoto procesu, až po samotnou tvorbu popele. V této části se lze také dočíst o legislativních předpisech spojené s popelem v České republice a jejich porovnání s ostatními státy. Na konec je zařazena budoucnost ve využití popele z kotelen na biomasu. Navazující kapitola je věnovaná možnostem měření velikosti částic, kde se lze dozvědět principy jednotlivých metod, jejich úskalí a vhodnost pro měření popelů.

Samotná praktická část začala spalováním paliv v krbových vložkách. Jednotlivé druhy popele byly odebrány přímo z popelníků a analyzovány na dostupných přístrojích. Nejprve na síťovém analyzátoru. Přesítování jednotlivých vzorků bylo nutné k oddělení větších částic jak 1 mm obsažených v popelu, aby nedošlo k poškození laserového analyzátoru, na kterém jsem v měření pokračoval. Na tomto přístroji jsem také opakovat měření, z důvodu vyšší kvality výsledku. Výsledné hodnoty jsem poté zpracoval a k jednotlivým druhům popele jsem do bakalářské práce vybral vždy graf s hodnotami, kde byl co nejideálněji zastíněn laserový paprsek. Zhodnocení výsledků je uvedeno v samostatné kapitole.

Seznam použité literatury:

- [1] KOLONIČNÝ, Jan, Silvie PETRÁNKOVÁ ŠEVČÍKOVÁ a Jiří HORÁK. *Technologie krbových kamen a krbových vložek*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 120 s. ISBN 978-80-248-2254-9.
- [2] VLK, Václav. *Krby II: kompletní sestavy v moderních interiérech*. 1. vyd. Praha: Grada, 1999, 150 s., [6] s. příl. ISBN 80-7169-738-9.
- [3] NOSKIEVIČ, Pavel a Radek PILCH. *Spalování dřeva v malém ohništi*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009, 80 s. ISBN 978-80-248-1889-4.
- [4] SKÁLA, Zdeněk a Tadeáš OCHODEK. *Energetické parametry biomasy: projekt GAČR 101/04/1278*. Vyd. 1. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007, 91 s. ISBN 978-80-214-3493-6.
- [5] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978, 414 s.
- [6] BUDAJ, Florian. *Parní kotle: podklady pro tepelný výpočet*. 3. nezm. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1986, 288 s.
- [7] TLUSTOŠ, Pavel. *Monitoring kvality popelů ze spalování biomasy: certifikovaná metodika*. Vyd. 1. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, 2012, 22 s. ISBN 978-80-213-2327-8.

Seznam použitých internetových zdrojů:

- [8] Grily Weber, krbová kamna: Slovník pojmů. *Vermikulit* [online]. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://www.kamna-grily.cz/vermikulit/t-355/>
- [9] ROMOTOP s.r.o.: *Možnosti vytápění krbovými kamny a vložkami - první část*. Tzb-info.cz [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://vytapani.tzbinfo.cz/zdroje-tepla/6940-moznosti-vytapani-krbovymi-kamny-a-vlozkami-prvnicast>
- [10] ROMOTOP s.r.o.: *Možnosti vytápění krbovými kamny a vložkami - první část*. Tzb-info.cz [online]. [cit. 2014-02-11]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/6976-moznosti-vytapani-krbovymi-kamny-a-vlozkami-pokracovani>
- [11] EKOMPLEX s.r.o. *Sálavé krby s krbovou vložkou* [online]. [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: <http://www.krbari-kamnari.cz/krby/salave-krby.php>
- [12] HORÁK, Jiří a Petr KUBESA. *O spalování tuhých paliv v lokálních topeništích (I)*. Tzb-info.cz [online]. 21. 5. 2012. vyd. [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8618-o-spalovani-tuhych-paliv-v-lokalnich-topenistich-1>

- [13] ZÁMOSTNÝ, Petr a Ladislav KURC. *Vliv podmínek a složení suroviny na pyrolýzu dřevní hmoty*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Ústav organické technologie: 2011 [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: http://www.chemickelisty.cz/docs/full/2011_06_458-466.pdf
- [14] HORÁK, J. *Úvod do teorie spalování tuhých paliv*. Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupné z: <http://vec.vsb.cz/userfiles/pdf/studijni-materialy/spalovani-tuhych-paliv.pdf>
- [15] VOLÁKOVÁ, P. *Prvkové složení biomasy*. Biom.cz [online]. 08. 09. 2010. vyd. [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/prvkove-slozeni-biomasy>. ISSN: 1801-2655.
- [16] GAS KOMPLET s.r.o. *Topení pohledem ekonoma* Tzb-info.cz [online]. 15.4.2013. vyd. [cit. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/9766-topeni-pohledem-ekonoma-topime-drevem-iii-dil>
- [17] BALÁŠ, M. *Graf závislosti výhřevnosti biomasy na vlhkosti*. Biom.cz [online]. 24. 1. 2011. vyd. [cit. 2014-02-02.] Dostupné z: <http://biom.cz/cz/obrazek/graf-zavislosti-vyhrevnosti-biomasy-na-vlhkosti>
- [18] GÜNWALDOVÁ, Veronika. *Velikost a tvar částic*. [online]. [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/min/sites/default/files/tvar%20a%20velikost%20castic%20VSCHT.pdf>
- [19] TUK. *Analýza velikosti částic*. [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://isr.ic.cz/dokumenty/Monitorovanie%20zivotneho%20prostredia%202/5.pdf>
- [20] PABST, W a E. GREGOROVÁ. *Charakterizace částic a částicových soustav* [online]. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze: 2007 [cit. 2014-02-19]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/sil/keramika/Characterization_of_particles/CPPS%20_Czech%20version_.pdf
- [21] HRUŠKA, K. *O topení dřevem*. BSPholding.cz [online]. [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://www.bspholding.cz/proc.html>
- [22] EKOMPLEX s.r.o. *Krby s krbovou vložkou* [online]. [cit. 2014-02-04]. Dostupné z: <http://www.krbari-kamnari.cz/krby/krby-s-krbovou-vlozkou.php>
- [23] KUBESA, Petr a Jiří HORÁK. *Proces hoření kusového dřeva*. Tzb-info.cz [online]. 18.6.2012. vyd. [cit. 2014-02-08]. Dostupné z: <http://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva>
- [24] POSTNOVA GmbH. *The Field-Flow Fractionation Principle* [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.postnova.com/general-theory.html>

Seznam použitých zkratk a symbolů:

Symbol	Jednotka	Popis
h^r	[%]	množství hořlaviny v původním stavu paliva
A^r	[%]	množství popelovin v původním stavu paliva
W^r	[%]	množství vody v původním stavu paliva
Q_i^r	[J/kg]	výhřevnost konkrétního druhu paliva
Q_s	[J/kg]	spalné teplo konkrétního druhu paliva
Q	[J]	teplo
v	[m/s]	rychlost
d	[m]	průměr částice
ρ_P	[kg/m ³]	hustota částice
ρ_L	[kg/m ³]	hustota kapaliny
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
η_L	[Pa*s]	dynamická viskozita kapaliny
ω	[rad/s]	úhlová rychlost
r	[m]	poloměr otáčení
η	[%]	účinnost