VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

JEMNÉ ČÁSTICE EMITOVANÉ PŘI LABORATORNÍM SPALOVÁNÍ BIOMASY
FINE PARTICLES EMITTED FROM LABORATORY COMBUSTION TESTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR
Ondřej Hájek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR
doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	**Ondřej Hájek**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok:	2017/18

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:

Jemné částice emitované při laboratorním spalování biomasy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je věnována problematice emise jemných částic při spalování biomasy. Práce je z významné části experimentální a při jejím zpracování bude využito přístrojové vybavení Energetického ústavu. Vzorky paliv budou sledovány při spalovacím procesu za současné identifikace velikosti a koncentrace jemných částic ve spalinách. Práce bude doplněna rešeršním popisem problematiky produkce a růstu jemných částic.

Cíle bakalářské práce:

– Stručně představit parametry ovlivňující vznik jemných částic.
– Popsat použitou experimentální aparaturu.
– Experimentálně stanovit koncentraci a velikostní distribuci částic emitovaných při laboratorním spalování biomasy.
– Vyhodnotit a komentovat naměřené výsledky.

Seznam doporučené literatury:

KANDLIKAR, S., Masahiro, S. a DHIR, V., Handbook of phase change: boiling and condensation. Philadelphia, PA: Taylor, xlvii, 738 p., 1999. ISBN 15-603-2634-4.

WEINHEIM, W., Handbook of combustion, 2010. ISBN 9783527324491.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku emisí jemných částic vznikajících při laboratorním spalování biomasy. V rešeršní části je pojednáno o obecných vlastnostech a způsobech zpracování biomasy. Dále se pak práce zabývá konkrétně spalováním biomasy, z čehož vyplývá problematika jak emisí plynných, tak i emisí jemných částic. Hlavní náplní práce je však spojení experimentálního měření termogravimetrické analýzy s měřením velikosti a počtu částic od průměru 18 do 550 nanometrů. Na závěr je uvedeno vyhodnocení naměřených dat z měření čtyř velikostí vzorků smrkového dřeva.

Klíčová slova

Biomasa, spalování, termogravimetrická analýza, emise jemných částic, smrk

ABSTRACT

This bachelor thesis is aimed at fine particles emitted from laboratory combustion tests of biomass. The theoretical part of this thesis is about common features and usual ways of using biomass. After this broad chapter there is specifically described combustion and all its products including emission of gasses and fine particles. The main task of this thesis is about an experiment combining two analyses. First is the thermogravimetric analysis and the second is measuring size and number of fine particles in the range of 18 to 550 nanometers. The final chapter is about evaluation of measured results from 4 different spruce samples.

Key words

Biomass, combustion, thermogravimetric analysis, emission of fine particles, spruce

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HÁJEK, O. *Jemné částice emitované při laboratorním spalování biomasy.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 55 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Jemné částice emitované při laboratorním spalování biomasy** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 22. 5. 2018 …….

Ondřej Hájek

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Mé poděkování dále patří panu Bc. Tomáši Sitkovi za pomoc při zpracování dat. V neposlední řadě také děkuji rodině za podporu při studiu.

OBSAH

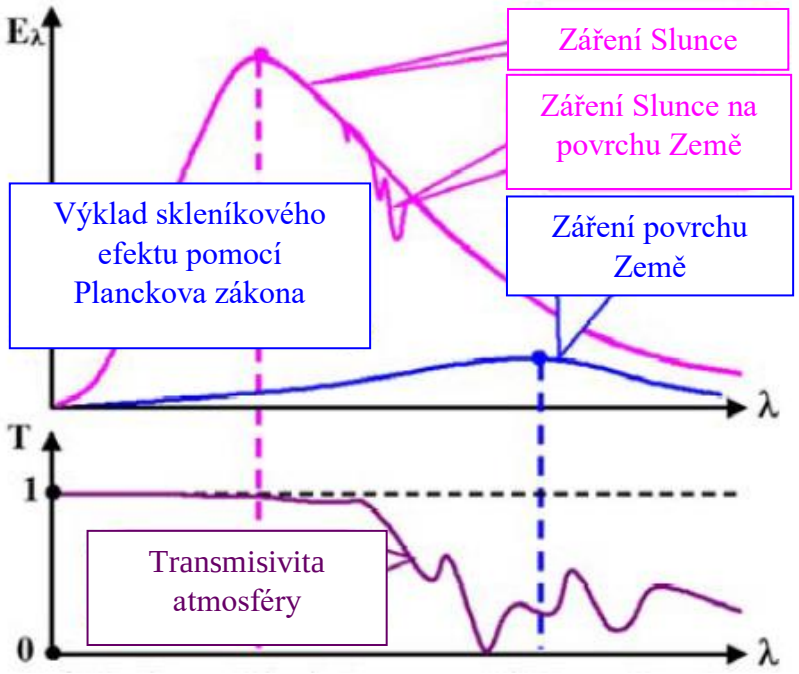
1 ÚVOD 15
2 BIOMASA 17
2.1 Popis biomasy 17
2.2 Fotosyntéza 17
2.3 Základní členění 17
2.3.1 Rostliny pěstované pro přímé využití v energetice 17
2.3.2 Biomasa získaná z odpadních produktů 18
2.4 Členění dle vlastností 18
2.5 Technologie pro využití biomasy 19
2.5.1 Bioplynové stanice 19
2.5.2 Kapalná biopaliva 20
2.5.3 Tepelný rozklad 22
3 SPALOVÁNÍ BIOMASY 25
3.1 Složení biomasy 25
3.2 Tepelný rozklad biomasy 26
3.3 Chemie spalování 27
3.3.1 Spalování uhlíku 27
3.3.2 Spalování vodíku 27
3.3.3 Spalování síry 27
3.3.4 Určení množství kyslíku 28
3.4 Emise plynné 28
3.4.1 Oxid uhličitý CO_2 28
3.4.2 Oxid uhelnatý CO 29
3.4.3 Oxid siřičitý SO_2 a Oxid sírový SO_3 29
3.4.4 Oxidy dusíku NO_x 30
3.4.5 Organické látky 30
3.5 Emise jemných částic 31
3.5.1 Dělení 31
3.5.2 Zdravotní rizika spojená s jemnými částicemi 32
3.5.3 Popis vzniku jemných částic 33
3.5.4 Obsažení jemných částic v atmosféře v České republice 35

4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ 37
4.1 Popis experimentální aparatury 37
4.1.1 TGA 37
4.1.2 Měření částic 38
4.2 Příprava měření 39
4.2.1 Příprava vzorku 39
4.2.2 Určení hodnoty vlhkosti gravimetrickou metodou 40
4.3 Termogravimetrická analýza 40
4.3.1 Srovnání 3 malých vzorků 43
4.3.2 Srovnání měření velkých vzorků smrku a buku 43
4.4 Vyhodnocení dat z přístroje pro měření částic 44
4.4.1 Množství částic v závislosti na průměru pro teplotu 250 °C 47
4.4.2 Množství částic v závislosti na průměru pro teplotu 400 °C 47
4.4.3 Srovnání buku a smrku 48
5 ZÁVĚR 49
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK 53
SEZNAM OBRÁZKŮ 54
SEZNAM TABULEK 55

1 ÚVOD

Snahou člověka bylo již od pradávna zkrotit přírodní živly a získat z nich energii, kterou by mohl dále využívat. Ať už se jednalo o člověka z pravěku, který využíval chemických reakcí při hoření k zahřátí a ohřevu potravy, nebo později pak v době bronzové a železné, kdy lidé využívali hoření pro tavbu kovů a výrobu prvních nástrojů a zbraní. Nevyužívalo se však jen tepelné energie získané hořením. V historii se setkáváme i s případy využití energie tekoucí vody, například ve vodních mlýnech, či využití energie proudícího vzduchu, lodní dopravou počínaje a větrnými mlýny konče.

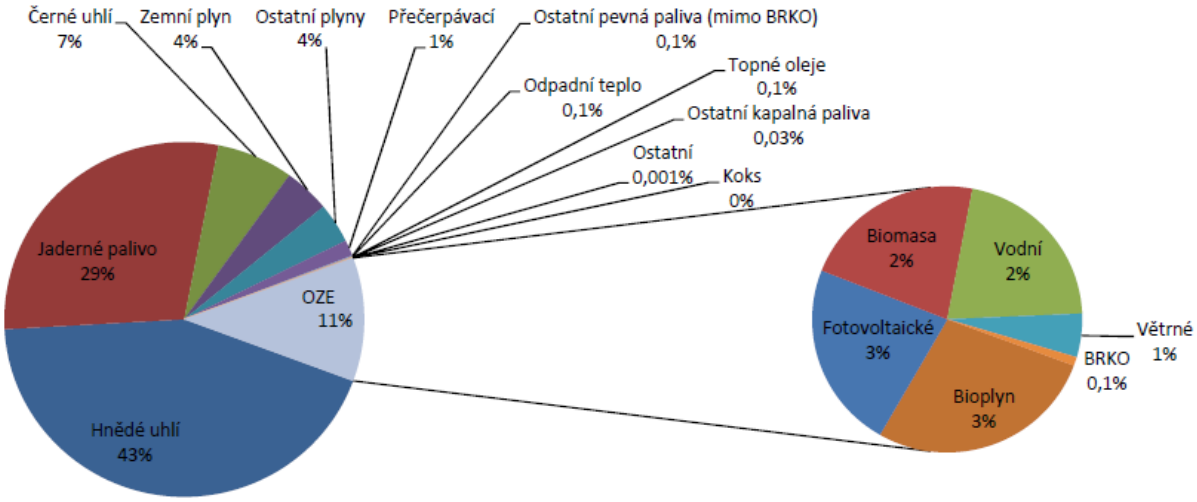
S rostoucí populací a novými technologiemi bylo však zapotřebí stále větší množství energie, pro zajištění základních potřeb lidí, tzn. vytápění, výroba, doprava, obstarání potravy atd. Po nástupu průmyslové revoluce v 18. století, kdy byl vynalezen první parní stroj, a tedy výroba páry při spalování, došlo k razantnímu usnadnění uspokojování výše zmíněných potřeb. Parostroje umožnily přechod od neefektivních manufaktur ke strojové výrobě, a tedy významnému rozvoji průmyslu, což do té doby nebylo možné. Takovýto rozvoj za sebou však nechával četné následky. K výrobě páry se využívala především tepelná energie získaná při spalování uhlí. Muselo tedy docházet k těžbě a nenávratnému ničení povrchu a přírody v okolí dolů. Toto však nebyl z daleka jediný problém. Při spalování uhlí vzniká velké množství jemných částic přímo nebezpečných pro člověka a také skleníkových plynů v čele s CO_2 a dalších oxidů síry a dusíku, jejichž přílišné množství v atmosféře má za následek ohřev planety způsobený tzv. skleníkovým efektem, viz obr. 1.1:



Obrázek 1.1 – Vysvětlení skleníkového efektu [1]

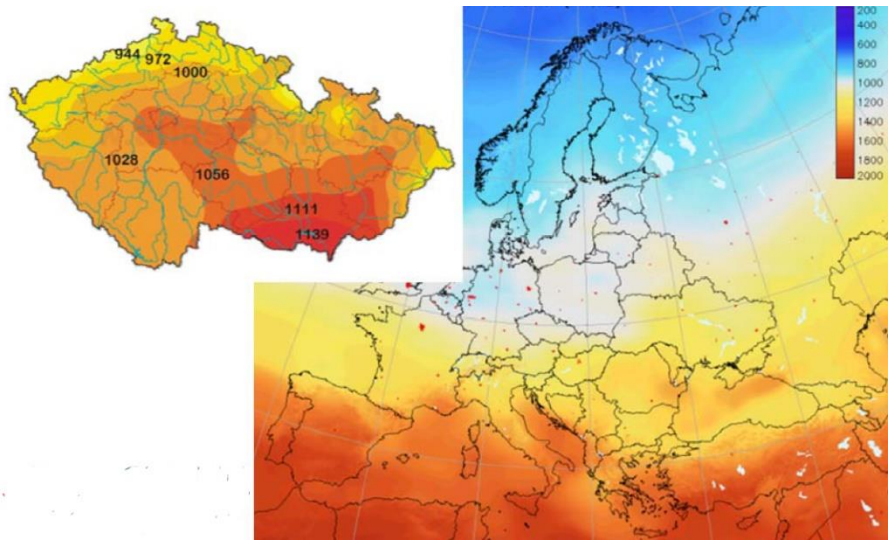
Sluneční záření o určité vlnové délce bez problému projde atmosférou, avšak záření, které se odrazí od zemského povrchu má jinou vlnovou délku a přes atmosféru díky špatné transmisivitě plynů v čele s CO_2 pro danou vlnovou délku již neprojde a odrazí se zpět k zemskému povrchu.

Když koncem 19. století začaly vznikat první elektrárny, jednalo se o generátory poháněné parním strojem, a tedy tepelnou energií získanou opět ze spalování uhlí. V průběhu 20. století byl parní stroj nahrazen turbínou, což dalo vzniknout prvním tepelným elektrárnám. [2] Tyto elektrárny zaznamenaly po druhé světové válce velký rozvoj a jak je patrné na obr. 1.2, do dnešní doby tvoří elektřina vyrobená při spalování černého i hnědého uhlí polovinu celé výroby na našem území.



Obrázek 1.2 – Podíl paliv na výrobě elektřiny (brutto) v roce 2016 [3]

Jak již bylo uvedeno, spalováním uhlí vzniká velké množství škodlivých látek, ať už plynných nebo pevných. Proto je v dnešní době snaha o snižování podílu uhelných elektráren a jejich nahrazování elektrárnami jadernými nebo na obnovitelné zdroje. Tzn. fotovoltaickými, větrnými, vodními, bioplynovými, či elektrárnami na biomasu. Vzhledem k našim geografickým podmínkám se při přechodu na obnovitelné zdroje energie nelze příliš mnoho spoléhat na fotovoltaickou energii, viz obr. 1.3. Do budoucna je pro naši republiku vhodnější se zaměřit na výrobu elektrické energie z jádra, větru a v neposlední řadě také z biomasy.



Obrázek 1.3 – Energie dopadající na zemský povrch za jeden rok (kWh/m^2) [1]

2 BIOMASA

2.1 Popis biomasy

Za biomasu lze považovat veškerý souhrn organické hmoty na Zemi, která se účastní koloběhu živin v biosféře [4]. V energetice je zajímavá především taková biomasa, ze které je možné získat energii ve formě tepla a tu dále různými způsoby přeměňovat na energii elektrickou, nebo ohřev domácnosti.

Mezi spalováním fosilních paliv a spalováním biomasy existuje mnoho výrazných rozdílů. Prvním z nich je velký obsah prchavých (nestálých) látek a malý obsah uhelnatých látek v biomase, což lze pozorovat velkým plamenem při hoření biomasy v porovnání s hořením uhlí. Druhým rozdílem je výhřevnost všech druhů biomasy oproti fosilním palivům. Zatímco výhřevnost biomasy se pohybuje v rozmezí 14 až 28 MJ/kg (dřevo má například výhřevnost 15 MJ/kg), výhřevnost kvalitního černého uhlí dosahuje hodnot až 30 MJ/kg. Tento rozdíl lze pozorovat měřením teplot při hoření. Spalováním fosilních paliv se dosahuje vyšších teplot než u biomasy. Za třetí rozdíl můžeme považovat velký obsah prchavých látek v popelu z biomasy (draslík), z nichž velká část se uvolňuje při hoření a vytváří jemné částice. [5]

Zásadním rozdílem (z hlediska tvorby a zpracování oxidu uhličitého) oproti spalování fosilních paliv, kterým se vyznačuje biomasa, je v podstatě neutrální bilance při uvolňování oxidu uhličitého do atmosféry. Zatímco CO_2 vzniklý při hoření biomasy jsou rostliny schopny opět zpracovat při fotosyntéze, při spalování fosilních paliv se uvolňuje uhlík, který byl dlouhodobě uložen v půdě a nyní ho příroda v takovém množství není schopna zpracovat, a tak se hromadí v atmosféře jako oxid uhličitý a způsobuje globální oteplování. [6]

2.2 Fotosyntéza

Velice významným procesem v přírodě, díky kterému jsme schopni využívat biomasu je fotosyntéza, při které dochází k přeměně energie ze slunečního záření, vody a oxidu uhličitého na glukózu a kyslík [7]:

$$6\,H_2O + 6\,CO_2 + sluneční\ záření \rightarrow\ C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 \qquad (1)$$

2.3 Základní členění

2.3.1 Rostliny pěstované pro přímé využití v energetice

Do této kategorie spadají dřeviny a byliny, které jsou účelově pěstovány a poté využívány k energetickému využití.

V podkategorii dřevin se jedná především o takzvané rychle rostoucí dřeviny. Druhově to jsou vrby, topoly (obr. 2.1), olše, akáty a další. Hlavní výhodou těchto dřevin je velký hmotový přírůstek oproti ostatním stromům. Doba pěstování těchto dřevin se pohybuje do 10 let. Výnosy v podmínkách naší republiky mohou vyšplhat až k 60 t/ha. [8]

Mezi nedřevnaté rostliny řadíme jednak trávy (chrastice, sveřep bezbranný, sloní tráva – viz obr. 2.2) a jednak jedno a víceleté byliny (konopí seté, sléz přeslenitý, jestřabina). Z této skupiny bylin se jeví jako nejzajímavější sloní tráva z hlediska schopnosti zpracování vzdušného CO_2. Spolu s vodou a slunečním zářením vytváří velké množství organické hmoty (podle podnebí v našich podmínkách 25 t/ha; v tropech až 80 t/ha), kterou lze poté energeticky využít. Výhodou sloní trávy je možnost každoroční sklizně, nižší náchylnosti k nemocem. Naopak nevýhodou při spalování je vyšší obsah minerálních látek, a tudíž větší objem popelu. [9,10] Dále pak lze pro energetické účely přímo pěstovat cukrovou řepu nebo brambory, resp. řepku olejnou, pro výrobu ethylalkoholu, resp. methylesteru. Výnosy z jednotlivých typů nedřevnatých rostlin je vidět v tab. 2.1:

Tabulka 2.1 – Výnosy suché hmoty u vybraných typů plodin [10]

Rostliny	**Výnos (t/ha)**	**Rostliny**	**Výnos (t/ha)**
Jednoleté:		Vytrvalé:	
Konopí	12,05	Křídlatka	37,50
Hyso	19,33	Šťovík krmný	43,00
Čirok cukrový	14,77	Sléz topolovka	13,40
Čirok zrnový	9,83	Pajasan žláznatý	16,97

Obrázek 2.1 – Alej rychle rostoucích topolů [11]

Obrázek 2.2 – Sloní tráva [9]

2.3.2 Biomasa získaná z odpadních produktů

Z rostlinné výroby – zemědělské zbytky z prvovýroby, tzn. sláma a otruby z obilí, kukuřice, řepky. Dále pak štěpky a nadrcené dřeviny vzniklé při krajinných úpravách. Využívají se hlavně k přímému spálení, nebo se přeměňují na biopaliva.

Z živočišné výroby – hnůj, močůvka, kejda, tzn. živočišné odpady z chovů, statků a družstev. Dále se přeměňují na bioplyn, který se poté spaluje.

Lesní odpady = dendromasa – odpady vzniklé při kácení v lese, tzn. především větve. Dále pak pařezy, piliny, odřezky. Přímo se spalují.

Organický komunální odpad – biologicky rozložitelné odpady z měst a obcí, tzn. kaly z čistíren odpadních vod, zbytky potravin, tráva. Především se z nich dělá bioplyn.

Organický průmyslový odpad – biologicky rozložitelné odpady vzniklé v průmyslové výrobě, tzn. odpady z jatek, mlékáren, lihovarů, cukrovarů. [4]

2.4 Členění dle vlastností

Dalším možným členěním je rozdělení podle vlastností, a to na suchou biomasu (přímo spalitelná), mokrou (pro výrobu bioplynu) a speciální – oleje, škrobové plodiny (na bionaftu, líh)

2.5 Technologie pro využití biomasy

Tabulka 2.2 – Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [10]

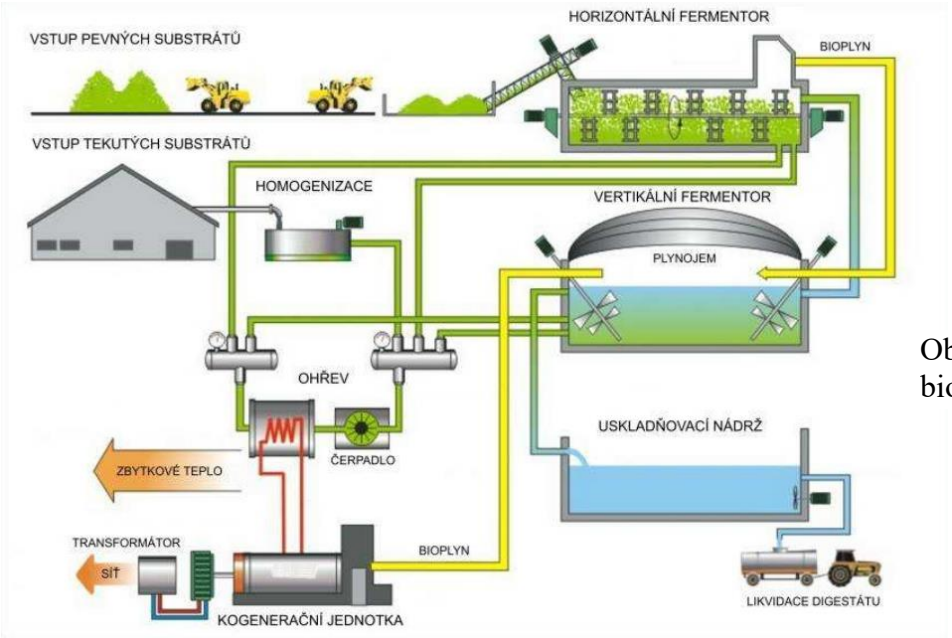
Typ konverze	Technologie	Produkty	Výstupy
Termochemické přeměny (suché procesy)	Spalování		Teplo, elektřina
	Zplyňování	Olej, plyn, dehet, methan, čpavek	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Rychlá pyrolýza		
Biochemické procesy	Anaerobní fermentace	Bioplyn, methan	Elektřina, teplo, pohon vozidel
	Alkoholové kvašení	Ethanol	Pohon vozidel
Fyzikálně-chemické přeměny	Esterifikace	Bionafta	Pohon vozidel

V praxi se nejvíce využívá pro suchou biomasu spalování, pro mokrou biomasu je to anaerobní fermentace v bioplynových stanicích a alkoholové kvašení na výrobu bioetanolu. Na výrobu bionafty se používá esterifikace. Všechny typy zpracování jsou přehledně uvedeny v tabulce 2.2.

2.5.1 Bioplynové stanice

Princip bioplynové stanice na obr. 2.3 spočívá v zahřátí a míchání kapalné směsi biomasy bez přístupu kyslíku, přičemž dochází k rozkladu organické hmoty a primárně vzniká bioplyn, který se dále odchytává a čistí. Takto vzniklý plyn se poté spaluje v kogenerační jednotce za vzniku jak elektřiny, tak i tepla. Při rozkladu směsi biomasy vzniká také tzv. digestát, což je kapalina, která se následně využívá v zemědělství jako hnojivo. [12] Zbytkové teplo lze poté distribuovat do sítě lidem, nebo ho využít při ohřevu hospodářských budov (skleníků, kravínů…)

Výhodou bioplynových stanic je vytváření elektrické energie a tepla pomocí obnovitelných zdrojů energie, což napomáhá snižovat objem skleníkových plynů v atmosféře. Mezi nevýhody patří zápach v okolí bioplynových stanic a také fakt, že se mnohdy pěstují plodiny na polích přímo pro bioplynové stanice. Z těchto plodin je významná kukuřice, při jejímž nevhodném pěstování dochází k nenávratné erozi půdy.



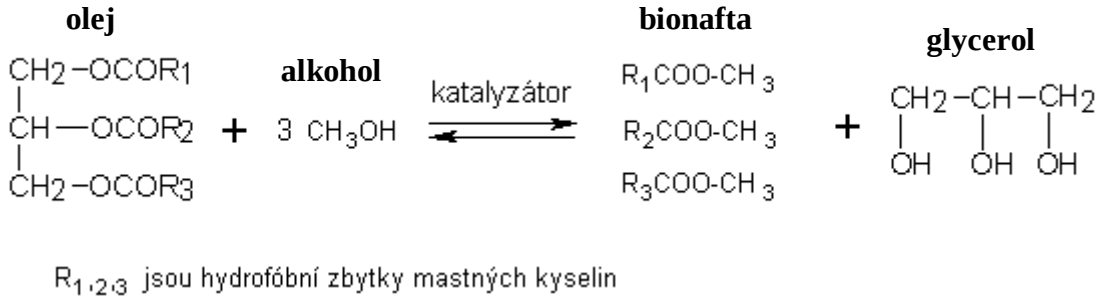
Obrázek 2.3 – Schéma bioplynové stanice [13]

2.5.2 Kapalná biopaliva

Biopalivem rozumíme takové palivo, které je vyrobené z biomasy. Z této skupiny paliv jsou nejvýznamnější především bionafta a bioetanol, dále se sem pak řadí vodík, metan, metanol. Biopaliva hrají v dnešní době významnou roli, a to hlavně z důvodu nařízení Evropského parlamentu z roku 2003, ve kterém stojí, že členské státy Evropské unie musí do roku 2020 nahradit 20 % tradičních pohonných hmot alternativními palivy. Prakticky se toto nařízení dodržuje tak, že se biopaliva míchají s klasickými. A to tak, že nafta obsahuje 6 objemových % bionafty a benzín obsahuje 4,1 objemových % bioetanolu. [14]

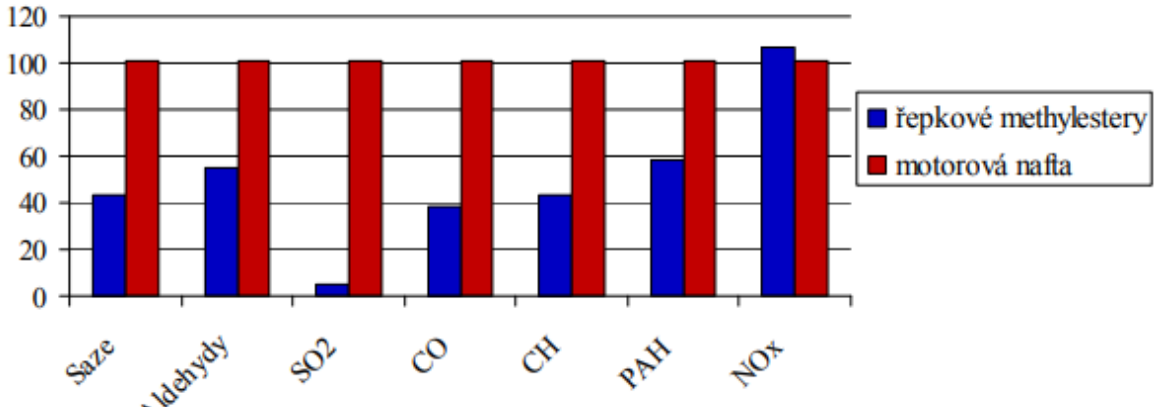
V dnešní době existují v podstatě 3 generace procesů výroby biopaliv. První spočívá v pěstování rostlin přímo určených pro výrobu biopaliv. Jedná se o pěstování velkých ploch monokulturních plodin, zejména pak řepky olejné. Druhá generace využívá odpadní (štěpky, sláma) a dřevní biomasy a traviny. Tyto dvě generace se od sebe liší tím, že v 1. generaci dochází k chemickým dějům při nízkých tlacích a teplotách. 2. generaci lze přirovnat k rafinérii, kdy při různých operacích dochází k uvolňování různých složek z biomasy pomocí mikroorganismů. Příklady dějů při druhé generaci jsou krakování, zplyňování, hydrogenační rafinace a další. Třetí generace je zatím pouze ve výzkumu a počítá se s využitím oleje z řas. Řasy jsou na tom z hlediska produkce oleje o řád lépe než ostatní suroviny (řasy: 47-95 tisíc litrů oleje z hektaru, řepka: 1140-1420 litrů oleje z hektaru) [14]

Bionafta je označení pro metylester mastných kyselin (FAME), u nás nejznámější je metylester řepkového oleje (MEŘO). Princip výroby bionafty je znázorněný na obr. 2.4 a jedná se o transesterifikaci v rostlinném oleji přítomných triglyceridů za použití alkoholu (metanol) a katalyzátoru. Rostlinný olej lze získat z olejnatých semen rostlin, např. řepky olejné, sóje, slunečnice. Lze také využít palmového oleje, živočišných tuků, ale i fritovací olej.



Obrázek 2.4 – Rovnice popisující výrobu bionafty [15]

Výhodou bionafty jsou lepší vlastnosti než u klasické (ropné) nafty, viz obr. 2.5. Bionafta také lépe hoří a má vyšší mazací schopnost, tudíž se motor tolik neopotřebovává. Nevýhodami jsou pak velké výrobní náklady a nutnost pěstovat na polích velké plochy monokulturních plodin. Navíc při spalování dochází k uvolňování sloučenin, které zanáší filtr. Bionafta má také nižší výhřevnost než nafta z ropy. [15]



Obrázek 2.5 – Porovnání bionafty a motorové nafty [10]

Bioetanol se získává alkoholovým kvašením plodin obsahujících větší množství cukrů, nebo škrobu, který je nutné před kvašením přeměnit na cukry. Mezi tyto plodiny obsahující přímo cukr se řadí v našich podmínkách cukrová řepa. Ve světě se používá cukrová třtina. Další používané plodiny, u kterých je ale nutná přeměna škrobu na jednoduché zkvasitelné cukry, jsou obilí, kukuřice, brambory. V budoucnu se předpokládá možnost využití odpadní a dřevěné (tedy lignocelulózové) biomasy, čímž by se stala významným zdrojem bioetanolu, viz tab. 2.3. [10,14,16]

Tabulka 2.3 – Produkční potenciál výroby bioetanolu pro různé suroviny [16]

Surovina	Produkční potenciál bioetanolu (l/t)	Surovina	Produkční potenciál bioetanolu (l/t)
Cukrová třtina	70	Kukuřice	360
Cukrová řepa	110	Rýže	430
Batata	125	Ječmen	250
Brambory	110	Pšenice	340
Cassava	180	Sladký čirok	60
Celulózová biomasa			280

Výroba bioetanolu z plodin obsahujících přímo cukr je podstatně jednodušší než v případě plodin se škrobem a schéma je na obr. 2.6. V první fázi se přemění disacharid (sacharóza) s vodou na monosacharid neboli glukózu: [14]

$$C_{12}H_{22}O_{11} + H_2O \rightarrow 2C_6H_{12}O_6 \quad (2)$$

Následuje proces fermentace (kvašení), za vzniku oxidu uhličitého a bioetanolu: [14]

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2\,CO_2 + 2\,C_2H_5OH \quad (3)$$

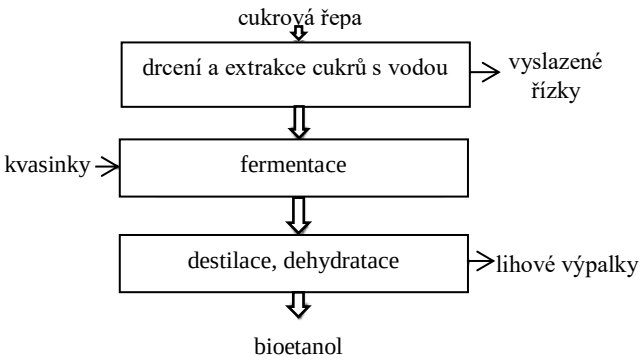
Po zkvašení dojde k předestilování a oddělení bioetanolu od zbytku a na závěr se bioetanol přečistí, aby nepůsobil negativně na motor.

Při použití rostlin, které obsahují škrob (viz schéma na obr. 2.7), musí navíc dojít k přeměně škrobu na glukózu pomocí enzymů: [14]

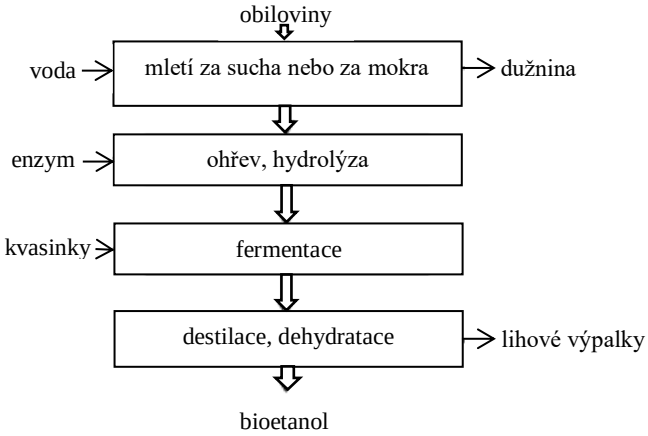
$$(C_6H_{10}O_5)^n + n\,H_2O \rightarrow n\,C_6H_{12}O_6 \quad (4)$$

A následuje opět proces fermentace, destilace a vyčištění.

Výsledný čistý etanol se poté míchá buď na 85% směs bioetanolu s 15 % benzínu. Takováto směs má označení E85 a vyžaduje speciální úpravu motoru. Nebo se bioetanol přimíchává do benzínu v objemovém množství okolo 4 %. Výhodou využití bioetanolu oproti klasickému benzínu je snížení emisí CO_2. Dále pak to je snížení emisí jemných částic.



Obrázek 2.6 – Schéma výroby bioetanolu z plodiny obsahující přímo cukry [16]



Obrázek 2.7 – Schéma výroby bioetanolu z plodiny obsahující škroby [16]

2.5.3 Tepelný rozklad

Biomasu určenou pro termochemickou konverzi je před samotným procesem většinou nutné nějakým způsobem upravit. Tyto druhy technologií úprav záleží na typu biomasy. Nutno zdůraznit, že pro termochemickou přeměnu je důležité, aby byla biomasa relativně suchá, například v porovnání se vstupy pro výrobu bionafty, bioplynu… Vlhkost biomasy v tomto případě totiž negativně ovlivňuje kvalitu hoření biomasy.

Jedná-li se o biomasu získanou ze zemědělských produktů, rozlišujeme ji dále ještě na slámu z plodin jako řepka olejná, pšenice, nebo ječmen, tedy na druhotnou produkci při sklizni obilí, a na pěstování plodin přímo určených pro energetické účely, tedy sloní tráva, šťovík, konopí. Sláma se sklízí spolu s obilím v období žní, kdy dochází k sečení polí kombajny, které zrna oddělí od zbytku rostliny. Tyto zbytky, tzn. slámu a plevy, kombajn zanechá v tzv. pokosech, které se mohou nechat dále proschnout kvůli snížení vlhkosti a následně se lisují buď do hranatých, nebo kulatých balíků. Balíky slámy se mohou spalovat v kuse, nebo se z nich udělá řezanka a ta se následně spaluje. Možností je i nalisování do pelet a briket. U plodin pěstovaných pro přímé energetické využití se obvykle sklízí jednou ročně v období, kdy dojde k vysušení rostliny. U šťovíku je to například červenec. Po sklizni se buď hned řezačkou pořeže nebo se balíkuje do hranatých či kulatých balíků a následné zpracování je stejné jako u slámy.

Dřevěnou biomasu lze také rozdělit do několika skupin, a to na rychle rostoucí dřeviny a na lesní a při zpracování dřeva vznikající odpady, případně dřevěná polena určená pro topení v kotlích k tomu určených. Jednou z výhod pěstování rychle rostoucích dřevin je mimo jiné i snadnost jejich zpracování, která je dána možností mechanizovat sklizeň. Tyto dřeviny se totiž pěstují v řadách a mají stejnou výšku. Sklízí se v období vegetačního klidu (obvykle tedy na podzim), kdy má strom co nejnižší objem vody (okolo 55%). Technologie sklízení jsou prakticky dvě. Buď dochází přímo k výrobě štěpky, kterou je ale nutné složitě dosoušet, nebo se kmeny svážou do snopků a tyto několika tunové snopky se v létě suší (na 30 % vlhkosti) a až na podzim se štěpkují. Odpady ze zpracování dřeva, ať už v lese nebo v průmyslu se obvykle taktéž štěpkují. Ze štěpky je ještě možné tvořit pelety a brikety pro lepší manipulaci. [14]

Z takto upravené biomasy se termochemickou přeměnou získává teplo pro další využití. Termochemickou přeměnou se rozumí proces zplyňování, pyrolýza a proces spalování. Vzhledem k významnosti bude spalování biomasy věnována celá další kapitola.

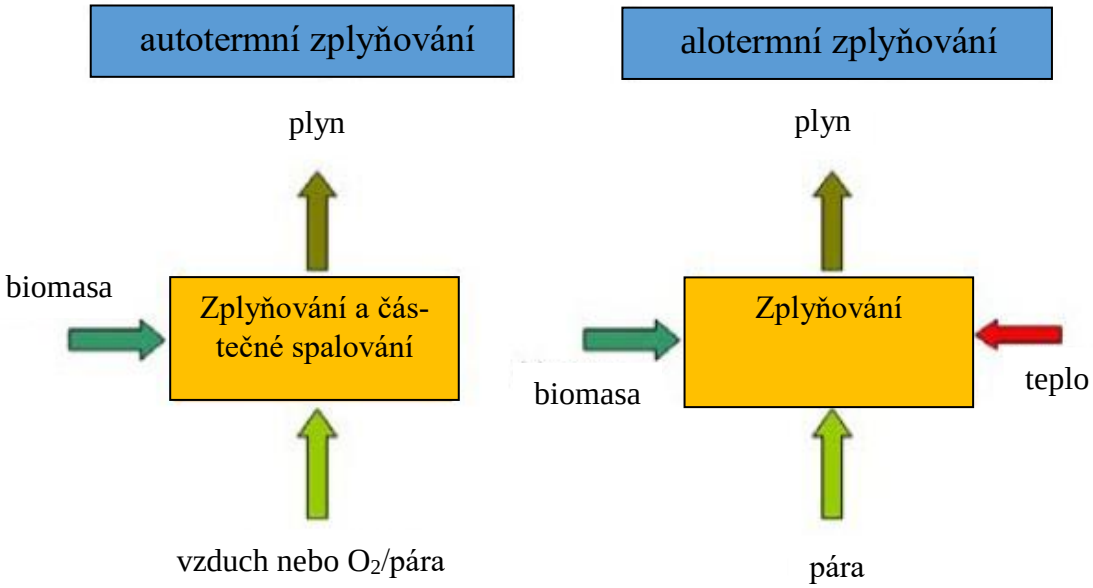
Pyrolýza je termochemický proces, při kterém se na rozdíl od zplyňování nebo spalování, zamezí přístupu kyslíku po celou dobu reakcí. Obecně lze pyrolýzu využít pro zpracování produktů na bázi uhlíku, tedy jak pneumatik, plastů, komunálních odpadů, kalů z čističek odpadních vod, tak i samotné biomasy. V tab. 2.4 jsou uvedeny reakce, ke kterým dochází při procesu pyrolýzy se zvyšující se teplotou:

Tabulka 2.4 – Chemické reakce pyrolytického procesu v závislosti na teplotě [14]

Teplota [°C]	**Chemická reakce**
100-200	Termické sušení, fyzikální odštěpení vody
250	Deoxidace, desulfurace, odštěpení vázané vody a CO_2, depolymerace, začátek odštěpování H_2S
340	Štěpení alifatických uhlovodíků, vznik metanu a jiných alifatických uhlovodíků
380	Karbonizační fáze
400	Štěpení vazeb uhlík-kyslík, uhlík-dusík
400-600	Přeměna bitumenových složek na pyrolýzní olej a dehet
>600	Krakování za vzniku plynných uhlovodíků s krátkým uhlíkovým řetězcem

Produktem pyrolýzy je nejprve dřevěné uhlí, následuje tvorba oleje a na závěr se tvoří plyn, který se obvykle používá pro předehřev biomasy na začátku procesu.

Zplyňování je termochemický proces, při němž se mění uhlík ve skupenství pevném nebo kapalném na plyn [17], který obsahuje energeticky dále využitelný oxid uhelnatý, metan a vodík a nevyužitelný oxid uhličitý, vodu, prach a další. Základními procesy jsou vysušení, pyrolýza, redukce a oxidace, přičemž tyto procesy mohou probíhat buď zaráz, to se jedná o fluidní generátory, nebo postupně, a tedy sesuvné generátory. Na začátku je potřeba dodat teplo, aby mohlo dojít k vysušení, pyrolýze a redukci. Dle způsobu dodání tepla se generátory liší, jak je ukázáno na obr. 2.8 na následující straně. Toto teplo je buď dodané přímo v generátoru hořením (autotermní), a tedy využitím části biomasy. Kvůli hoření je ale nutné dodávat vzduch do kotle a v důsledku toho se částečně znehodnotí energeticky využitelný plyn dusíkem. Druhou možností je dodat teplo z vnějšího prostředí, například pomocí páry (alotermní zplyňování)



Obrázek 2.8 – Rozdíl mezi způsoby dodání tepla biomase [17]

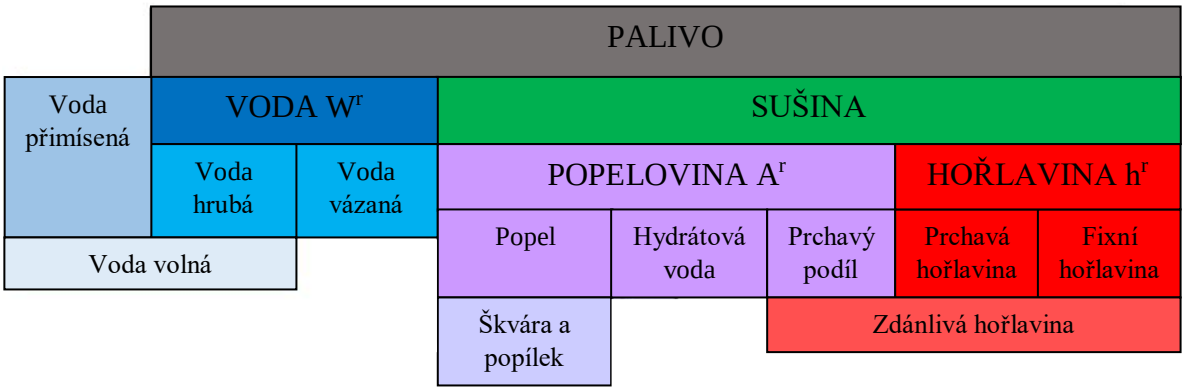
3 SPALOVÁNÍ BIOMASY

Spalování je nejstarší a nejjednodušší užívaná technologie zpracování biomasy a jedná se o reakci paliva s kyslíkem ze vzduchu za uvolnění energie ve formě tepla [18].

Při spalování vznikají plynné spaliny, které obsahují jednak pevné částice („lehký popílek“, který vzlétne z popela na dně) a také plyny. Ať už jsou to produkty hoření CO, CO_2, SO_2, H_2O, tak i molekuly plynů, které nezreagují při spalování: O_2, H_2, N_2. Na dně pak zůstává popel tvořený škvárou nebo struskou.

3.1 Složení biomasy

Složky biomasy lze dělit na hořlavé, tzn. uhlík, vodík, síra, (kyslík, dusík), a na nehořlavé, tedy voda a popeloviny. Hořlaviny dělíme na prchavé a fixní (více v kap. 3.2). Dále se vyskytují popeloviny, mezi něž lze zařadit různé minerální látky, a nakonec různé typy vody. Toto složení je ukázáno na obr. 3.1.



Obrázek 3.1 – Složení pevných paliv [19]

Jednotlivé druhy biomasy je možné dělit také podle množství rozličných prvků, které jsou v biomase obsaženy, přičemž každý druh biomasy má svoji výhřevnost a spálené teplo, viz tab. 3.1:

Tabulka 3.1 – Chemické složení biomasy a výhřevnost [20]

Palivo	Složky paliva v suché hmotě [%]						Výhřevnost [MJ/kg]	Spálené teplo [kJ/kg]
	C_2	H_2	O_2	N_2	S	Cl		
Smrkové dřevo s kůrou	49,8	6,3	43,2	0,13	0,015	0,005	18,8	20,2
Bukové dřevo s kůrou	47,9	6,2	45,2	0,22	0,015	0,006	18,4	19,7
Rychle rostoucí topol	47,5	6,2	44,1	0,42	0,031	0,004	18,5	19,8
Kůra jehličnanů	51,4	5,7	38,7	0,48	0,085	0,019	19,2	20,4
Žitná sláma	46,6	6,0	42,1	0,55	0,085	0,400	17,4	18,5
Pšeničná sláma	45,6	5,8	42,4	0,48	0,082	0,190	17,2	18,5
Zrno řepky olejné	60,5	7,2	23,8	3,94	0,100	0,000	26,5	-
Ozdobnice čínská	47,5	6,2	41,7	0,73	0,150	0,220	17,6	19,1
Černé uhlí	72,5	5,6	11,1	1,30	0,940	<0,1	29,7	-
Hnědé uhlí	65,9	4,9	23,0	0,70	0,390	<0,1	20,6	-

Výhřevnost je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. [21] Výhřevnost je velice závislá na obsahu vody v palivu. Pokud je obsah vody >50 %, sníží se výhřevnost o více než polovinu. Vysoký obsah vody může mít též za následek poškození kotle.

Spálené teplo je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách kondenzuje – je v kapalné fázi. [21]

Jak je patrné z tab. 5, hlavními prvky tvořícími biomasu jsou uhlovodíky a kyslík, tyto prvky se také aktivně podílí na spalovaní, přičemž reagují s atmosférickým kyslíkem za vzniku vody ve formě páry, oxidů uhličitého a uhelnatého a tepla.

Z hlediska emisí ať už plynných, nebo pevných částic, se jeví jako problematická přítomnost prvků jako síra, dusík, chlor a dalších stopových prvků (například minerálních látek), které způsobují vznik nebezpečných, zdraví škodlivých, sloučenin. Na druhou je možné využít popel vzniklý při spalování minerálních látek pro hnojení zemědělské půdy.

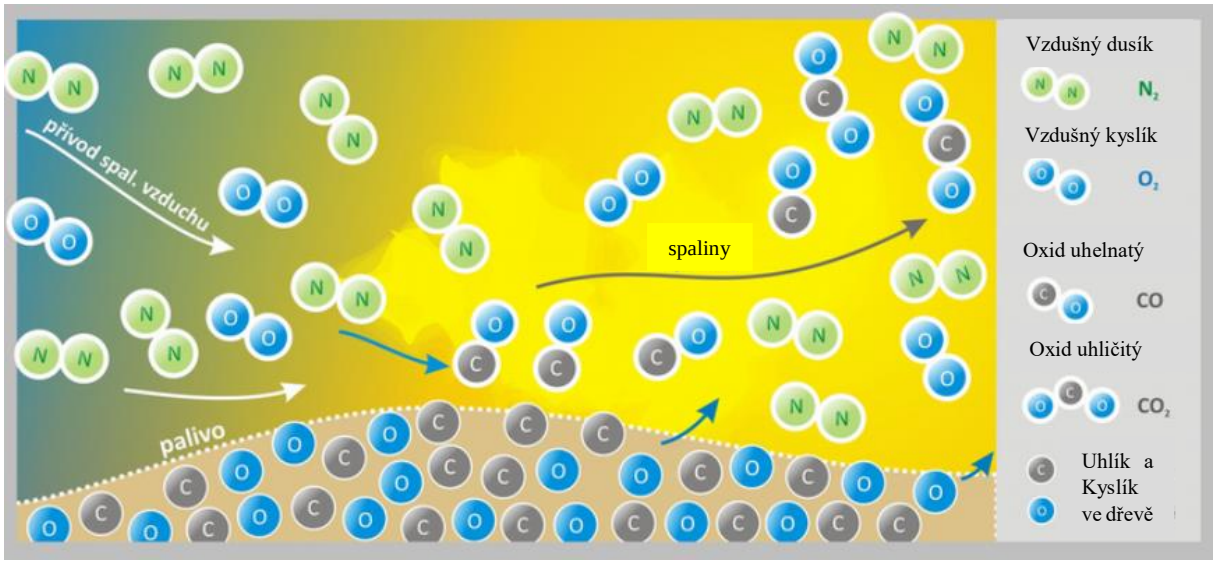
3.2 Tepelný rozklad biomasy

Samotný proces tepelného rozkladu biomasy lze rozdělit do tří základních mechanismů. (Zjednodušené zobrazení je na obrázku 3.2) Na začátku spalování je biomasu nutné ohřát a dodat jí teplo, aby došlo k vysušení, a tedy odstranění vody. Následuje fáze uvolnění a hoření prchavých látek, tzv. pyrolýza. Tyto látky se uvolňují při teplotě okolo 300 °C. Řadí se sem oxid uhelnatý a uhličitý, metan a další různé uhlovodíky, které hoří ve styku s kyslíkem, který je přiveden do kotle jako sekundární vzduch. Zajímavostí je, že pokud se hořící prchavé látky náhle ochladí (na stěně kotle), dojde k jejich kondenzaci a tvorbě usazenin, tedy sazí. Biomasa je oproti fosilním palivům typická velkým obsahem prchavých látek, viz tab. 3.2:

Tabulka 3.2 – Obsah prchavé hořlaviny v různých typech paliv [14]

Palivo	Rašelina	Řepková sláma	Dřevní hmota	Obilní sláma
V_{daf} (%$_{hm}$)	70	80 až 86	80 až 86	88

Poslední fází je hoření pevného (fixního) uhlíku při teplotě okolo 800°C. Vzniká oxid uhelnatý, který při dostatečném obsahu kyslíku hoří za vzniku oxidu uhličitého.



Obrázek 3.2 – Zjednodušené zobrazení reakce vzdušného kyslíku se dřevem [22]

3.3 Chemie spalování

Pokud je při spalování kyslíku dostatek, mluvíme o tzv. dokonalém spalování, tedy že dojde k oxidaci (spálení) všeho uhlíku, vodíku a dalších v dřevě obsažených hořlavých látek a nedochází k uvolňování nespálených oxidů uhelnatých a jiných neshořelých uhlovodíků. Aby mohlo dojít k dokonalému spalování, je zapotřebí určité minimální množství kyslíku, který je nutné přivést. Toto množství se nazývá stechiometrické a lze jej určit z rovnic hoření uhlíku, vodíku a síry:

3.3.1 Spalování uhlíku

Určení množství kyslíku nutného pro spálení 1 kg uhlíku C [21]:

$$\begin{gathered} C + O_2 \rightarrow CO_2 + Q_c \\ 1\ \text{kmol}\ C + 1\ \text{kmol}\ O_2 \rightarrow 1\ \text{kmol}\ CO_2 + Q'_C \\ 12{,}01\ \text{kg}\ C + 32\ \text{kg}\ O_2 \rightarrow 44\ \text{kg}\ CO_2 + 482{,}3\ \text{MJ} \\ 1\ \text{kg}\ C + \frac{22{,}39}{12{,}01}\ \text{m}^3\ O_2 \rightarrow \frac{22{,}26}{12{,}01}\ \text{m}^3\ CO2 + \frac{482{,}3}{12{,}01}\ \text{MJ} \\ \mathbf{1\ kg\ C + 1{,}864\ m^3\ O_2 \rightarrow 1{,}853\ m^3\ CO_2 + 33{,}8\ MJ} \end{gathered} \tag{5}$$

Pro spálení 1 kg uhlíku C je tedy nutné dodat 1,864 m^3 kyslíku O_2. Zároveň dojde k vytvoření 33,8 MJ energie ve formě tepla.

3.3.2 Spalování vodíku

Určení množství kyslíku nutného pro spálení 1 kg vodíku H_2 [21]:

$$\begin{gathered} 2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + Q_H \\ 2\ \text{kmol}\ H_2 + 1\ \text{kmol}\ O_2 \rightarrow 2\ \text{kmol}\ H_2O + Q'_H \\ 4{,}032\ \text{kg}\ H_2 + 32\ \text{kg}\ O_2 \rightarrow 36{,}032\ \text{kg}\ H_2O + 482{,}3\ \text{MJ} \\ 1\ \text{kg}\ H_2 + \frac{22{,}39}{4{,}032}\ \text{m}^3\ O_2 \rightarrow \frac{44{,}80}{4{,}032}\ \text{m}^3\ H_2O + \frac{482{,}3}{4{,}032}\ \text{MJ} \\ \mathbf{1\ kg\ H_2 + 5{,}55\ m^3\ O_2 \rightarrow 11{,}11\ m^3\ H_2O + 119{,}6\ MJ} \end{gathered} \tag{6}$$

Pro spálení 1 kg vodíku H_2 je tedy nutné dodat 5,55 m^3 kyslíku O_2. Zároveň dojde k vytvoření 119,6 MJ energie ve formě tepla.

3.3.3 Spalování síry

Určení množství kyslíku nutného pro spálení 1 kg síry S [21]:

$$\begin{gathered} S + O_2 \rightarrow SO_2 + Q_S \\ 1\ \text{kmol}\ S + 1\ \text{kmol}\ O_2 \rightarrow 1\ \text{kmol}\ SO_2 + Q'_S \\ 32{,}06\ \text{kg}\ S + 32\ \text{kg}\ O_2 \rightarrow 64{,}06\ \text{kg}\ SO_2 + 29{,}66\ \text{MJ} \\ 1\ \text{kg}\ S + \frac{22{,}39}{32{,}06}\ \text{m}^3\ O_2 \rightarrow \frac{21{,}89}{32{,}06}\ \text{m}^3\ SO_2 + \frac{29{,}66}{32{,}06}\ \text{MJ} \\ \mathbf{1\ kg\ S + 0{,}699\ m^3\ O_2 \rightarrow 0{,}683\ m^3\ H_2O + 9{,}25\ MJ} \end{gathered} \tag{7}$$

Pro spálení 1 kg síry S je tedy nutné dodat 0,699 m^3 kyslíku O_2. Zároveň dojde k vytvoření 9,25 MJ energie ve formě tepla.

3.3.4 Určení množství kyslíku

Potřebné množství kyslíku se tedy určí z rovnice. 8 [21]: (poslední odečítaný člen udává kyslík obsažený v palivu)

$$V_{O_2min} = \frac{22,39}{12,01} C^r + \frac{22,39}{4,032} H_2^r + \frac{22,39}{32,06} C^r - \frac{22,39}{32} O_2^r \ [m^3_{O_2}/\mathrm{kg_{pal}}] \qquad (8)$$

Toto je tedy stechiometrické množství kyslíku, které je nutné dodat palivu, aby došlo k dokonalému spalování. Tato hodnota však bude pouze teoretická, protože ve skutečnosti je nutné dodat kyslíku více. O kolik více nám říká součinitel přebytku vzduchu α.

$$\alpha = \frac{V_{vzd\ skutečné}}{V_{O_2min}} \ [-] \qquad (9)$$

Hodnoty součinitele α je možné hledat v tabulkách pro různé druhy spalování (pevných paliv, plynných paliv…)

3.4 Emise plynné

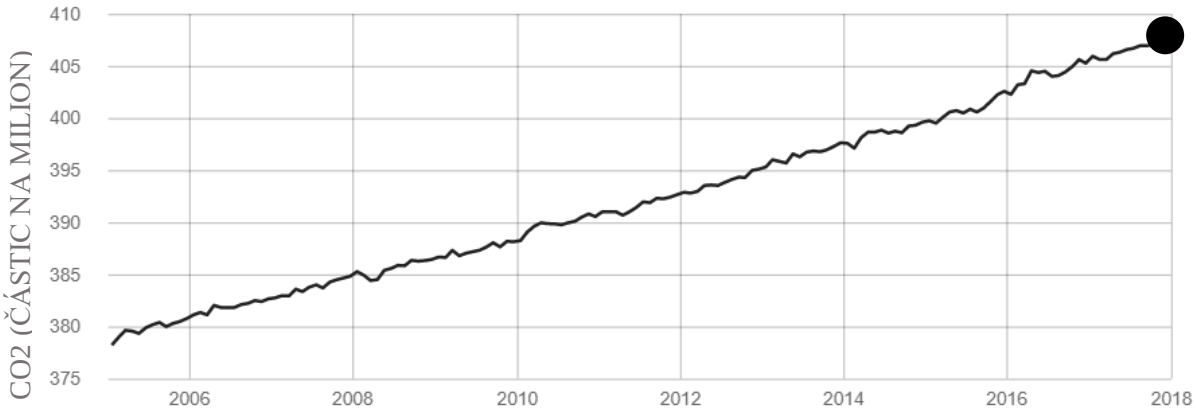
Vznik plynných emisí velice zaleží na množství kyslíku při spalování. Pokud je ho dostatek, vzniká oxid uhličitý, oxidy dusíku, oxidy síry. Když je kyslíku málo, vzniká při hoření místo oxidu uhličitého toxický oxid uhelnatý.

3.4.1 Oxid uhličitý CO_2

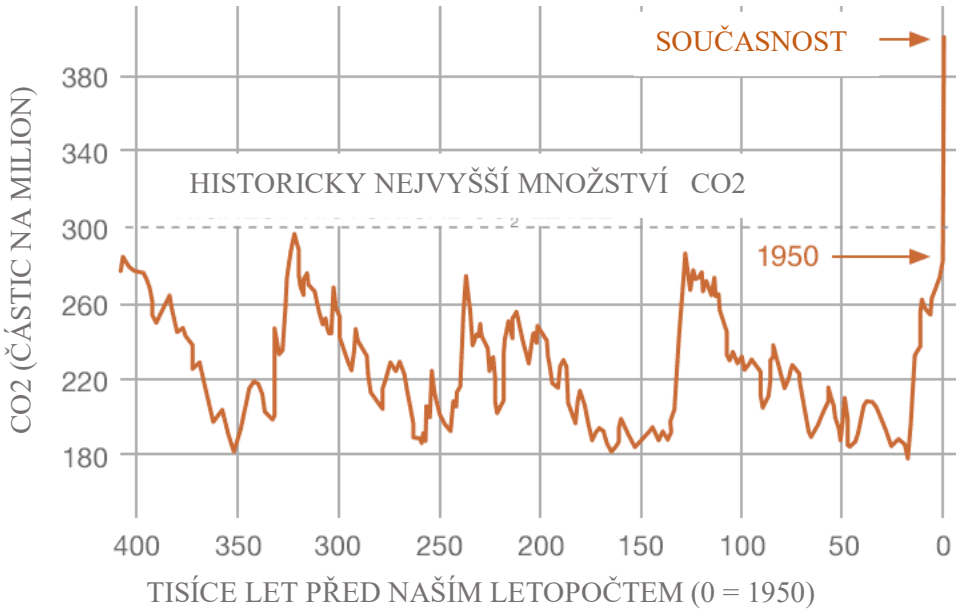
Je to plyn bez barvy a zápachu, vzniká při dokonalém spalování uhlíku, nebo při hoření oxidu uhelnatého. Jeho hustota je ρ = 1,977 kg/m^3, což je více než má vzduch (ρ = 1,29 kg/m^3), takže se drží při zemi. Mimo jiné v tomto spočívá nebezpečí oxidu uhličitého. Může totiž dojít k případu, kdy je kotelna umístěna ve sklepě a je špatně odvětrávána. Pokud dojde k poškození odvodu spalin, může se oxid uhličitý začít hromadit v místnosti a pokud se tam zdržuje delší dobu člověk, nezřídka kdy se stává, že to má pro něj fatální následky.

Dalším faktem o oxidu uhličitém je, že je to skleníkový plyn, tedy jeho nadměrná koncentrace v ovzduší způsobuje globální oteplování. Při spalování biomasy však není problém s oxidem tak akutní jako při spalování fosilních paliv. [23]

Z dat NASA na obr. 3.3 a 3.4 lze ale snadno vyčíst, že množství oxidu uhličitého v atmosféře rapidně přibývá, a to především činností člověka.



Obrázek 3.3 – Měření oxidu uhličitého CO_2 v atmosféře [24]



Obrázek 3.4 – Vývoj množství uhlíku, graf vytvořený z výzkumu ledovců [24]

Rovince dokonalého spalování uhlíku C za vzniku oxidu uhličitého CO_2:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2 \quad (10)$$

3.4.2 Oxid uhelnatý CO

Je to plyn bez barvy a zápachu vznikající při nedokonalém spalování, který je ale pro člověka velice toxický. Vzhledem ke své hustotě ($\rho = 1{,}25$ kg/m^3), která je velmi podobná hustotě vzduchu, dochází k promísení vzduchu a oxidu uhelnatého. Oxid uhelnatý je velice nebezpečný, protože se váže snáz na hemoglobin v krvi než kyslík.

Aby vznikalo při hoření co nejméně CO, používají se kotle s velkým prostorem pro hoření a několikanásobným přívodem vzduchu. [25]

Rovnice nedokonalého spalování uhlíku C za vzniku oxidu uhelnatého CO:

$$2\,C + O_2 \rightarrow 2CO \quad (11)$$

3.4.3 Oxid siřičitý SO_2 a Oxid sírový SO_3

Oxidu siřičitého vzniká při hoření podstatně více než oxidu sírového. SO_2 má větší hustotu než vzduch ($\rho = 2{,}97$ kg/m^3). Při vdechování způsobuje dýchací potíže

Rovnice hoření síry S za vzniku oxidu siřičitého SO_2 a hoření oxidu siřičitého SO_2 za vzniku oxidu sírového SO_3:

$$S + O_2 \rightarrow SO_2 \quad (12)$$
$$2\,SO_2 + O_2 \rightarrow 2\,SO_3 \quad (13)$$

Jak SO_2, tak i SO_3 se snadno rozpouští ve vodě a tvoří kyselinu siřičitou, resp. kyselinu sírovou a způsobují tzv. kyselé deště. Tyto oxidy však vznikají především při spalování hnědého a černého uhlí. V biomase se síra vyskytuje jen v malém množství. [26]

3.4.4 Oxidy dusíku NO_x

Do skupiny oxidů dusíku řadíme především oxid dusnatý NO a oxid dusičitý NO_2, které vznikají při spalování za teploty okolo 1000 °C. Tyto oxidy opět způsobují vznik kyselých dešťů a NO_2 vytváří smog. Dále například oxid dusný N_2O je skleníkový plyn. NO_x způsobují lidem dýchací potíže. [27]

3.4.5 Organické látky

Při spalování biomasy vznikají také mnohé organické látky, které jsou velice toxické pro životní prostředí i pro člověka. Tyto látky se ve většině případů přímo nachází v biomase a uvolňují se při jejím tepelném rozkladu. Jejich množství lze ovlivnit dostatkem vzduchu při procesu, tzv. dokonalým spalováním. Nebezpečné pro životní jsou z důvodu neschopnosti se v přírodě samovolně rozložit. Pro živé tvory jsou karcinogenní, teratogenní (poškozující plod) a reprotoxické (ohrožující rozmnožování). Akumulují se tukových tkáních organismů. [28, 29]

Do této skupiny organických látek řadíme:

Tzv. dioxiny, což je používaný zkrácený název pro **polychlorované dibenzo-p-dioxiny (PCDD)** a **polychlorované dibenzofurany (PCDF).** Tyto sloučeniny si jsou podobné v chemickém složení a hlavním rozdílem mezi nimi je množství a pozice atomů chloru ve struktuře.

V legislativě jsou limity pro tyto látky určeny ve vyhlášce 153/2016 Sb., přičemž preventivní limity pro půdu pro PCDD jsou 5 ng/kg. Množství, které by mohlo být nebezpečné pro člověka je 100 ng/kg. Pro různé potraviny je limit různý a pohybuje se do 5 pg/g tuku. [29]

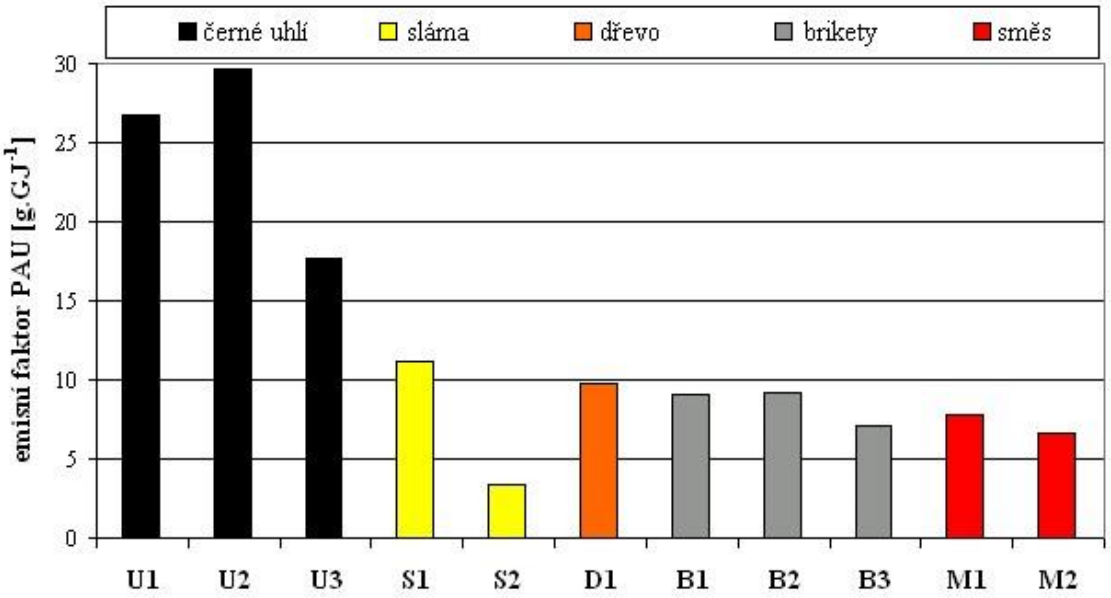
Dalšími látkami, řadícími se mezi nebezpečné organické látky vznikající při spalování biomasy, jsou **polychlorované aromatické uhlovodíky (PAH nebo PAU).** Jedná se o sloučeniny, jak již název napovídá, chloru a uhlíku a vodíku na bázi benzenových jader. PAH jsou karcinogenní látky, které při vdechování mohou způsobit rakovinu plic. Množství polyaromatických uhlovodíků závisí jednak na typu paliva, viz obr. 3.5, kde je zobrazeno srovnání emisí PAH u různých druhů paliv, a jednak na „dokonalosti“ spalování. V legislativě jsou opět uvedeny limity pro obsah těchto látek v ovzduší, vodě i potravinách.

Na závěr je ještě nutné zmínit výskyt **polychlorovaných bifenilů (PCB)**

V tab. 3.3 je znázorněno množství emisí polyaromatických uhlovodíků a polychlorovaných dibenzo-p-dioxinů pro různé druhy biomasy:

Tabulka 3.3 – Emise PCDD a PAH ze spalování různých druhů biopaliv [30]

Palivo	Cl [mg/kg]	HCl [mg/Nm^{-3}]	CO [mg/Nm^{-3}]	PAH [mg/Nm^{-3}]	PCDD [ng/Nm^{-3}]
Smrková štěpka	120	0,9	625	37	0,063
Topolová štěpka	16	0,13	2880	74	0,003
Pelety z pšeničné slámy	2056	74	733,5	247	1,822
Řezanka z pšeničné slámy	1500	89	165,5	33	0,631
Pelety ze sena	2890	173	325,5	69,5	0,835
Pokrutiny ze semene řepky	194	17	697	115	0,365



Obrázek 3.5 – Faktor PAU u kotlů malého výkonu při spalování různých paliv [31]

3.5 Emise jemných částic

Doposud byla pozornost upřena na emise plynné vznikající při chemických reakcích ať už dokonalého, nebo nedokonalého spalování. Při hoření však vznikají také jemné pevné a kapalné částice, které mohou mít velice negativní účinky na lidské zdraví. Zvláště pak nebezpečné jsou ty nejjemnější z nich.

Emise jemných částic rozlišujeme na **saze** (pevný uhlík a polycyklické aromatické řetězce), **popílek a popel** (neshořitelná část paliva) a **organické částice**.

Tuhé znečišťující látky se do ovzduší dostávají buď z přirozených přírodních jevů jako jsou například erupce sopek, požáry v lesech, zvětráváním hornin. Příroda se je však s těmito jemnými částicemi schopna postupem času vypořádat. V lesích je mnohem menší koncentrace jemných částic než ve městě díky stromům, které dokážou na svoji pryskyřici tyto látky zachytit. Velké množství TZL se však do atmosféry uvolňuje také kvůli lidské činnosti. Ať už při spalování tuhých paliv, nebo při průmyslové výrobě a zkráceně při jakémkoliv třecím kontaktu dvou ploch, například v brzdách automobilů.

3.5.1 Dělení

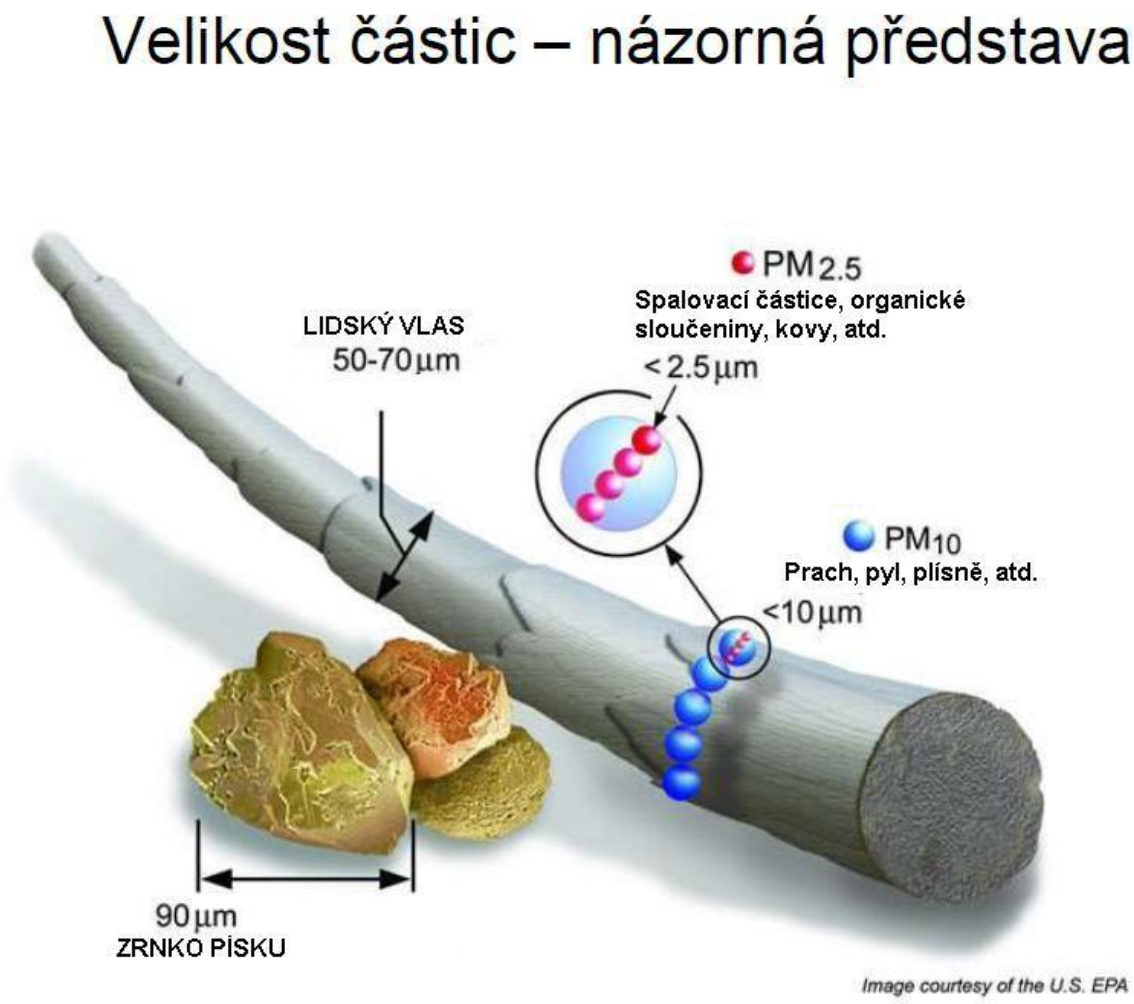
Tuhé znečišťující látky lze rozdělit podle geometrického tvaru a ty dále podle velikostí jednotlivých částic. Existují částice tzv. **izometrické**, které mají rozměry v ortogonálním souřadném systému ve všech osách stejné a lze si je tedy představit jako kulové částice. Dále rozlišujeme **ploché** částice, které mají jeden rozměr zanedbatelně malý oproti zbylým dvěma. Částice tedy tvoří plošky, šupinky. Na závěr existují **vláknité** částice, které, jak již název napovídá, tvoří vlákna a nitky. [32]

Pro dělení podle velikosti využíváme anglickou zkratku PM_x, což znamená „particulate matter“, v překladu „částice“. Index x za PM znamená, že aerosol tuhých znečišťujících látek obsahuje částice o velikosti v mikrometrech menších než hodnota x. Nejčastěji se používá:

PM_{10} – což je označení pro částice s velikostí menší než 10 mikrometru
$PM_{2,5}$ – označující částice s velikostí menší než 2,5 mikrometru

PM_1 a $PM_{0,1}$ – ultra jemné a nejnebezpečnější částice s velikostí menší než 1 mikrometr, respektive 0,1 mikrometru

Na obr. 3.6 je možné pozorovat porovnání částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ s lidským vlasem a zrnkem písku. Vzhledem k patrné velikosti částic $PM_{2,5}$, je snadné si představit možné účinky na zdraví živých organismů.



Obrázek 3.6 – Porovnání jednotlivých velikostí PM [33]

3.5.2 Zdravotní rizika spojená s jemnými částicemi

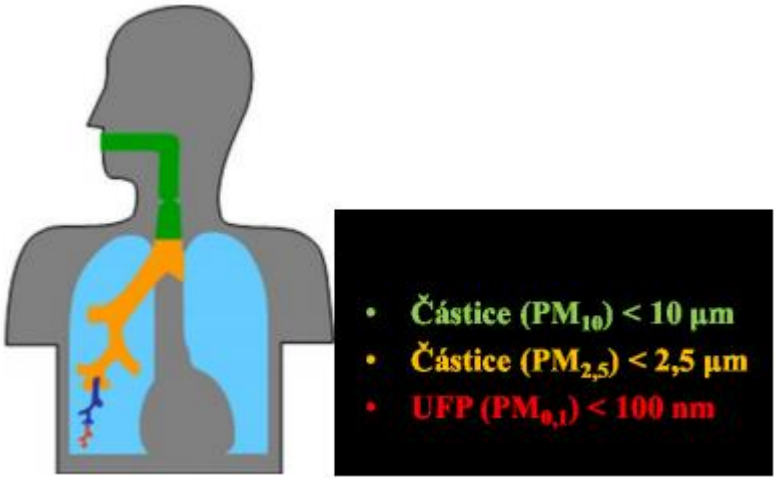
Nebezpečnost jemných částic emitovaných při spalování je ovlivněna především jejich velikostí, geometrickým tvarem a v neposlední řadě také chemickým složením.

Jak je patrné z obr. 3.7, lidské tělo je schopné poměrně dobře zachytávat částice PM_{10}, odborně nazývané extrathorakální frakce, již v horních cestách dýchacích (ústa, nosní sliznice). Nebezpečnější jsou částice $PM_{2,5}$, označované také jako tracheobronchiální, které se usazují v průduškách.

Nejnebezpečnějšími se jeví částice PM_1 a $PM_{0,1}$. Těm totiž v cestě nestojí žádné zábrany a mohou pronikat přes plicní sklípky až do krve, skrz kterou jsou rozvedeny po celém těle,

a usazují se především v srdci a játrech, ale mohou pronikat i do centrálního nervového systému. A následně spolu s částicemi PM_{10} a $PM_{2,5}$ způsobují závažné onemocnění horních i dolních cest dýchacích, astma, rakovinu plic, různé onemocnění srdce a další.

Na závěr je důležité dodat, že nebezpečnost jemných částic nespočívá pouze ve velikosti, ale také v chemickém složení. Na jemné částice se snadno vážou látky jako dioxiny a těžké kovy. [34]



Obrázek 3.7 – Zachycení částic PM_x v lidském těle [34]

Lidské tělo je schopno se proti jemným částicím určitým způsobem bránit. A to buď, jak již bylo zmíněno, pomocí hlenu v horních cestách dýchacích anebo poté díky fagocytóze, což je proces, při kterém dojde k pohlcení jemných částic v plicích. Fagocytóza snáze probíhá u větších částic než u menších. Proto jemné částice, které se spojí do větších celků nepředstavují takové nebezpečí jako částice, u nichž nedošlo ke spojení. [34]

3.5.3 Popis vzniku jemných částic

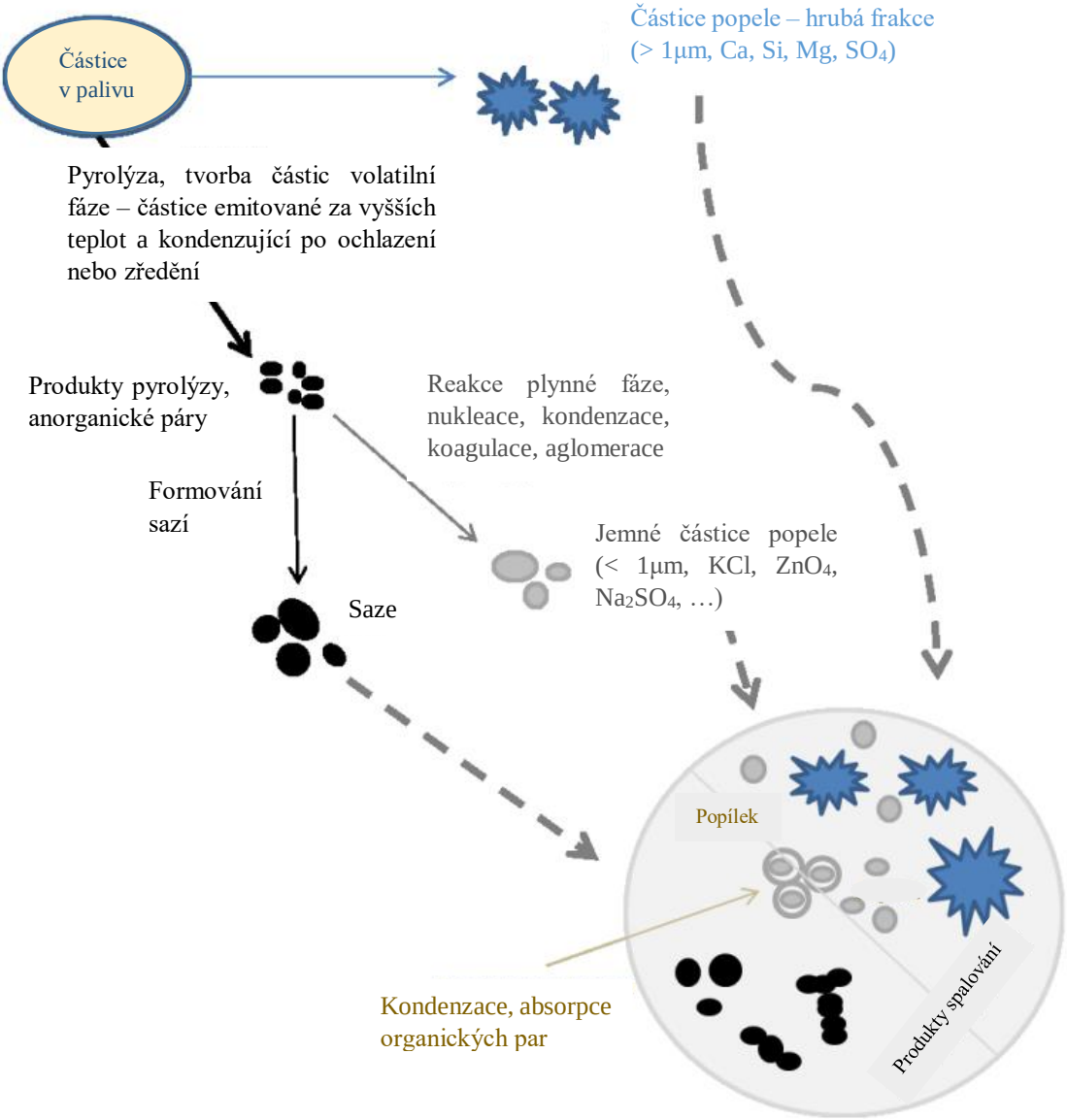
Vznik jednotlivých frakcí závisí na podmínkách spalování, hlavně na dostatku kyslíku. Při dokonalém spalování nevznikají saze a organické částice. Naopak popelovina je v tuhém palivu obsažena vždy, takže vznikají popel a popílek.

Saze jsou tvořeny především amorfním elementárním uhlíkem a částečně také organickou hmotou. Princip tvorby sazí začíná tvorbou prekurzoru (části uhlovodíkového řetězce uvolněného při spalování prchavých látek). Následně dojde ke spojování těchto částí s ostatními a také s přítomnými plyny a začnou se tvořit polycyklické uhlíkové řetězce, které nadále rostou až začnou vznikat saze.

Tvorba **popelu a popílku** je spjata s obsahem popelovin v samotném palivu. Jako popel se označuje hmota, která po spalování propadne roštem a zůstává na dně kotle. Popílek naopak označuje částice natolik malé, že jsou nadneseny přiváděným vzduchem a odchází komínem se spalinami. Popílek se tvoří z anorganických prchavých látek vznikajících v procesu spalování.

Dále v procesu spalování vzniká množství **organických částic**, které mohou být těkavé nebo polotěkavé, a jsou nebezpečné nejen pro člověka, u kterého mohou způsobovat problémy s nervovou soustavou a dýchací potíže, ale i pro rostliny, u nichž způsobuje problémy s růstem. [34]

Na obr. 3.8 je možné vidět formování jednotlivých složek jemných částic.



Obrázek 3.8 – Tvorba jemných částic při spalování [34]

3.5.4 Obsažení jemných částic v atmosféře v České republice

Jak je možné vidět v následující tabulce emisí TZL (tabulka 3.4), od roku 2000 se podařilo snížit množství jemných částic u malých zdrojů o 10 000 tun ročně. Za malé zdroje jsou považovány lokální vytápění domácností a tyto data jsou určena modelem.

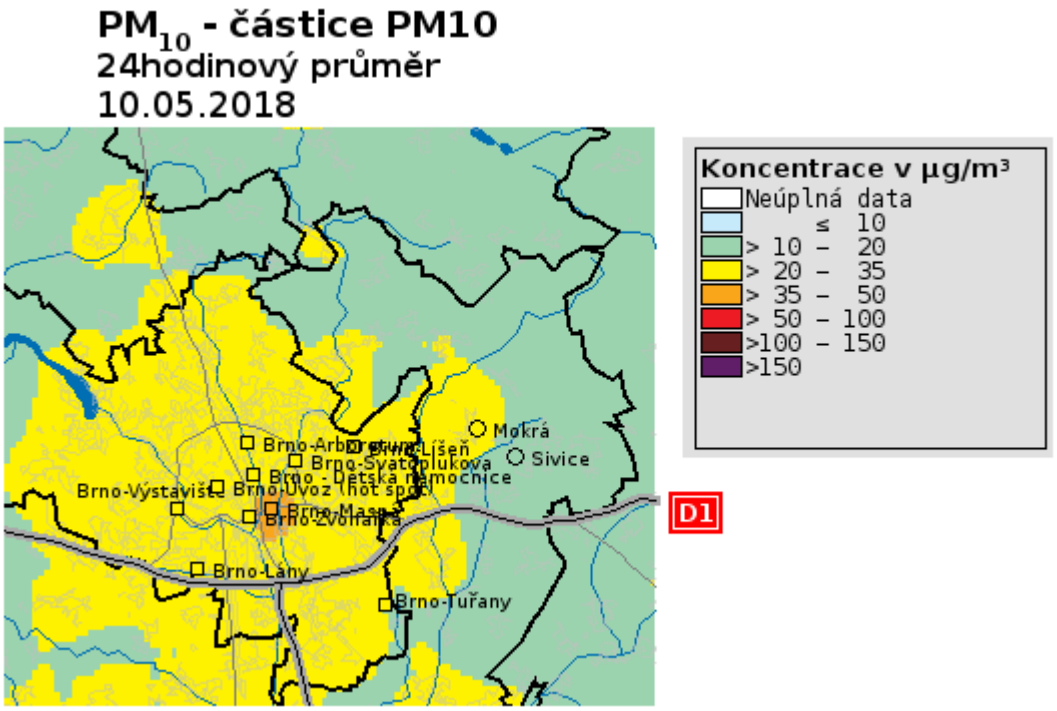
Tabulka 3.4 – Srovnání emisí TZL pro roky 2000 a 2015 [35,36]

LOKÁLNÍ TOPENIŠTĚ				
Kraj	**ROK 2000**		**ROK 2015**	
	[t/rok]	%	[t/rok]	%
Praha	382,7	1,0	297,5	1,0
Středočeský kraj	6 587,2	17,2	4 882,9	17,4
Jihočeský kraj	3 631,1	9,5	2 504,2	8,8
Ústecký kraj	5 804,2	15,1	4 326,8	15,4
Jihomoravský kraj	2 319,7	6,0	1 637,6	5,7
Olomoucký kraj	1 497,9	3,9	1 240,2	4,3
Moravskoslezský kraj	3 181,9	8,3	2 505,2	8,9
Ostatní	14 964,2	39,0	11 032,2	38,5
CELKEM	38 368,8	100,0	28 426,6	100,0

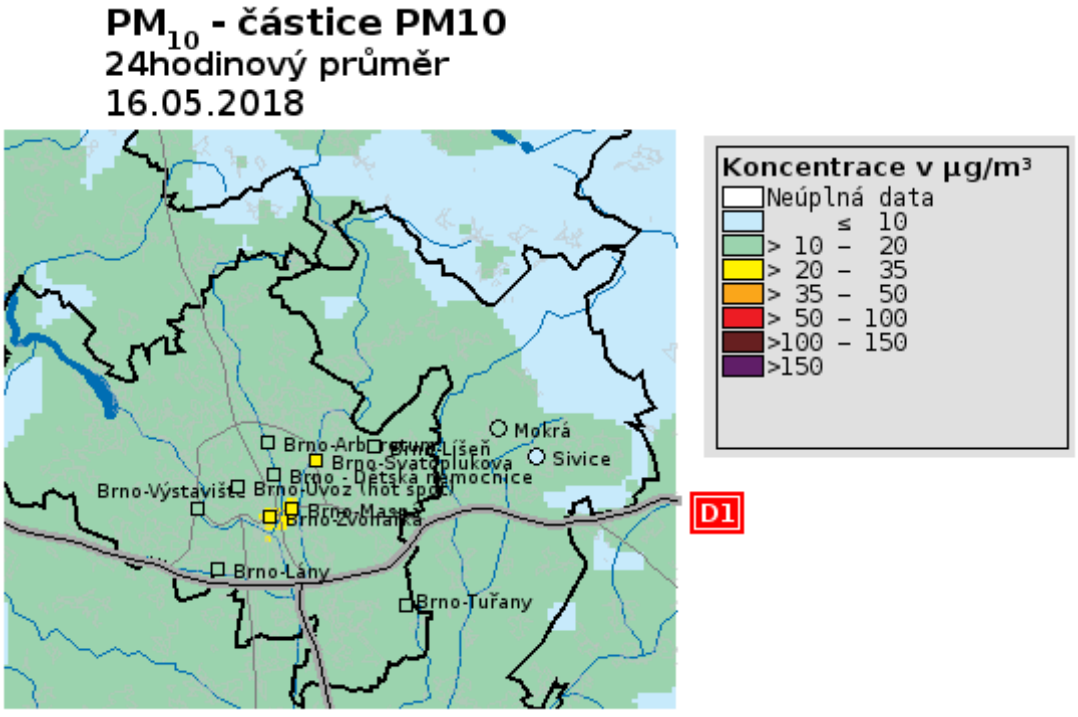
Z tabulek dostupných na webových stránkách Českého hydrometeorologického úřadu je také možné vysledovat data pro velké zdroje (zdroje přesahující 5 MW výkonu), které mají podle zákona povinnost ohlašovat tzv. údaje souhrnné provozní evidence, tedy množství vypouštěných tuhých znečisťujících látek. Z těchto dat vyplývá, že i u velkých zdrojů se daří snižovat množství TZL. Konkrétně se jedná o třetinový úbytek mezi roky 2000 a 2015 [35,36]

Dále je pak na obrázcích 3.9 a 3.10 na následující straně znázorněn 24hodinový průměr částic PM_{10} v Brně ze dne 10. 5. 2018 a 16. 5. 2018. Jak je možné si povšimnout, největší koncentrace z obou uvedených dní se nachází v okolí ulic Zvonařka a Masná. Přičemž hodnota koncentrace se pohybuje v rozmezí do 50 $\mu g/m^3$, což je dle nařízení Evropské komise pro 24hodinový průměr právě limitní hodnota. Pro částice $PM_{2,5}$ je udávána limitní hodnota 25 $\mu g/m^3$. [37]

Jednotlivé dny se od sebe liší poměrně výrazně, což může být dáno faktem, že mezi vybranými dny pršelo, takže se důsledkem toho mohla koncentrace snížit.



Obrázek 3.9 – Množství částic v Brně ze dne 10. 5. 2018 [38]



Obrázek 3.10 – Množství částic v Brně dne 16. 5. 2018 [39]

4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

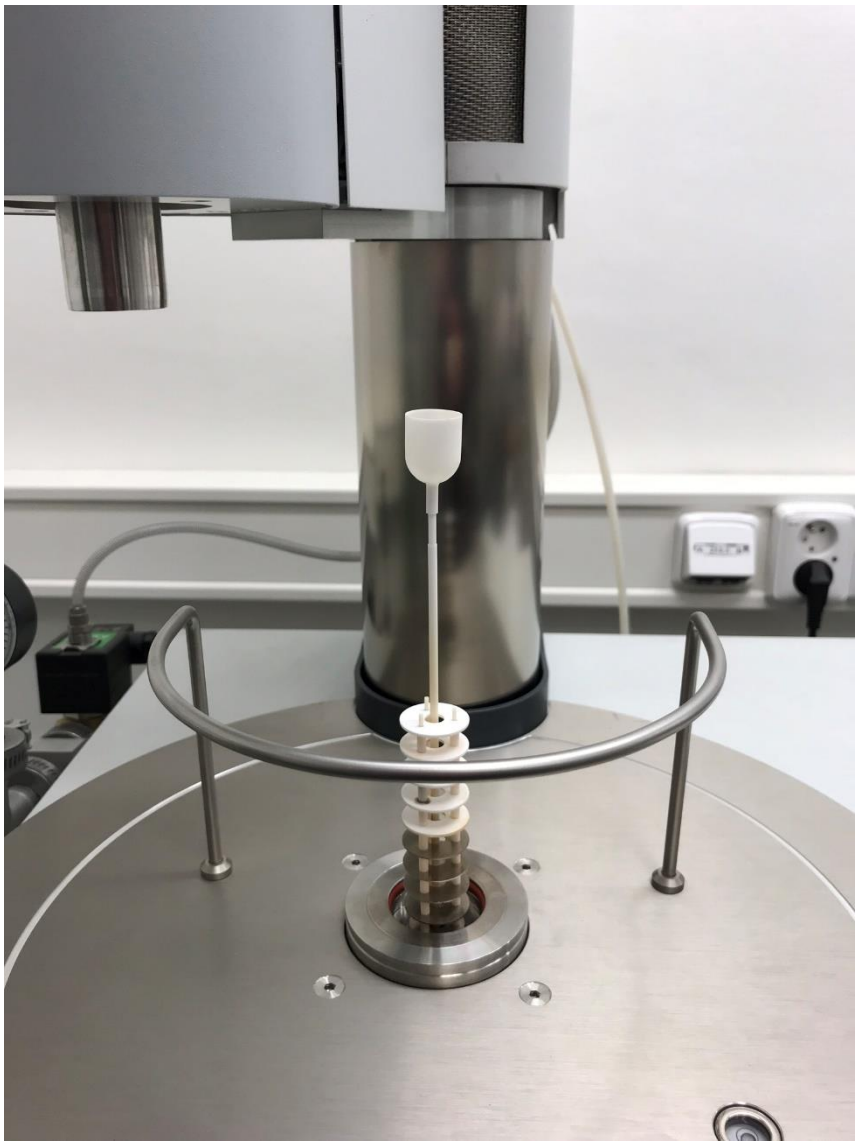
4.1 Popis experimentální aparatury

Experimentální část práce byla provedena na několika spojených přístrojích.

4.1.1 TGA

Prvním přístrojem je *NETZCH – Jupiter F3*, který slouží metodě pro určení termogravimetrické analýzy, zkráceně TGA. Termogravimetrická analýza umožňuje přesné měření závislosti zvyšující se teploty vzorku paliva na jeho ubývající hmotnosti. V TGA lze též nastavit přesně definované složení atmosféry, ve které bude spalování probíhat. Bylo tedy zvoleno 21 % kyslíku a 79 % dusíku.

Základ přístroje tvoří velice přesný systém vertikální váhy, na kterém se nachází keramikou kryté místo (tzv. TG-modul), kam se vkládá vzorek paliva, viz obr. 4.1. Při měření se vloží keramická miska se vzorkem do prostoru s předem definovanou atmosférou, ve které následně dochází ke zvyšování teploty. Výsledkem je termogravimetrická křivka zobrazující právě změnu váhy v závislosti na změně teploty.



Obrázek 4.1 – Keramická miska umístěná na přesných vahách

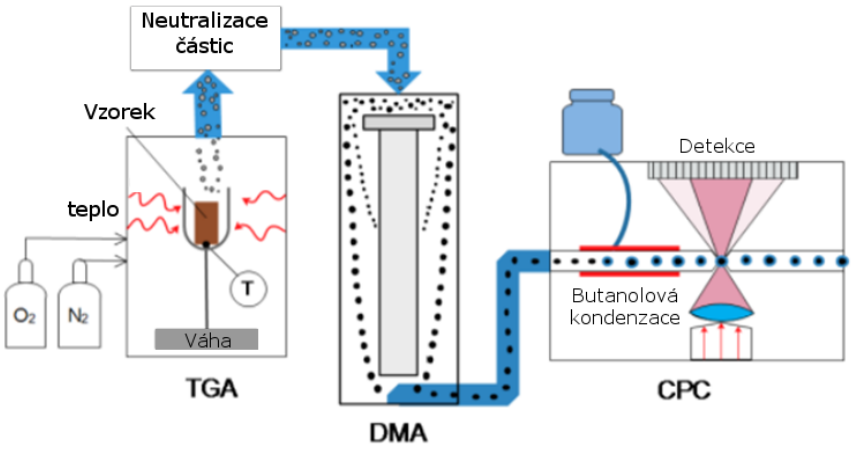
4.1.2 Měření částic

Plynné emise vzniklé při spalování se během TGA rozptýlí v testovací atmosféře a potom jsou vypuštěny z přístroje. Zbylé jemné částice jsou ochlazeny na pokojovou teplotu a vstupují přes tzv. impaktor, na kterém dojde k zachycení největších částic díky jejich velké kinetické energii, do přístroje pro **SMPS 3080** (na obr. 4.2 přístroj s obrazovkou), z nějž poté procházejí do přístroje pro neutralizaci náboje částic, který má označení **Advanced Aerosol Neutralizer 3087**. Následně dojde k znovunabití všech částic na jednotnou hodnotu a až poté může dojít k rozdělení v **DMA 3081 Long** (na obr. 4.2 dlouhá trubice), který je schopný rozdělit částice ve velikosti od 10 od 1000 nanometrů. Tento přístroj díky elektrostatickým silám zachytává na svoje stěny většinu částic tak, aby dále prošly jen částice určité velikosti. Jakmile je proud částic takto vytřízen, vstupuje již do **CPC 3775** (obr. 4.3), což je optický měřič (sčítač) částic. V něm je umístěna laserová dioda, která zaznamená průchod všech částic. Pro snazší sčítání se ještě používá butanol, jímž se částice obalí, a tak se zvětší. [19,40]

Obrázek 4.2 – SMPS 3080 a DMA 3081 Long [41]

Obrázek 4.3 – CPC 3775 [42]

Na obrázku 4.4 je zobrazení spojení TGA (termogravimetrické analýzy) s DMA (přístroj na rozdělení částic podle velikosti) a CPC (měřič částic).



Obrázek 4.4 – Schéma měřícího zařízení a proudu částic [40]

4.2 Příprava měření

Experimentální část práce lze rozdělit do několika celků. Nejprve bylo nutné vytvořit přesně navážené vzorky a následně změřit vlhkost použitého dřeva. V další části došlo k samotnému experimentu a na závěr bylo nutné ještě vyhodnotit naměřená data.

4.2.1 Příprava vzorku

Vzorky byly odebrány z desky smrkového dřeva uložené ve skladu Ústavu energetického inženýrství, přičemž byl kladen důraz na místo odběru, aby všechny vzorky pocházely z jedné, co možná nejužší, oblasti. Po domluvě s vedoucím práce bylo stanoveno, že vzorky budou tří hmotností, a to velký vzorek s hmotností 280 mg, střední vzorek se 150 mg a malý s 80 mg. Důraz byl taktéž kladen na stejnou tloušťku u všech tří vzorku, která byla 2 mm. Výška vzorků byla 20 mm a jediným měnícím se parametrem byla šířka, která se u největšího vzorku pohybovala okolo hodnoty 12 mm, u středního 6 mm a u nejmenšího 3 mm. Čtvrtým měřeným vzorkem se stala kůra, jejíž hmotnost byla stejná jako u malého vzorku, tedy 80 mg. Všechny vzorky byly nachystány dvakrát pro případné selhání techniky.

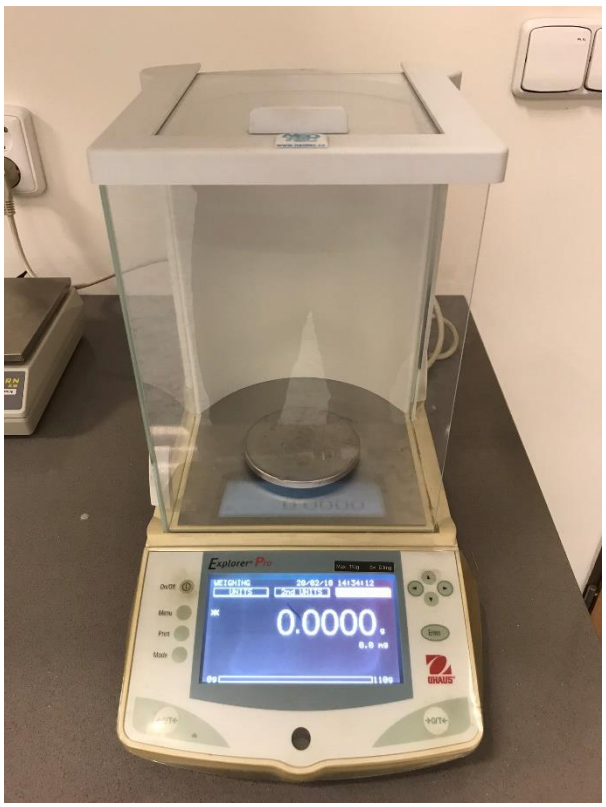
V práci bude dále používáno označení: „Velký“, „Střední“ a „Malý“ vzorek a „Kůra“, s jednotlivými parametry viz následující tabulka 4.1 a obrázek 4.5:

Tabulka 4.1 – Seřazení vzorků dle velikosti

	Váha [mg]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]	Šířka [mm]
Velký	280	20	2	12
Střední	150	20	2	6
Malý	80	20	2	3
Kůra	80	15	2,5	4

Obrázek 4.5 – Velikosti jednotlivých vzorků

Příprava vzorků probíhala pomocí ruční pily na dřevo a nože. Vzorky byly následně zváženy na vahách firmy Ohaus Corporation, Pine Brook NJ USA, model EP114C, viz obr. 4.6:



Obrázek 4.6 – Váha, model EP114C

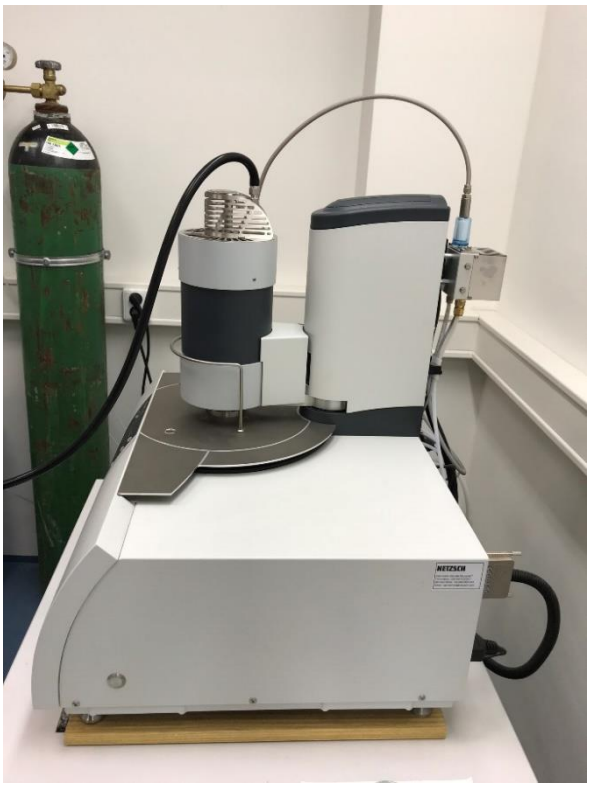
Obrázek 4.7 – Určení vlhkosti vzorků

4.2.2 Určení hodnoty vlhkosti gravimetrickou metodou

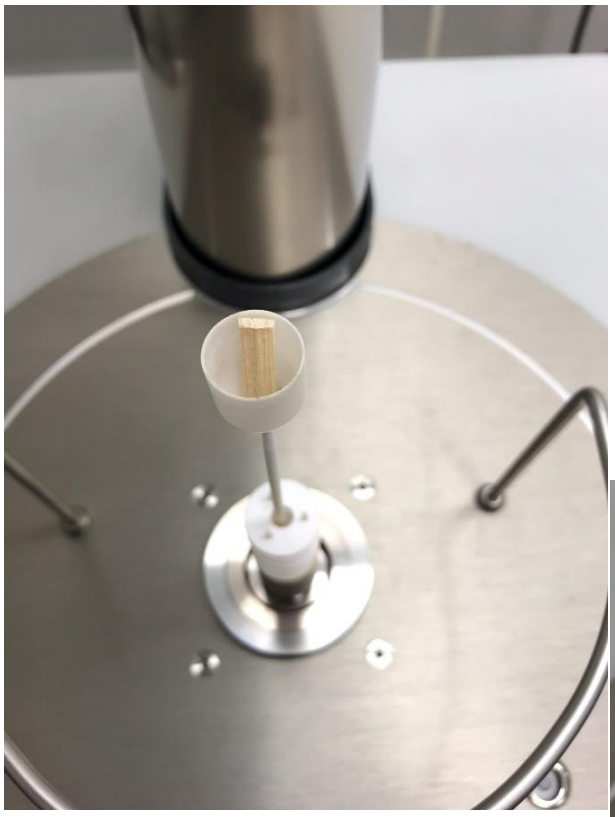
Pro stanovení vlhkosti bylo ještě nutné odebrat několik různých vzorků a ty poté v přístroji KERN MLS změřit. Metoda spočívá v určení hmotnosti vzorku před vysušením a poté hmotnosti absolutně suchého vzorku po vysušení teplotou okolo 103 °C. Z těchto hodnot poté přístroj vyhodnotí vlhkost vzorku před měřením. Přístroj pro měření vlhkosti je na obr. 4.7. Vlhkost měřeného vzorku byla 4,959 %.

4.3 Termogravimetrická analýza

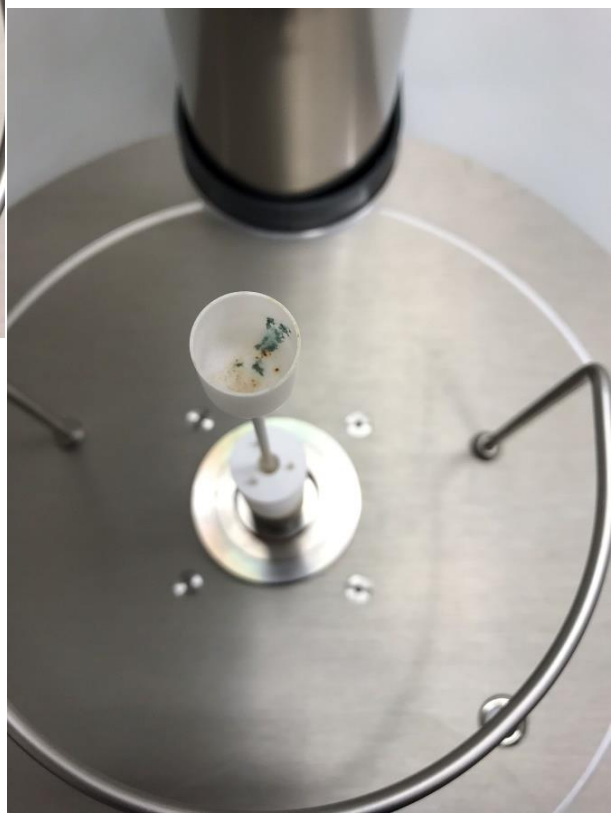
Nachystané vzorky byly poté jeden po druhém vkládány do přístroje NETZCH – Jupiter F3, jehož princip je popsán v podkapitole 4.1 a lze jej pozorovat na obr. 4.8. Výsledkem z toho měření byly křivky závislosti ubývající hmotnosti na zvyšující se teplotě, které budou rozebrány vzápětí. Za zmínku ovšem stojí obrázky 4.9 a 4.10, na kterých je patrné kvalitní shoření vzorku.



Obrázek 4.8 – Přístroj pro určení TGA

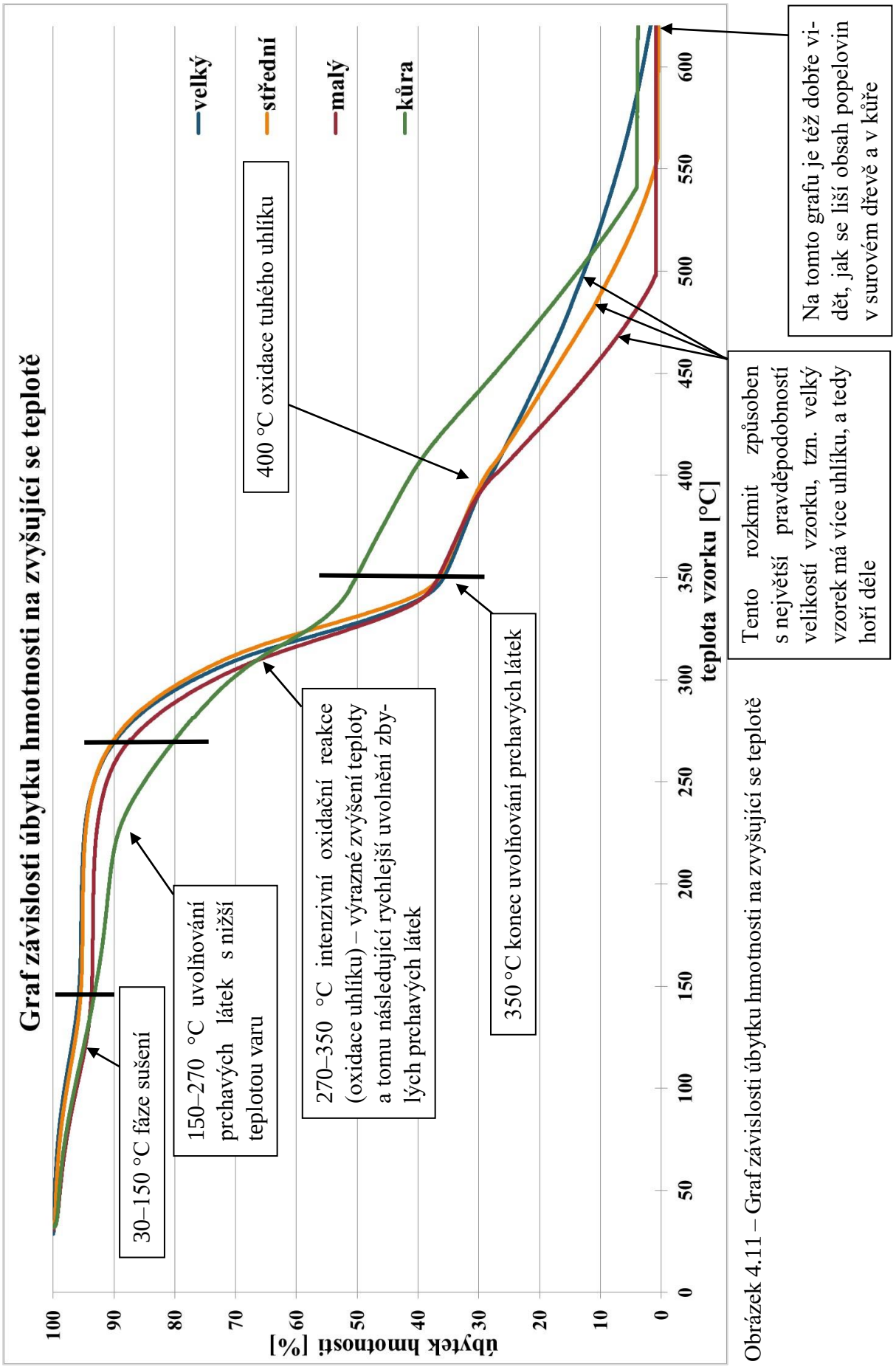


Obrázek 4.9 – Střední vzorek před experimentem



Obrázek 4.10 – Střední vzorek po experimentu

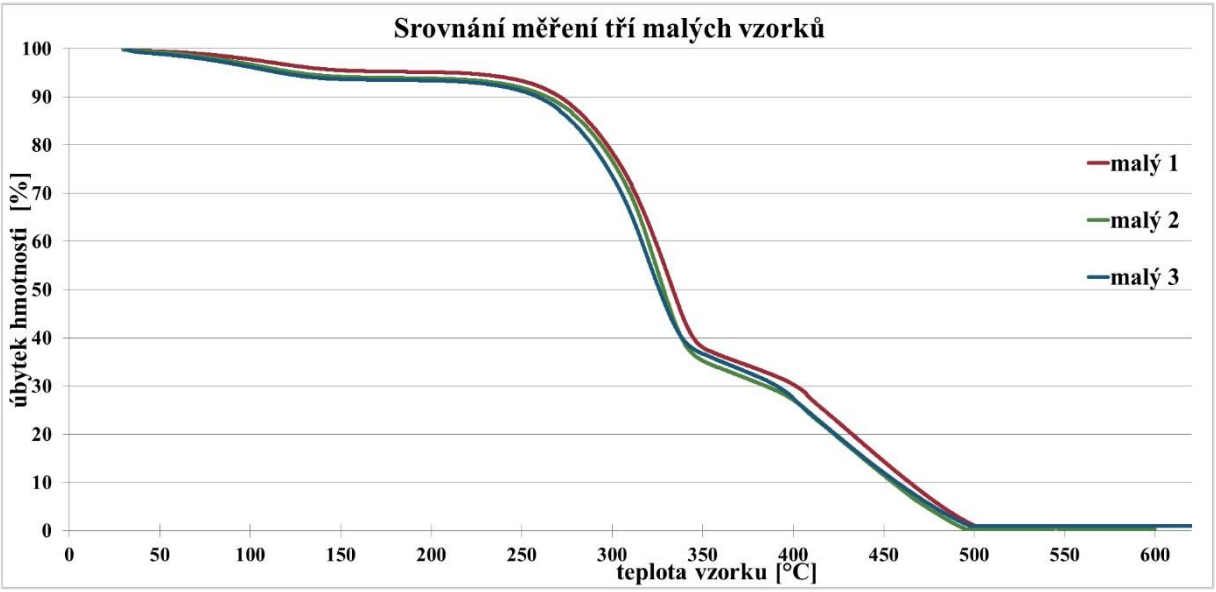
Na následující straně, na obr. 4.11, je vykreslen graf zobrazující závislost úbytku hmotnosti na zvyšující se teplotě. Tento graf vznikl z dat z přístroje *NETZCH – Jupiter F3* a jedná se o termogravimetrickou analýzu. Popis jednotlivých fází je uveden přímo u daných významných teplot.



Obrázek 4.11 – Graf závislosti úbytku hmotnosti na zvyšující se teplotě

4.3.1 Srovnání 3 malých vzorků

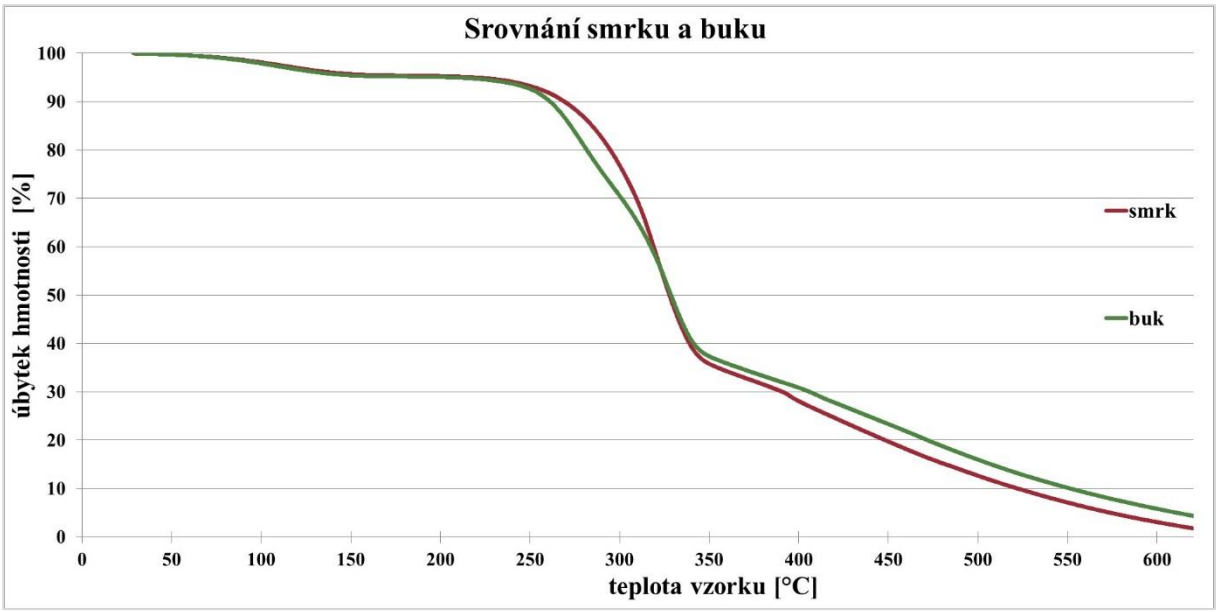
Při prvním i druhém měření malého vzorku došlo k chybám na měřících přístrojích ve fázi výdrži na stanovené teplotě, pár okamžiků před skončením měření. Vydařilo se až třetí měření. Nicméně díky dokončenému procesu hoření ve všech pokusech lze zobrazit a vyhodnotit graf na obr. 4.12, ve kterém je možné vidět pouze nepatrnou odchylku v měření malého vzorku, což si lze vyložit tak, že metoda je přesná a nevykazuje významné rozdíly při stejných měřeních.



Obrázek 4.12 – Srovnání měření tří malých vzorků

4.3.2 Srovnání měření velkých vzorků smrku a buku

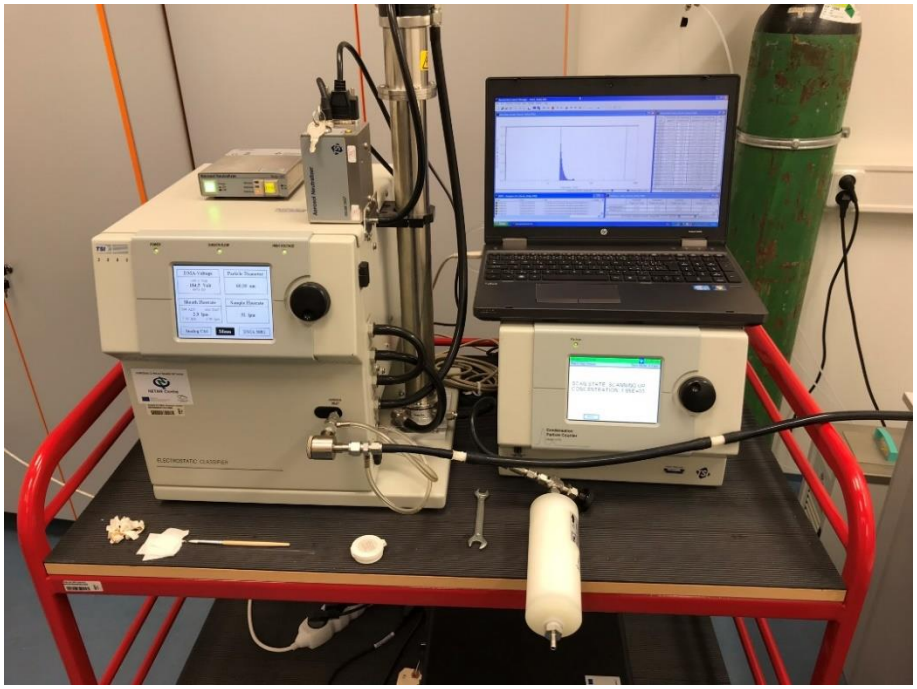
Na závěr vyhodnocení dat z TGA se nabízí srovnání měření velkých vzorků provedeného na dvou různých typech dřeva. Prvním je měkké smrkové dřevo, druhé je tvrdé dřevo z buku. Z grafu na obrázku 4.13 je zřetelně patrné, že bukové dřevo, které má větší hustotu, obsahuje více tuhého uhlíku, takže vydrží hořet déle.



Obrázek 4.13 – Srovnání měření smrku a buku

4.4 Vyhodnocení dat z přístroje pro měření částic

Jak je možné vidět na obr. 4.8, z přístroje pro měření TGA je vyvedena na jeho horní straně černá silikonová hadička, kterou proudí částice (bez usazování na stěnách) do přístroje měřícího počet a velikost částic, viz obr. 4.14. Princip je uveden na začátku kapitoly 4.

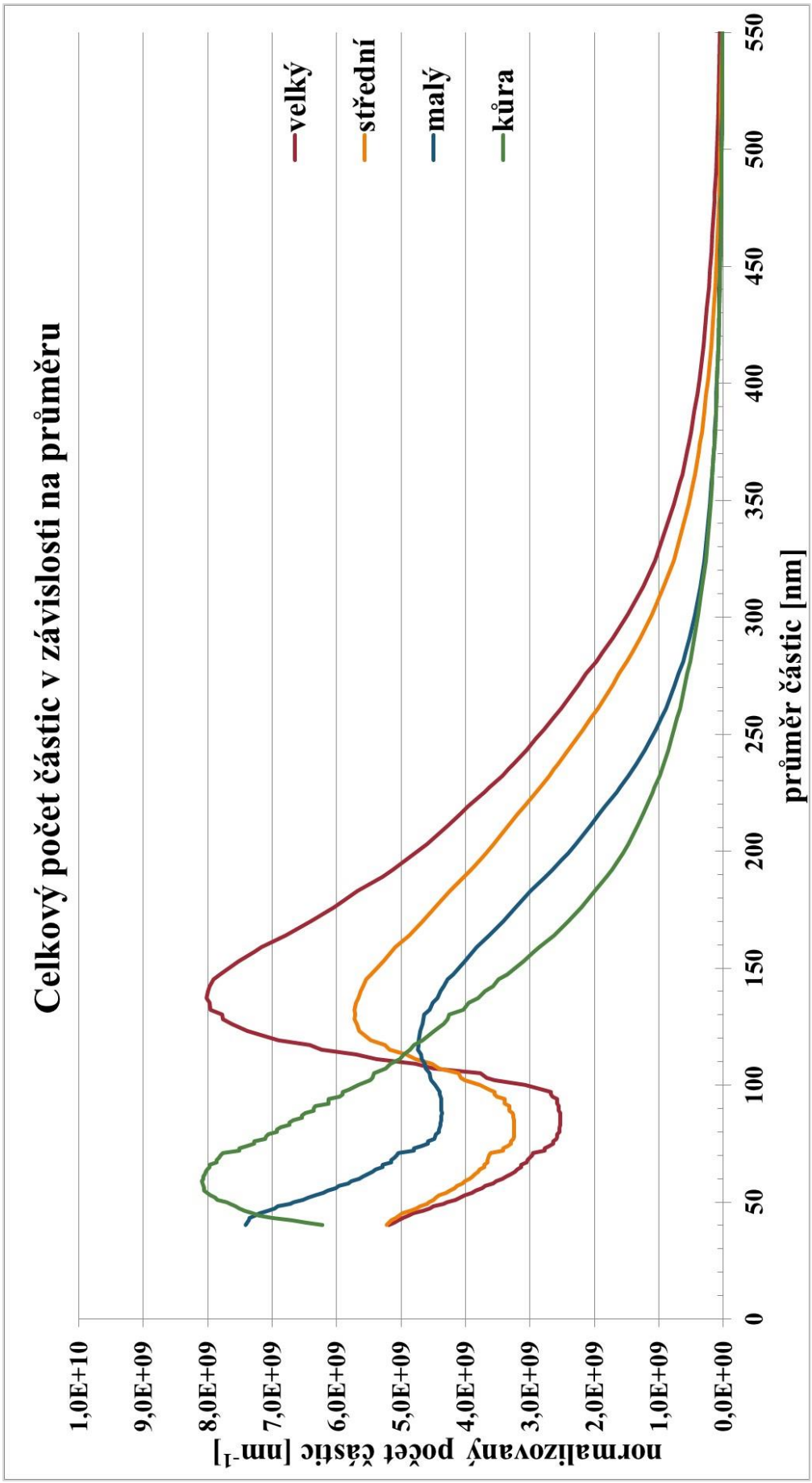


Obrázek 4.14 – Přístroje pro měření velikosti a počtu částic

Měření probíhá v minutových cyklech, kterých je dohromady 110. Přístroj v průběhu jednoho cyklu změří počet částic od nejmenších průměrů po největší.

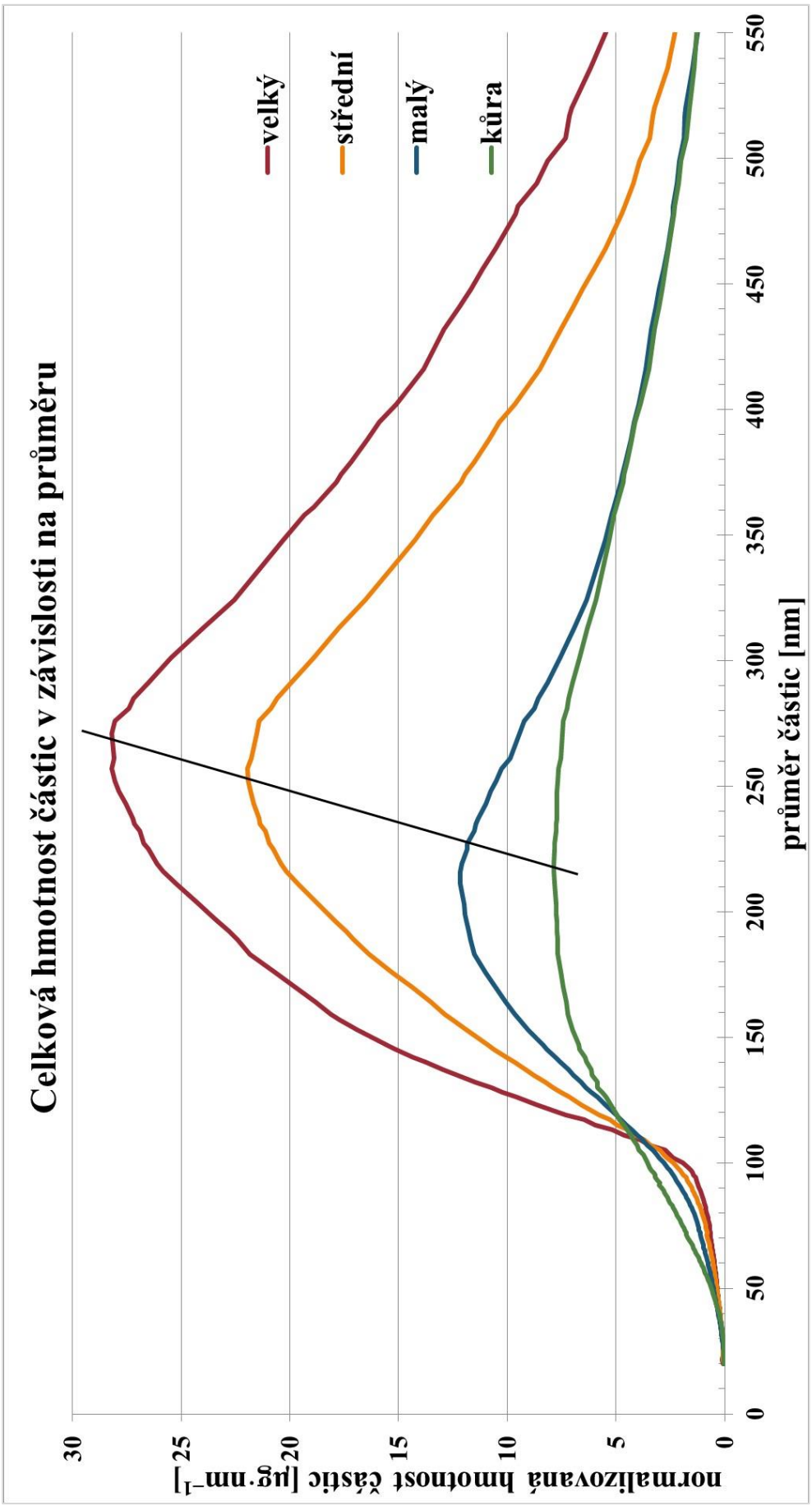
Nevýhodou přístroje ale je, že distribuční křivka z vyexportovaných dat má nelineární osu x, tedy osu, na které je průměr částic. To znamená, že jednotlivé intervaly velikostí jsou různě široké. Lze si to představit tak, že přístroj změří počet částic pro interval 18,8 – 19,5 nm, dále například 121,9 – 125,3 nm, atd. Problém nastává při konci minutového cyklu, kdy přístroj měří největší částice. Interval má totiž velikost 532,8 – 552,3 nm, a tedy je velký rozdíl šířky intervalu na začátku (0,7 nm) a na konci (19,5 nm). Proto je nutné udělat tzv. normalizaci dat na 1 nm. To znamená, že se sjednotí šířka všech intervalů na 1 nm, ale nezmění se tím počet částic. Nicméně je potom nutné uvést u grafů, že se jedná buď o normalizovaný počet částic s jednotkou nm^{-1}, nebo o normalizovanou hmotnost částic a $\mu g/nm^{-1}$.

Následující dva grafy, první se závislostí celkového počtu částic na průměru na obrázku 4.15 a druhý, na obrázku 4.16, zobrazující závislost hmotnosti na průměru částic, představují nejdůležitější data získaná z celého měření. Na začátku je ještě nutné podotknout, že měření jsou znázorněna až od 40 nm (kromě grafů pro hmotnosti, kde lze hodnoty pro nižší průměry vzhledem k dalšímu průběhu zanedbat). Je tomu tak proto, že vznikalo velké množství malých částic, které v dnešní době věda nedokáže zdůvodnit. Částečně je to patrné na následujícím grafu na obr. 4.15 pro vzorky dřeva, kdy ještě dochází k poklesu množství částic až do 70 nm. Nicméně kvůli porovnání s kůrou, která má vrchol v množství částic pro průměry okolo 50 nm, nelze grafy zobrazit až od 70 nm.



Obrázek 4.15 – Graf závislosti počtu částic na průměru

Na následujícím grafu na obr. 4.15 je možné vidět, jak se liší počet a průměr částic při spalování samotného dřeva a kůry. Kůra se oproti dřevu liší tak, že má maximální počet částic pro průměr mezi 60 a 70 nanometry. U dřeva jsou křivky s maximálními hodnotami pro průměry okolo 140 nm.

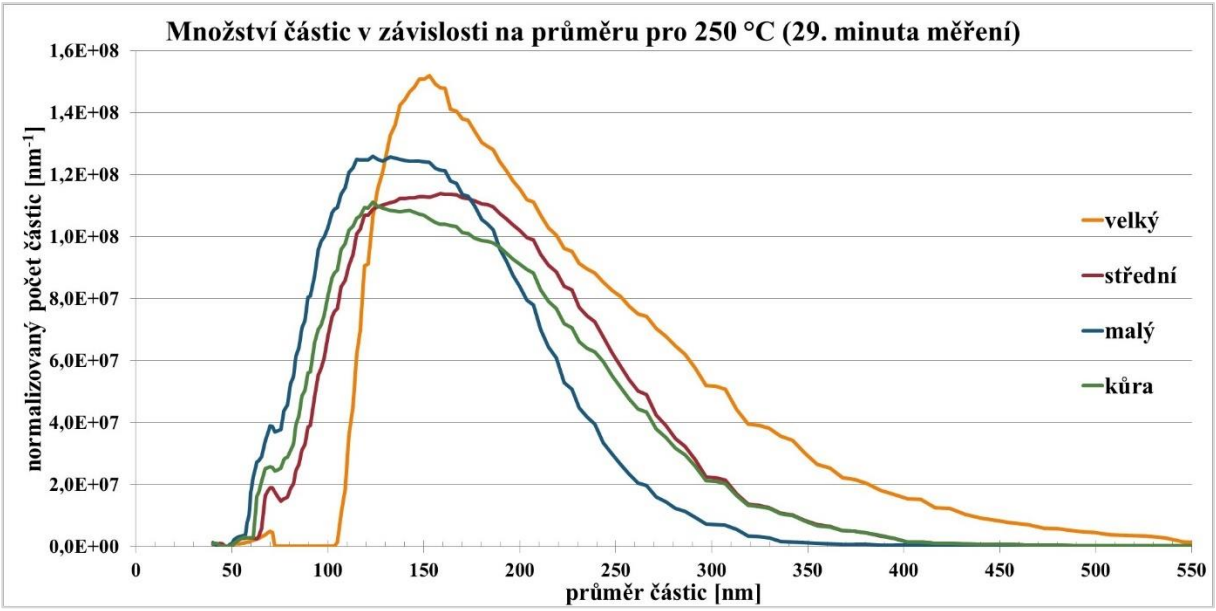


Obrázek 4.16 – Graf závislosti hmotnosti částic na průměru

Na grafu na obr. 4.16 lze pozorovat závislost hmotnosti na průměru částic. Dle načrtnuté přímky je možné si povšimnout zajímavého faktu, že čím je větší vzorek, tím je více par látek, které poté kondenzují do větších kapiček. Hmotnost bylo možné určit z předpokladu, že všechny částice jsou kulovitého tvaru o hustotě $\rho = 1200\ kg/m^3$.

4.4.1 Množství částic v závislosti na průměru pro teplotu 250 °C

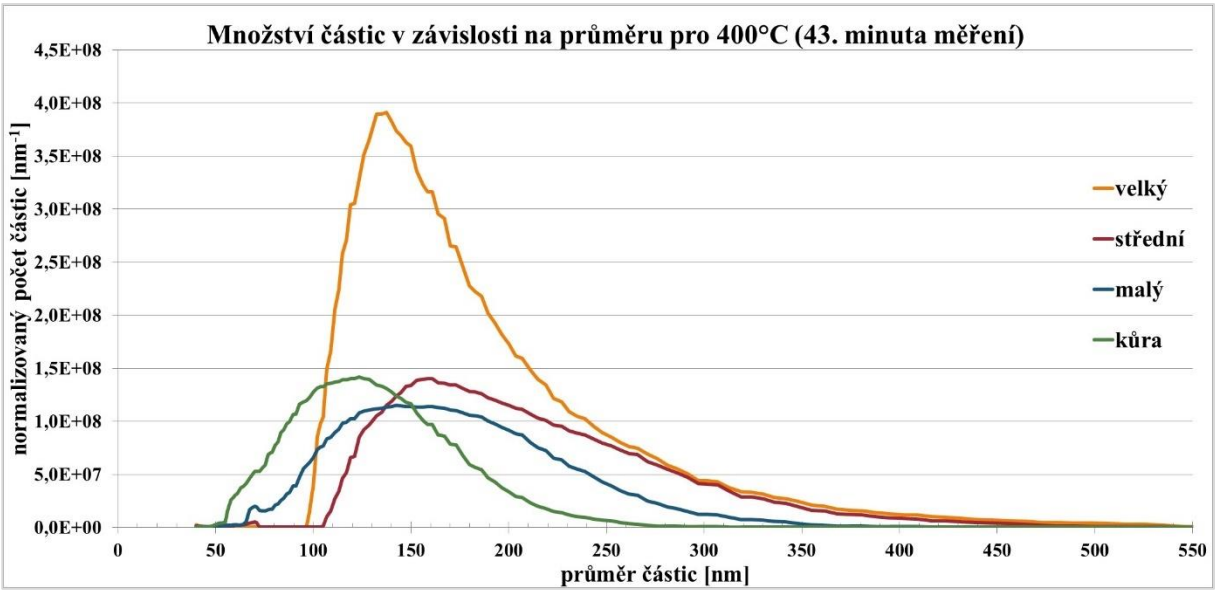
Zajímavým okamžikem při měření je teplota 250 °C, při které, jak je možně si povšimnout na obrázku 4.11, začne docházet k intenzivní oxidaci uhlíku a které bylo dosaženo v čase 28 minut. Kvůli téměř minutovému zpoždění proudu částic z TGA do měřiče částic, je uveden graf až v 29. minutě měření na obr. 4.17. Výsledky z tohoto časového úseku jsou však velmi zajímavé, neboť vznikalo více částic o velikosti v intervalu od 50 nm až do 170 nm z malého vzorku než ze vzorku středního.



Obrázek 4.17 – Množství částic při 250 °C za jednu minutu měření

4.4.2 Množství částic v závislosti na průměru pro teplotu 400 °C

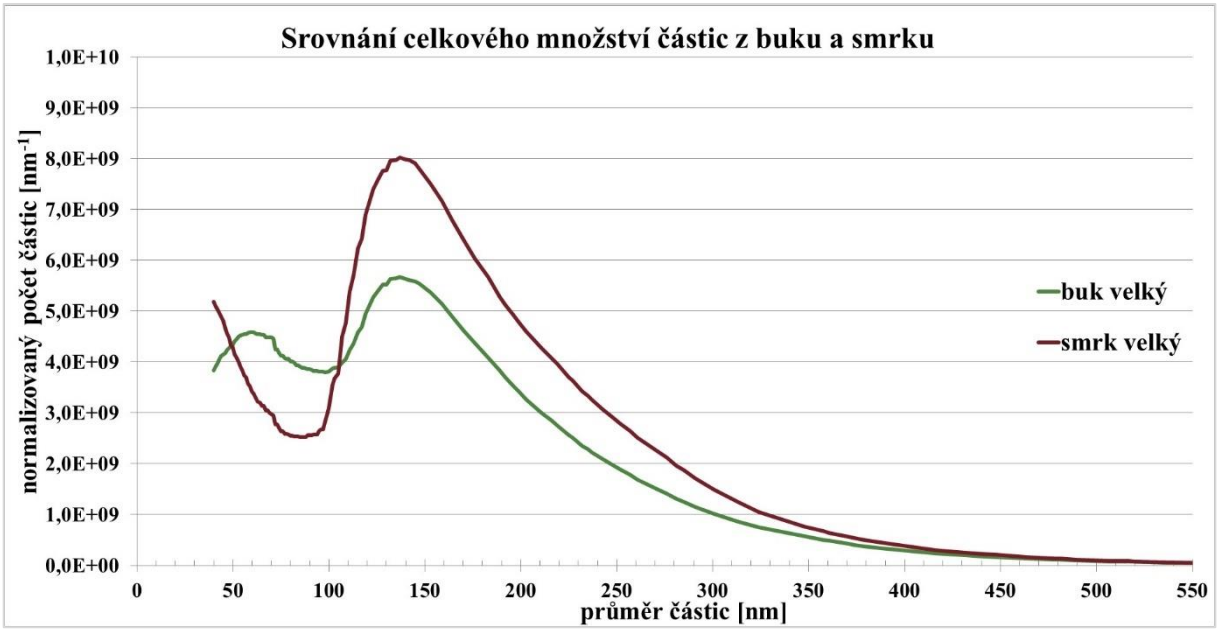
Zajímavé také je, že při teplotě 400 °C ve 43. minutě měření, kdy dojde k uvolnění všech prchavých látek, vznikalo mnohonásobně větší množství z velkého vzorku než ze vzorku malého a středního, viz obr. 4.18.



Obrázek 4.18 – Množství částic při 400 °C za jednu minutu měření

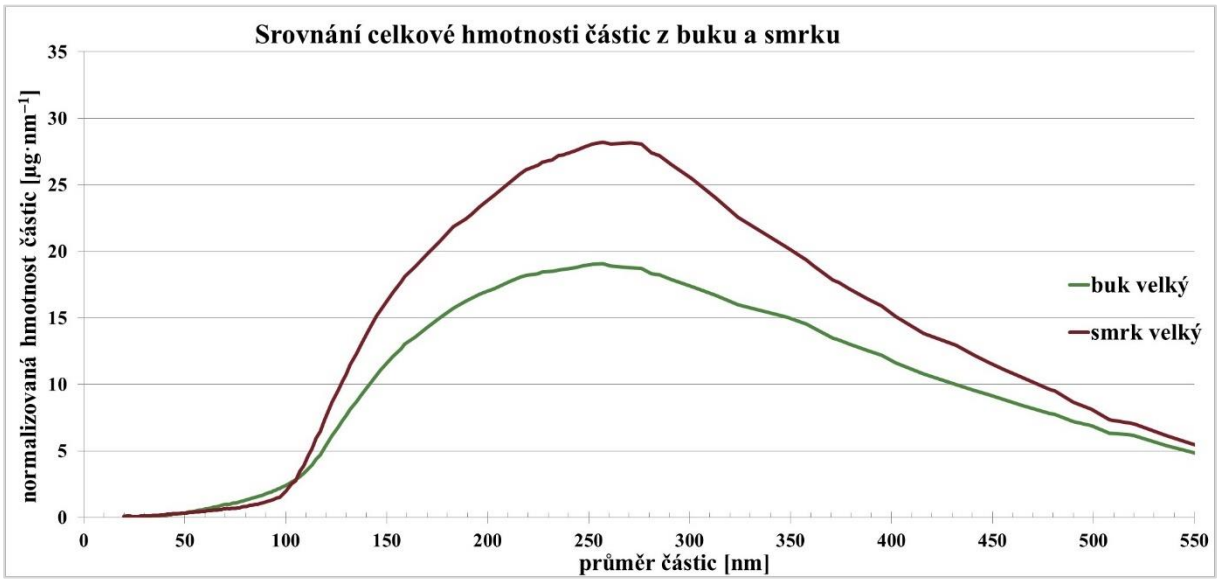
4.4.3 Srovnání buku a smrku

Na závěr je vhodné ještě uvést porovnání grafů velkého vzorku smrku a buku na obrázcích 4.19 a 4.20. Jak je možné si povšimnout, částic smrku je pro průměry nad 100 nanometrů více než je částic buku. Je to dáno faktem, že smrkové dřevo obsahuje více prchavých látek než dřevo bukové.



Obrázek 4.19 – Srovnání celkového množství částic u buku a smrku

Křivky celkové hmotnosti opět souvisí s množstvím prchavých látek.



Obrázek 4.20 – Srovnání celkové hmotnosti částic buku a smrku

5 ZÁVĚR

Tato práce se zabývá problematikou emisí jemných částic při spalování biomasy. V úvodní kapitole je tedy vymezeno, proč je důležité se zabývat emisemi nejen plynnými, ale především emisemi jemných částic vznikajících při spalování.

Následující kapitola pojednává obecně o biomase a dále specifikuje různé druhy a způsoby využití tohoto přírodního materiálu v energetice. Konci kapitoly je věnována část, která již více specifikuje metodu využití použitou v této práci. Danou metodou je spalování, čímž se zabývá následující část práce. Protože spalování však velice záleží na chemickém složení biomasy a také na výhřevnosti různých paliv, bylo nejprve nutné rozlišit jednotlivé druhy ať už rostlinné, anebo dřevěné biomasy. Následoval popis fází samotného spalování a výpočty vzniklého tepla při hoření jednotlivých prvků. Po popsání všeho předchozího přišla na řadu již problematika emisí. Ať už plynných, nebo, což bylo i cílem práce, jemných částic. Nebezpečností emisí oxidu uhličitého, uhelnatého a jiných plynů se zabývalo již nespočet prací a je nasnadě říct, že se jednotlivé vlády na světě řešením problému skleníkového efektu a snižováním emisí CO_2, či NO_x, již začaly zabývat. Společností naopak poslední dobou čím dál více rezonuje téma jemných částic a jejich nebezpečnosti pro živé organismy. Proto konec kapitoly patřil právě popisu nebezpečnosti a vzniku jemných částic. Dále také množstvím jemných částic vypouštěných do ovzduší v roce 2000 a 2015. Z přiložených tabulek je patrné, že se daří snižovat množství těchto částic v atmosféře v České republice.

Poslední kapitolou byl již popis měřící aparatury a samotné zobrazení naměřených výsledků. Díky spojení přístrojů pro měření termogravimetrické analýzy a měřiče velikosti částic lze vyvozovat velmi zajímavé závěry z měření. Jako příklad se dají uvést teploty 250 a 400 °C. Z dat z přístroje pro určení termogravimetrické analýzy lze vytvořit graf z nějž je poté patrné, že při teplotě okolo 250 °C se uvolňuje značné množství prchavých látek, což by se mohlo nějakým zajímavým způsobem projevit na grafu z měřiče velikosti částic. Proto při pohledu právě na tento graf na obr. 33 je vidět, že nejvíce částic vzniká pro všechny 4 vzorky v rozmezí intervalu 100 až 200 nm. Zajímavější je však fakt, že v intervalu do 170 nm vzniká více částic z malého vzorku než ze vzorku středního. Další zajímavou teplotou je 400 °C, kdy jsou již uvolněné všechny prchavé látky a oxiduje čistý uhlík. Tyto hodnoty jsou vyneseny na obr. 34 a zajímavé pro toto měření je, že částic z velkého vzorku vzniká 3x více než z poloviního středního vzorku.

Zbylé grafy pro celkovou hmotnost a počet částic v závislosti na průměru vycházejí tak, jak by se dalo očekávat. Tedy že z velkého vzorku je podle průměru více částic než ze středního a stejně tak ze středního je více než z malého. Zvláštní křivku oproti surovému dřevu má spalovaná kůra, ze které je velké množství částic o průměru okolo 50 nm.

Poslední skupinou grafů, které jsou v práci uvedeny, jsou grafy srovnání spalování bukového a smrkového dřeva. Zatímco graf pro termogravimetrickou analýzu je pouze ověřením faktu, že bukové dřevo vydrží hořet déle než smrkové, protože má větší hustotu, a tedy i větší obsah uhlíku, na grafu z přístroje pro měření částic je možné vidět, že při spalování smrku se uvolňuje větší množství částic než z dubu. Tyto výsledky mohou být dány faktem, že ve smrkovém dřevě je více prchavých látek než v dřevě dubovém. Takže z hlediska množství emisí jemných částic se dá konstatovat, že je vhodnější spalovat tvrdé dubové dřevo než měkké smrkové.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] Studijní materiály z předmětu: Termomechanika. Vyučující: prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D

[2] *History of Power* [online]. [cit. 2018-01-24]. Dostupné z: http://www.powermag.com/history-of-power-the-evolution-of-the-electric-generation-industry/

[3] *Roční zpráva o provozu ES ČR 2016* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/462820/Rocni_zprava_provoz_ES_2016.pdf/800e5a09-a58a-4a73-913f-abc30cda42a5

[4] *Biomasa – využití, zpracování, výhody a nevýhody, energetické využití v ČR* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/obnovitelne-zdroje/biomasa-vyuziti-zpracovani-vyhody-a-nevyhody/

[5] SIPPULA, O. *Fine particle formation and emissions in biomass combustion*. Kuopio, Finland, 2010. Department of Environmental Science, Faculty of Science and Forestry, University of Eastern Finland. [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: http://www.atm.helsinki.fi/FAAR/reportseries/rs-108.pdf

[6] *What is biomass?* [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: https://www.forestry.gov.uk/fr/beeh-9uhlqv

[7] *Biomass explanied.* [online]. [cit. 2018-1-29]. Dostupné z: https://www.eia.gov/energyexplained/?page=biomass_home

[8] *Náklady na produkci štěpky z rychle rostoucích topolů.* [online]. [cit. 2018-04-18] *https://biom.cz/cz/odborne-clanky/naklady-na-produkci-stepky-z-rychle-rostoucich-topolu*

[9] *Crops for Energy* [online]. [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: http://www.crops4energy.co.uk/miscanthus/

[10] PŘICHYSTAL, L. *Biomasa jako obnovitelný zdroj energie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2008. 53 s. Vedoucí bakalářské práce prof. RNDr. Zdeněk Friedl, CSc. [online]. [cit. 2018-01-29]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/4486/biomasa%20jako%20obnoviteln%C3%BD%20zdroj%20energie.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[11] *Rychle rostoucí* dřeviny [online]. [cit. 2018-01-25]. Dostupné z: http://www.magazinzahrada.cz/galerie/rychle-rostouci-dreviny-ozdoba-zahrad-i-ekologicke-palivo/9.html

[12] *Jak fungují bioplynové stanice?* [online]. [cit. 2018-1-29]. Dostupné z: https://www.ekobonus.cz/jak-funguji-bioplynove-stanice-ukazkovy-priklad-zajimaveho-reseni-z-trebone

[13] *Bioplynové stanice.* [online]. [cit. 2018-1-29]. Dostupné z: http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=bioplynove_stanice&site=odpady

[14] *Technologie zpracování biomasy za účelem energetického využití.* [online]. [cit. 2018-1-31]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty/files/23/23-technologie_zpracovani_biomasy_za_ucelem_energetickeho_vyuziti_travnicek.pdf

[15] *Bionafta* [online]. [28-04-2018]. Dostupné z: *http://kfch.upce.cz/htmls/vedecka_cinnost_bionafta.htm*

[16] *Výroba bioetanolu.* [online]. [cit. 2018-02-01]. Dostupné z: http://www.cukrlisty.cz/on_line/2010/PDF/267-271.PDF

[17] *Zplyňování biomasy – možnosti uplatnění.* [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/zplynovani-biomasy-moznosti-uplatneni
[18] *Biomass Combustion.* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: https://www.uaex.edu/publications/pdf/FSA-1056.pdf
[19] KOŠŤÁL, J. *Vliv provozních parametrů kotle na přítomnost jemných částic ve spalinách*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
[20] JANDAČKA, Jozef a Milan MALCHO. *Biomasa jako zdroj energie*. Žilina: Juraj Štefuň - Georg, 2007. ISBN 978-80-969161-4-6.
[21] Studijní materiály z předmětu: Spalovací zařízení a výměníky tepla. Vyučující: doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D
[22] *Proces hoření kusového dřeva.* [online]. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: http://energetika.tzb-info.cz/8716-proces-horeni-kusoveho-dreva
[23] *Oxid uhličitý* [online]. [07-02-2018]. Dostupné z: *http://arnika.org/oxid-uhlicity*
[24] *Carbon Dioxide.* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/
[25] *Oxid uhelnatý* [online]. [07-02-2018]. Dostupné z: *http://arnika.org/oxid-uhelnaty*
[26] *Oxidy síry* [online]. [07-02-2018]. Dostupné z: *http://arnika.org/oxidy-siry*
[27] *Oxidy dusíku* [online]. [07-02-2018]. Dostupné z: *http://www.vitejtenazemi.cz/vzduch/index.php?article=130*
[28] HRDLIČKA, J., KOUTSKÝ, B., HRDLIČKA, F.: *Problematika tvorby persistentních organických látek při spalování biomasy*. *Energie z biomasy,* sborník přednášek, Brno, 2003
[29] *Dioxiny (PCDD/PCDF).* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: http://arnika.org/dioxiny-pcdd-pcdf
[30] *Spalování biomasy a tvorba PCDD/F.* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: https://biom.cz/index.shtml?x=71291
[31] *Emise při spalování biomasy.* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: https://biom.cz/cz/odborne-clanky/emise-pri-spalovani-biomasy-2
[32] ŠTĚPÁNEK, P. *Mechanické odlučování popílku při spalování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
[33] *Jak nám škodí prach v ovzduší.* [online]. [cit. 2018-02-16]. Dostupné z: http://www.tesin.cz/mesto-cesky-tesin/informace-o-zivotnim-prostredi/ovzdusi/prachove-castice/
[34] DRASTICHOVÁ, Vendula. *Měření emisí ultrajemných částic z malých spalovacích zařízení se zřetelem na nové poznatky z výzkumu bezpečnosti nanočástic.* Ostrava, 2015. Disertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivana Bartlová, CSc.
[35] *Emisní bilance České republiky 2015.* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/15embil/rezzo3/rezzo3_CZ.html
[36] *Emisní bilance České republiky 2000.* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/oez/embil/00embil/rezzo3/rezzo3_CZ.html

[37] *Air quality standarts.* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm
[38] *Mapy znečistění ovzduší.* [online]. [cit. 2018-05-11]. Dostupné z: http://prasu.chmi.cz:8080/IskoPollutionMapView/faces/viewMapImages.xhtml
[39] *Mapy znečistění ovzduší.* [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z: http://prasu.chmi.cz:8080/IskoPollutionMapView/faces/viewMapImages.xhtml
[40] POLAČIK Ján, POSPÍŠIL Jiří, ŠNAJDÁREK Ladisav. *Size Distribution of Particulate Matter Emitted During Controlled Temperature Rise od Redwood Sample.* Brno, 2017. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering
[41] Manuál k přístroji SMPS 3080. Vydal TSI. 2009
[42] Manuál k přístroji CPC 3775. Vydal TSI. 2007

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	**Veličina**	**Jednotka**
A^r	Popelovina	
CPC	Měřič částic	
E	Spektrální hustota zářivého toku	W/m^3
T	Transmisivita	%
V_{daf}	Objem prchavých látek	hm%
λ	Vlnová délka	m

Zkratka	**Význam**
A^r	Popelovina
CPC	Měřič částic
DMA	Přístroj pro rozdělení částic dle velikost
h^r	Hořlavina
NASA	Národní úřad pro letectví a kosmonautiku
NO_x	Souhrnné označení pro oxidy dusíku
OZE	Obnovitelné zdroje energie
PAH	Polychlorované aromatické uhlovodíky
PCB	Polychlorované bifenily
PCDD	Polychlorovaný dibenzodioxin
PCDF	Polychlorovaný dibenzofuran
PM	Částice
SMPS	Rozdělení částic podle jednotlivých frakcí
TGA	Termogravimetrická analýza
TZL	Tuhé znečišťující látky
W^r	Voda v biomase

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 – Vysvětlení skleníkového efektu [1] 15
Obrázek 1.2 – Podíl paliv na výrobě elektřiny (brutto) v roce 2016 [3] 16
Obrázek 1.3 – Energie dopadající na zemský povrch za jeden rok (kWh/m^2) [1] 16
Obrázek 2.1 – Alej rychle rostoucích topolů [11] 18
Obrázek 2.2 – Sloní tráva [9] 18
Obrázek 2.3 – Schéma bioplynové stanice [13] 19
Obrázek 2.4 – Rovnice popisující výrobu bionafty [15] 20
Obrázek 2.5 – Porovnání bionafty a motorové nafty [10] 21
Obrázek 2.6 – Schéma výroby bioetanolu z plodiny obsahující přímo cukry [16] 22
Obrázek 2.7 – Schéma výroby bioetanolu z plodiny obsahující škroby [16] 22
Obrázek 2.8 – Rozdíl mezi způsoby dodání tepla biomase [17] 24
Obrázek 3.1 – Složení pevných paliv [19] 25
Obrázek 3.2 – Zjednodušené zobrazení reakce vzdušného kyslíku se dřevem [22] 26
Obrázek 3.3 – Měření oxidu uhličitého CO_2 v atmosféře [24] 28
Obrázek 3.4 – Vývoj množství uhlíku, graf vytvořený z výzkumu ledovců [24] 29
Obrázek 3.5 – Faktor PAU u kotlů malého výkonu při spalování různých paliv [31] ... 31
Obrázek 3.6 – Porovnání jednotlivých velikostí PM [33] 32
Obrázek 3.7 – Zachycení částic PM_x v lidském těle [34] 33
Obrázek 3.8 – Tvorba jemných částic při spalování [34] 34
Obrázek 3.9 – Množství částic v Brně ze dne 10. 5. 2018 [38] 36
Obrázek 3.10 – Množství částic v Brně dne 16. 5. 2018 [39] 36
Obrázek 4.1 – Keramická miska umístěná na přesných vahách 37
Obrázek 4.2 – SMPS 3080 a DMA 3081 Long [41] 38
Obrázek 4.3 – CPC 3775 [42] 38
Obrázek 4.4 – Schéma měřícího zařízení a proudu částic [40] 38
Obrázek 4.5 – Velikosti jednotlivých vzorků 39
Obrázek 4.6 – Váha, model EP114C 40
Obrázek 4.7 – Určení vlhkosti vzorků 40
Obrázek 4.8 – Přístroj pro určení TGA 40
Obrázek 4.9 – Střední vzorek před experimentem 41
Obrázek 4.10 – Střední vzorek po experimentu 41
Obrázek 4.11 – Graf závislosti úbytku hmotnosti na zvyšující se teplotě 42
Obrázek 4.12 – Srovnání měření tří malých vzorků 43
Obrázek 4.13 – Srovnání měření smrku a buku 43
Obrázek 4.14 – Přístroje pro měření velikosti a počtu částic 44
Obrázek 4.15 – Graf závislosti počtu částic na průměru 45
Obrázek 4.16 – Graf závislosti hmotnosti částic na průměru 46
Obrázek 4.17 – Množství částic při 250 °C za jednu minutu měření 47
Obrázek 4.18 – Množství částic při 400 °C za jednu minutu měření 47
Obrázek 4.19 – Srovnání celkového množství částic u buku a smrku 48
Obrázek 4.20 – Srovnání celkové hmotnosti částic buku a smrku 48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 – Výnosy suché hmoty u vybraných typů plodin [10] 18
Tabulka 2.2 – Způsoby využití biomasy k energetickým účelům [10] 19
Tabulka 2.3 – Produkční potenciál výroby bioetanolu pro různé suroviny [16] 21
Tabulka 2.4 – Chemické reakce pyrolytického procesu v závislosti na teplotě [14] 23
Tabulka 3.1 – Chemické složení biomasy a výhřevnost [20] 25
Tabulka 3.2 – Obsah prchavé hořlaviny v různých typech paliv [14] 26
Tabulka 3.3 – Emise PCDD a PAH ze spalování různých druhů biopaliv [30] 30
Tabulka 3.4 – Srovnání emisí TZL pro roky 2000 a 2015 [35,36] 35
Tabulka 4.1 – Seřazení vzorků dle velikosti 39