



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

# VLIV PROVOZNÍCH PARAMETRŮ SPALOVACÍHO PROCESU NA KONCENTRACI JEMNÝCH ČÁSTIC VE SPALINÁCH BIOMASOVÝCH KOTLŮ

IMPACT OF OPERATION PARAMETERS ON FINE COMBUSTION PARTICLES CONCENTRATION IN  
THE FLUE GAS OF BIOMASS BOILERS

## DIZERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Ján Poláčik

## ŠKOLITEL

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2020

## **Abstrakt**

Práca sa venuje problematike vplyvu prevádzkových parametrov spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc. Rešeršná časť práce popisuje vlastnosti jemných častíc, ich základné rozdelenie, vplyv na zdravie človeka a životné prostredie. Zhrnuté sú základné vedomosti vplyvu spaľovacích procesov biomasy na emisie jemných častíc s veľkosťou do 1  $\mu\text{m}$ . V hlavnej časti je popísané experimentálne vybavenie pre vyhodnocovanie veľkostnej distribúcie jemných častíc. Nasleduje popis použitých experimentálnych zariadení pre spaľovanie s nameranými výsledkami pre rôzne parametre spaľovania v laboratórnych podmienkach, automatických kotloch, ako aj v krbe s ručným prikladaním paliva. Hlavnými sledovanými parametrami boli teplota spaľovania, množstvo kyslíka, druh paliva a geometria spaľovanej biomasy. Vyhodnotený je vplyv zmeny jednotlivých parametrov na tvorbu jemných častíc. Záver práce zhrňa, ako je vhodnou voľbou prevádzkových parametrov spaľovania možné významne ovplyvniť emisie jemných častíc.

## **Kľúčové slová:**

Jemné častice, biomasa, spaľovanie, emisie

## **Abstract**

This work deals with the impact of operating parameters on fine combustion particles formation in the flue gas of biomass combustion device. The research part of the work describes the properties of fine particles, its basic division, impact on human health and the environment. The basic knowledge of the influence of biomass combustion process on fine particles production up to 1  $\mu\text{m}$  in size is summarized. The main part describes the experimental setup for evaluating the size distribution of fine particles. The following section describes the experimental setup with measured results for various combustion parameters in laboratory combustion, automatic boilers, as well as in the manual wood-burning combustion device. The main parameters which were tested were combustion temperature, oxygen amount, type of fuel and geometry of the burned biomass. The impact of individual parameters on the formation of the fine particles is evaluated. The final part of the thesis summarizes the ways in which it is possible to significantly influence the emissions of fine particles by the appropriate choice of combustion operating parameters.

## **Key words:**

Fine particles, Biomass, Combustion, Emissions

### **Bibliografická citace**

POLÁČEK, Ján. *Vliv provozních parametrů spalovacího procesu na koncentraci jemných částic ve spalinách biomasových kotlů* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122537>. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

### **Prohlášení o původnosti práce**

Prohlašuji, že jsem dizertační práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. a s použitím uvedené literatury.

V Brně, 14. 07. 2020

---

Ing. Ján Poláčik

## **Podakovanie**

Týmto by som rád poďakoval svojmu školiteľovi doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D., za odborné vedenie a oporu počas celého doktorského štúdia. Ďalej ďakujem Ing. Tomášovi Sitkovi a Ing. Ladislavovi Šnajdárkovi, Ph.D., za cenné rady a pomoc s realizáciou experimentov. Ďakujem tiež svojej rodine a blízkym priateľom. Ďakujem!

## Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>CIELE PRÁCE.....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>ZHRNUTIE SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA ODBORNEJ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>5</b>
3.1	Jemné častice .....	5
3.1.1	<i>Princíp vzniku spaľovacích častíc.....</i>	5
3.1.2	<i>Rozdelenie častíc vzniknutých spaľovaním.....</i>	6
3.1.3	<i>Zloženie a charakteristika jemných častíc .....</i>	7
3.2	Vplyv častíc na zdravie človeka .....	9
3.3	Legislatíva, emisné a imisné limity jemných častíc .....	12
3.4	Zloženie biomasy .....	13
3.5	Vplyv parametrov spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc .....	14
3.5.1	<i>Vplyv povrchu a tvaru vzorky dreva pri horení.....</i>	14
3.5.2	<i>Práškové palivo.....</i>	14
3.5.3	<i>Vplyv chemického zloženia biomasy.....</i>	14
3.5.4	<i>Vplyv zloženia atmosféry spaľovania .....</i>	15
3.5.5	<i>Typ spaľovacieho zariadenia .....</i>	17
3.6	Hmotnostná a povrchová charakteristika jemných častíc .....	18
3.7	Využitie hmotnostného spektrometra pre prvkové zloženie spalín .....	20
<b>4</b>	<b>ANALÝZA, INTERPRETÁCIA A ZHODNOTENIE POZNATKOV .....</b>	<b>21</b>
<b>5</b>	<b>EXPERIMENTÁLNE MERANIA A PRÍSTROJOVÉ VYBAVENIE .....</b>	<b>23</b>
5.1	Odber spalín pre následnú analýzu a detekciu jemných častíc.....	23
5.1.1	<i>Vplyv izokinetiky na odber jemných častíc .....</i>	24
5.1.2	<i>Ekvivalentný priemer častice .....</i>	26
5.2	Identifikácia veľkostnej distribúcie častíc.....	27
5.3	Optické meranie koncentrácie jemných častíc (Palas Promo 2000) .....	31
5.4	Riedenie vysokých koncentrácií spalín .....	31
5.5	Impaktor DEKATI .....	32
5.5.1	<i>Vyhodnocovanie meraní impaktorom .....</i>	34
5.6	Odber vzorky na filter a ich analýza .....	35
5.7	Analýza plynov v spalínách.....	36
5.8	Spaľovanie v laboratórnych podmienkach (TGA + SMPS) .....	36
5.9	Nepresnosť, opakovateľnosť a možné chyby meraní.....	37
<b>6</b>	<b>SPAĽOVANIE V LABORATÓRNYCH PODMIENKACH - TGA.....</b>	<b>39</b>

6.1	Výsledky laboratórných spaľovacích procesov.....	39
6.1.1	Vplyv prítomnosti kyslíka na produkciu jemných častíc .....	40
6.1.2	Vplyv teploty na tvorbu jemných častíc.....	44
6.1.3	Vplyv geometrie vzorky a veľkosti povrchu .....	46
6.1.4	Vplyv rôznych vlastností spaľovaného paliva .....	48
6.2	Porovnanie výsledkov s inými autormi.....	49
<b>7</b>	<b>EXPERIMENTY NA AUTOMATICKÝCH SPAĽOVACÍCH JEDNOTKÁCH .....</b>	<b>50</b>
7.1	Kotol Ekoscroll Alfa .....	50
7.1.1	Vplyv teploty spaľovacej komory na produkciu jemných častíc. ....	52
7.1.2	Vplyv spaľovaného paliva na produkciu jemných častíc.....	54
7.2	Automatický kotol VERNER A251.1 .....	56
7.2.1	Vyhodnotenie vplyvu použitého paliva na tvorbu jemných častíc.....	57
7.3	Kotol GEMOS 110 kW .....	59
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTY NA KRBE S RUČNÝM PRIKLADANÍM .....</b>	<b>62</b>
8.1	Popis spaľovacieho zariadenia .....	62
8.1.1	Meranie teploty v ohnisku a v spalínovode .....	63
8.1.2	Regulačné prvky pre ovládanie spaľovacieho procesu .....	64
8.2	Fázy horenia a spaľovacie cykly.....	65
8.3	Vplyv ťahu a nastavenia komínovej klapky .....	68
8.4	Vplyv teploty v spaľovacej komore .....	71
8.4.1	Vplyv teploty terciárneho vzduchu .....	73
8.4.2	Vplyv teploty sekundárneho vzduchu a prúdenia v krbe .....	75
8.5	Vplyv orientácie paliva .....	76
8.6	Vplyv geometrie paliva .....	79
8.7	Vplyv použitého druhu paliva.....	81
<b>9</b>	<b>ĎALŠIE MERANIA SÚVISIACE S ANALÝZOU JEMNÝCH ČASTÍC .....</b>	<b>83</b>
9.1	Analýza plynov.....	83
9.2	Odber častíc impaktorom DEKATI .....	84
9.3	Častice zachytené mikroskopom a ich prvková analýza.....	85
<b>10</b>	<b>VYHODNOTENIE DOSIAHNUTÝCH VÝSLEDKOV .....</b>	<b>89</b>
10.1	Porovnanie automatických spaľovacích zariadení .....	89
10.2	Porovnanie výsledkov manuálneho spaľovacieho zariadenia.....	90
<b>11</b>	<b>ZÁVER .....</b>	<b>92</b>
	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>93</b>
	<b>ZOZNAM ZDROJOV A POUŽITEJ LITERATÚRY .....</b>	<b>94</b>



# 1 Úvod

Bežnou súčasťou života moderného človeka je okrem iného naplnenie potrieb tepelného komfortu a dostatku elektrickej energie potrebnej ku bežným aktivitám v domácnosti či v priemysle. Pre získanie tepelnej a elektrickej energie dnes bežne využívame spaľovanie biomasy či iných uhlíkových palív. Tu sa dostávame ku otázke vplyvu spaľovania na zdravie človeka a životné prostredie ako také. Je zrejmé, že množstvo respiračných a kožných ochorení má pôvod práve v znečistenom ovzduší. Intenzívnym technologickým pokrokom sa darí sledovať a obmedzovať emisie vznikajúce pri spaľovaní.

Zo začiatku bola v tejto oblasti venovaná pozornosť predovšetkým plynným emisiám. V súčasnej dobe sa do popredia záujmu dostali emisie jemných častíc. Ako jemné častice označujeme drobnú kvapalnú a tuhú frakciu s veľkosťou do 2,5  $\mu\text{m}$ . Pozornosť výskumných pracovísk, v posledných rokoch, priťahujú submikrometrové a ultrajemné častice s veľkosťou do 1  $\mu\text{m}$ , ktoré majú významný vplyv na zdravie človeka. Sú tak malé, že dýchacie cesty človeka ich nezachytia a prenikajú priamo do pľúcnych väčkov dýchacej sústavy, kde dochádza ku oksyličovaniu krvi. Ultrajemné častice môžu byť, vďaka aktívnemu povrchu, omnoho nebezpečnejšie ako rovnaká hmotnosť väčších častíc. Mnohí vedci upozorňujú na nutnosť zmeny súčasného spôsobu hodnotenia množstva emisií. Z hľadiska vplyvu na zdravie rozhoduje aktívny povrch, schopnosť častíc viazať na seba toxické látky a prenikať do dolných dýchacích ciest.

Jemné častice, ktorým sa táto práca venuje, vznikajú hlavne kondenzáciou pár uvoľnených počas zahrievania drevnej hmoty. Keďže súčasný trend je taký, že narastá množstvo spaľovanej biomasy, je potrebné počítať s tým, že narastá aj množstvo častíc uvoľnených do atmosféry. Vzhľadom ku zložitosti procesu tvorby a rastu jemných častíc, nie je presne známy vplyv jednotlivých parametrov ovplyvňujúcich horenie biomasy. Preto je dôležité v uvedenej oblasti realizovať potrebný experimentálny výskum, ktorému je venovaná aj predkladaná práca.

Cieľom práce je experimentálne sledovať a hodnotiť vplyv parametrov spaľovania na tvorbu jemných častíc. Našou hypotézou je, že vhodnou kombináciou prevádzkových parametrov je ovplyvniteľná produkcia jemných častíc pri komplexnom zhodnotení spaľovacieho procesu. Výsledky majú pomôcť výrobcovi spaľovacích zariadení vhodným konštrukčným zásahom, alebo regulačnými prvkami optimalizovať prevádzkové parametre spaľovacieho procesu tak, aby bola produkcia jemných častíc čo najnižšia. Spotrebitelia spaľovacích zariadení s manuálnou obsluhou môžu v práci nájsť motiváciu pre čistejší spôsob spaľovania biomasy.

## 2 Ciele práce

Cieľom dizertačnej práce je skúmať čiastkové prevádzkové parametre spaľovacieho procesu a ich vplyv na produkciu jemných častíc. Z výsledkov teoretického a experimentálneho vedeckého prístupu sú určené preferované parametre pre minimálnu produkciu týchto jemných častíc.

Konkrétne ciele dizertačnej práce sú nasledujúce:

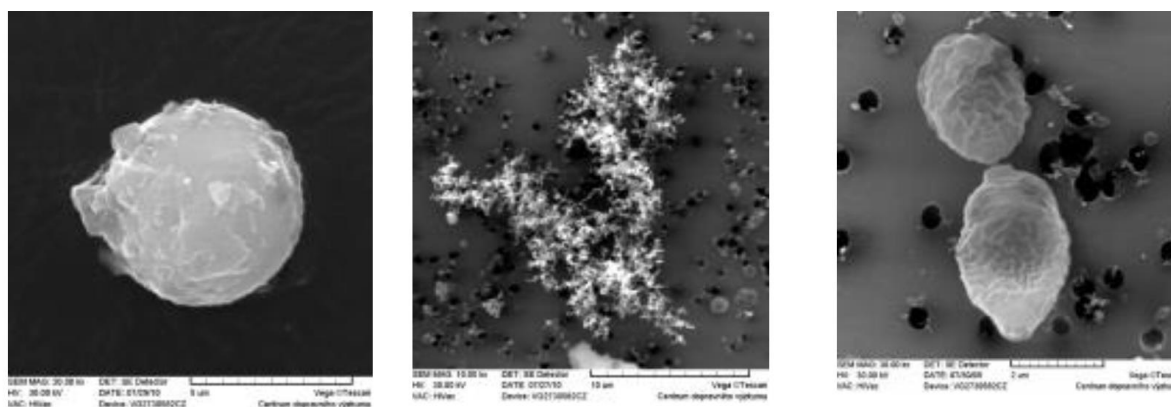
- Vypracovanie rešerše o vlastnostiach a tvorbe jemných častíc. Získanie poznatkov o parametroch spaľovacieho procesu, ovplyvňujúcich produkciu jemných častíc v spalínách biomasových kotlov.
- Experimentálne spaľovacie skúšky v laboratórnych a reálnych podmienkach pri rôznych prevádzkových parametroch.
- Stanovenie vplyvu čiastkových parametrov na tvorbu jemných častíc (vlastnosti paliva, množstvo kyslíka, teplota spaľovacieho procesu a geometria paliva).
- Zhrnutie pozorovaných trendov v produkcii jemných častíc spaľovacím zariadením využívajúcim biomasu ako palivo. Formulácia závislosti jednotlivých parametrov na produkcii častíc.

### 3 Zhrnutie súčasného stavu poznania odbornej problematiky

#### 3.1 Jemné častice

Keď hovoríme o jemných časticiach, myslíme tým istú zložku aerosólu nachádzajúceho sa v atmosfére, prípadne v časti spaľovacej jednotky (napríklad v spalinovode), ktorá vznikla napríklad spaľovaním biomasy a je možné ju detegovať dostupnými technológiami. Pojem aerosól sa v obore jemných častíc používa na označenie zmesi častíc, o veľkosti 1 nm – 2,5  $\mu\text{m}$  a nachádzajúcich sa v tuhom, kvapalnom, alebo zmiešanom stave, rozptýlených v plyne (v atmosfére). Jednotlivé častice sa odlišujú najmä veľkosťou, tvarom, chemickým zložením a merným povrchom (pórozitou).

Častice rozptýlené v atmosfére spôsobujú ochladzovanie Zeme takým spôsobom, že absorbujú a rozptyľujú slnečné žiarenie. Tomuto efektu hovoríme Albedo efekt. Jemné častice zároveň pôsobia ako kondenzačné jadrá pre tvorbu oblačnosti. Vodná para nachádzajúca sa v atmosfére kondenzuje na jemných časticiach. Tento efekt sa nazýva CCN (Cloud Condensation Nucleus). Veľkosť a chemické zloženie počiatkových kondenzačných jadier (napr. antropogénne sírany, dusičnany, prach, organický uhlík a čierny uhlík) majú veľký význam pri aktivácii a rýchlosti rastu kvapôčok oblaku [1], [2].



a) popolček v Ostrave

b) agregáty z dopravy

c) častica biologického pôvodu

Obr. 1 Snímky jemných častíc zachytené pod mikroskopom [3]

#### 3.1.1 Princíp vzniku spaľovacích častíc

Spaľovanie biomasy je spojené s tvorbou jemných častíc nachádzajúcich sa v spalinách. Ich tvorba závisí od vlastností paliva (vlhkosť, zrnitosť, materiál, ...), typu spaľovacieho zariadenia, ale hlavne od podmienok spaľovania. Kľúčovými faktormi pri spaľovaní sú čas zotrvania v spaľovacej komore, teplota procesu spaľovania, turbulencie a množstvo kyslíka.

Pri spaľovaní paliva dochádza ku vyparovaniu prchavého podielu horľaviny. Ide o organické zlúčeniny s rôznymi hodnotami parciálnych tlakov. Po dosiahnutí bodu sýtosti začína tvorba novej fázy. Nazývame to proces nukleácie. Molekuly sa zhlukujú do ultrajemných častíc o veľkosti do 0,1  $\mu\text{m}$ . Vzniknuté častice môžu ďalej narastať mechanizmom koagulácie (zhlukovanie koloidných a makromolekulárnych organických častíc do väčších celkov), aglomeráciou (vzájomným spájaním na základe lepivosti povrchov), oxidáciou alebo reakciami kondenzácie na povrchu častíc.

Častice vznikajú v rôznych veľkostiach v konkrétnych režimoch (módach), ktoré závisia od typu zdroja a zloženia častíc aerosólu. Tieto módy sa vzájomne prekrývajú vo veľkostnom spektre. Veľkosti častíc sa neustále kontinuálne menia v dôsledku kondenzácie, koagulácie, akumulácie, fragmentácie

a odparovania. Ako je znázornené aj na obrázku 2, atmosférický aerosól vzniká v štyroch základných módoch.

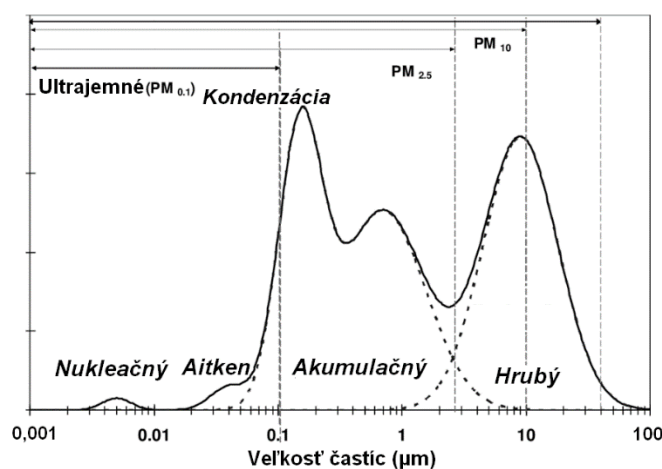
**Nukleačný mód** – konverzia plynov na častice. V momente ochladzovania nasýtených plynov organických látok vznikajú kondenzáciou nové častice o veľkosti do 20 nm. Tieto častice sa skladajú hlavne z iónov a organických látok (uhľovodíky). Ich životnosť je niekoľko minút až hodina. Častice následne rastú kondenzáciou plynov a vodnej pary.

**Aitken mód** – ultrajemné častice o veľkosti 20 – 100 nm zložené z elementárneho uhlíka, organických zlúčenín, kovov a iónov. Tieto častice vznikajú priamou emisiou zo spaľovacích procesov pri nedokonalom spaľovaní a následnou kondenzáciou ochladených plynov, prípadne koaguláciou častíc nukleačného módu.

**Akumulačný mód** – častice o veľkosti 100 nm až 2,5  $\mu\text{m}$ . Dochádza ku koagulácii menších častíc, kondenzácii prchavých zlúčenín a reakciám plynov. V tejto forme dokážu častice existovať až niekoľko týždňov. Častice sú zložené zo síranov, dusičnanov, kovov, organických zlúčenín a elementárneho uhlíka. V tejto fáze sa už výrazne zväčšuje účinnosť termodynamických a mechanických procesov (odparovanie, sublimácia, sedimentácia, impakcia a podobne). Niektoré procesy, ako fragmentácia alebo odparovanie pôsobia proti rastu veľkosti častíc.

Nukleačný, aitken a akumulčný mód tvoria spolu **jemný aerosól**.

**Hrubý aerosól** – častice o veľkosti nad 2,5  $\mu\text{m}$  so životnosťou až do niekoľkých dní. Vznikajú mechanickým rozpadom, eróziou materiálu zemského povrchu, emisiami z dopravy (trením pneumatík, bŕzd, ...), prípadne z morskej vody. Ich zloženie teda závisí od pôvodu [4].



Obr. 2 Schéma veľkostnej distribúcie častíc v jednotlivých módoch. Prevzaté a upravené z [5], [6]

Rovnako ako sme opísali mechanizmus vzniku častíc, je potrebné dodať, že častice aj zanikajú. Jemné častice v atmosfére podporujú vznik oblačnosti a následne padnú na zemský povrch v podobe zrážok. Zrážky sú najvýznamnejším procesom odstraňovania častíc z atmosféry. Okrem toho môže dochádzať ku koagulácii, zhlukovaniu častíc a pri dostatočnej veľkosti k ich samovoľnému zachyteniu na zemský povrch gravitáciou. Ku zachyteniu častíc prispieva významným vplyvom vegetácia.

### 3.1.2 Rozdelenie častíc vzniknutých spaľovaním

Spaľovaním biomasy sa vytvára množstvo organických zlúčenín s odlišnými hodnotami parciálnych tlakov pár. Prachové častice sa odlišujú svojim zložením a spôsobom, akým vznikajú. Odlišujú sa veľkosťou, tvarom, hustotou, koncentráciou v okolitej atmosfére a chemickým zložením.

Částice, ktoré vznikli za vysokých teplôt v spaľovacej komore, nazývame primárne častice. Tie, ktoré sa sformovali v dymovej vlečke a v atmosfére nazývame sekundárne častice [7], [8].

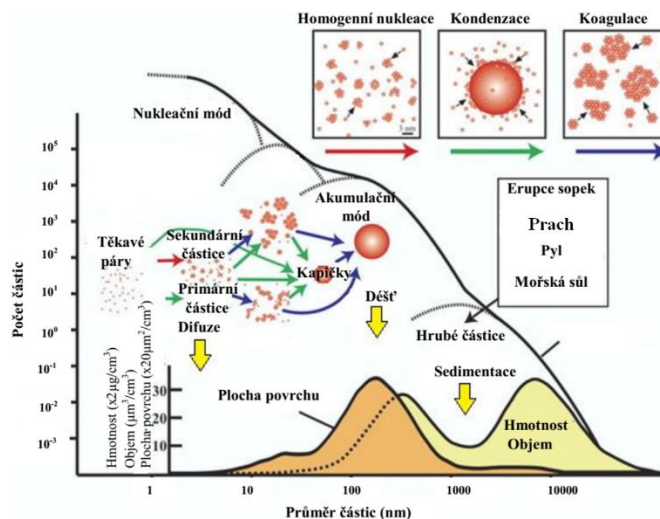
Primárne častice delíme podľa mechanizmu ich vzniku na sadze, organické častice a popolček. Podľa prchavosti sa vzniknuté organické zlúčeniny rozdeľujú na prchavé organické zlúčeniny (*volatile organic compounds*, VOC) a polo-prchavé organické zlúčeniny (*semi-volatile organic compounds*, SVOC).

Na základe veľkosti častice delíme podľa nasledujúcej tabuľky.

Tab. 1 Rozdelenie častíc podľa veľkosti [3]

Názov:	Priemer častíc (nm)	Označenie
Hrubé častice	<10 000	Coarse particles, PM <sub>10</sub>
Jemné častice	<2 500	Fine particles, PM <sub>2,5</sub>
Submikrometrové častice	<1 000	Fine particles, PM <sub>1</sub>
Ultrajemné častice	<100	UFP (Ultrafine particles)
Nanočastice	<50	NP (Nanoparticles)

Súčasná legislatíva sa zameriava na častice PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> (častice o veľkosti do 10 μm, resp. 2,5 μm). Čoraz viac sa však venuje pozornosť menším frakciám. Väčšina častíc vyprodukovaná spaľovacím procesom je kategórie PM<sub>1</sub> (častice s priemerom menším než 1 μm). Tieto frakcie majú nezanedbateľný vplyv na zdravie obyvateľstva. Sú ľahko vdychovateľné (inhalabilné) a môžu sa dostať hlboko do dýchacej sústavy človeka. Navyše, v porovnaní s väčšími časticami majú pri rovnakej hmotnosti omnoho väčší aktívny povrch, preto majú vysokú schopnosť viazať na seba iné škodlivé látky [9].



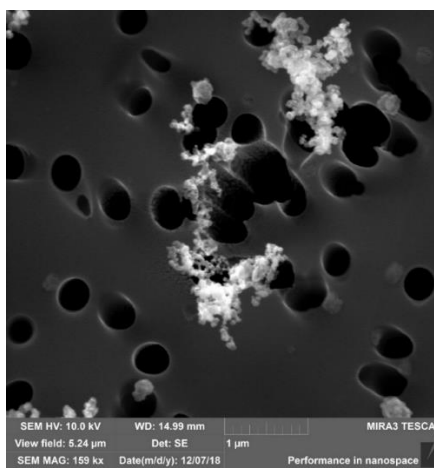
Obr. 3 Pôvod častíc a ich rozdelenie [10]

### 3.1.3 Zloženie a charakteristika jemných častíc

Uhlíkové častice rozdeľujeme na dva základné typy:

**Elementárny uhlík** (*Elemental carbon – EC*), nazývaný aj čierny uhlík (*Black carbon – BC*), je nízko reaktívny uhlíkový materiál, ktorý vznikol nedokonalým spaľovaním organických látok, fosílnych palív alebo biomasy. Tiež vzniká emisiami z áut. Bežne ho označujeme aj ako sadze. Jeho schopnosť oxidovať

začína až pri značne vyšších teplotách, než je bežná teplota spaľovacieho procesu [11]. Nedokonalým spaľovaním palív vzniká oxid uhoľnatý a uhlík vo forme sadzí. Práve sadze, spolu s prirodzene suspendovanými časticami, sú väčšinou nosnou časťou PM častíc, ktoré sú schopné na seba naviazať ostatné látky a chemické zlúčeniny. Názov čierny uhlík vychádza z jeho vlastnosti, ktorou je schopnosť pohlcovať svetlo. Pokiaľ je prítomný v atmosférických aerosóloch, môže prispievať ku zníženiu viditeľnosti až o 20% v porovnaní s inými druhmi aerosólu. Podľa mnohých výskumov, vďaka schopnosti pohlcovať svetlo ohrieva Zem a považuje sa za najdôležitejšiu časticovú súčasť globálneho otepľovania [12].



Obr. 4 Zhluky častíc tvorené malými sférickými guľičkami. Zachytené elektrónovým mikroskopom SEM

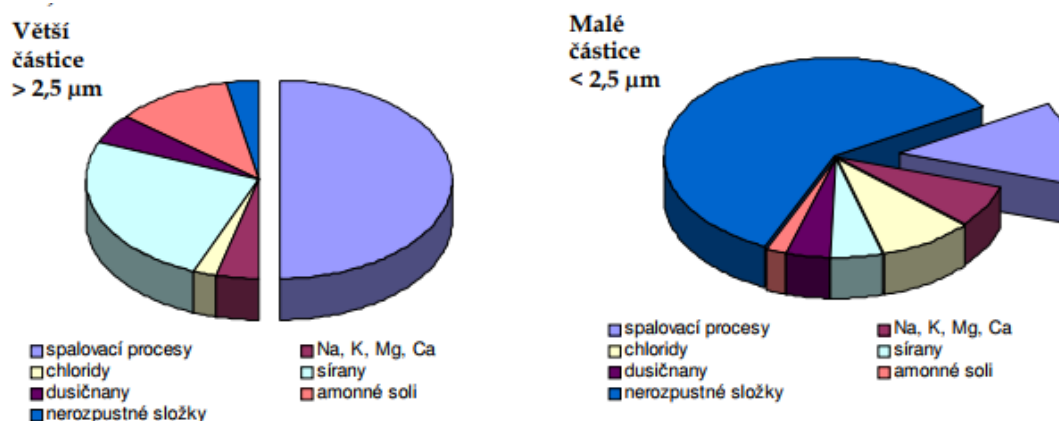
Štruktúra BC častíc je trojrozmerná a je tvorená z jednotlivých aromatických vrstiev. Veľkosť častíc závisí na spaľovanom materiáli a podmienkach horenia. Rozhodujúca pre veľkosť je teplota horenia a fáza degradačného procesu. BC vzniká ako malé sférické guľičky o veľkosti 1 až 5 nm. Tie majú silnú tendenciu sa zhľukovať a vytvárať väčšie častice s veľkosťou 0,1 až 1  $\mu\text{m}$ . Častice BC majú veľkú mikroporozitu a takisto veľký, ale premenlivý špecifický povrch, v rozmedzí od 1 do 85  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  (sadze) až do cca 500  $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . Chemické zloženie BC zahŕňa okrem uhlíka aj prvky vodík, kyslík, dusík a síru. Z toho priemerná koncentrácia uhlíka je 60 %. Je nerozpustný vo vode a v bežných organických rozpúšťadlách. Účinky BC na zdravie človeka môžu byť negatívne, pretože má schopnosť viazať niektoré toxické organické zlúčeniny a zachytáva aj kovy [13], [14].

**Organický uhlík** (*Organic carbon - OC*) je uhlík, ktorý sa nachádza voľne v prírode, ale vzniká aj priamo pri spaľovaní uhlíkových plynných látok. Na rozdiel od BC obsahuje iba čiastočne frakciu, ktorá absorbuje svetlo [15]. Je preto schopný viac rozptyľovať svetelné žiarenie [16]. Pomer množstva BC a OC určuje otepľovací, resp. ochladzovací efekt aerosólov v atmosfére vznikajúcich spaľovaním biomasy. V porovnaní s elementárnym uhlíkom môže byť OC priamo uvoľnený zo zdrojov, ako je primárny organický uhlík a sekundárny organický uhlík, ktoré sa tvoria z produktov atmosférických chemických reakcií prostredníctvom nízkeho tlaku pár, vhodnej teploty a slnečného žiarenia v atmosfére [17], [18], [19], [20].

Existujú určité obavy vedeckej komunity, ako aj lekárov, z možných mutagénnych a karcinogénnych účinkov OC v aerosólových časticiach. Tiež sa uvádza, že vďaka schopnosti rozptyľovať svetlo má negatívny vplyv na klímu podnebia. Detailný vplyv uhlíkového aerosólu na klimatické procesy a ľudské zdravie je však neistý kvôli nášmu neúplnému chápaniu jeho koncentrácií, chemického zloženia a mechanizmov tvorby [21], [22].

**Výskyt EC a OC** v atmosférickom aerosóle je individuálny a závisí na druhu zdroja znečistenia. Z praxe je dokázané, že vzorky spalín odobraté pri vysokých teplotách obsahujú menej OC častíc, ako vzorky odobrané pri teplote okolia. Je to tým, že OC materiál je čiastočne prchavý a nachádza sa viac v plynnej forme, ešte predtým, než pri ochladzovaní skondenzuje. OC je zložený z polycyklických aromatických uhľovodíkov (PAH), ktoré tvoria základ pre formáciu pevných sadzí [23]. Pri nedokonalom spaľovaní fosílnych palív, ako napríklad nafta, dochádza ku tvorbe BC v omnoho väčšej miere ako OC. Nedokonalým spaľovaním biomasy sa zasa tvorí viac OC ako BC. OC, rovnako ako aj BC má relatívne krátku životnosť vo vzduchu (dni až týždne) v porovnaní s inými atmosférickými plynmi vyvolávajúcimi skleníkový efekt (desaťročia až storočia) [24].

Podľa Weifang Li a spol., ktorí sledovali uhlíkové látky v aerosóloch na pobreží v meste Tchien - ťin v Číne, pomer OC ku EC sa v rámci denného priemeru pohybuje bežne v rozmedzí od 2,1 do 9,1. Vyššie pomery OC / EC sa našli v zimnom období. Tiež vo svojich výskumoch zmieňujú, že Čína je hlavným svetovým producentom uhlíkového aerosólu, z dôvodu intenzívneho využívania uhlia a biopalív v priemysle [22]. Obrázok 5 ukazuje bežné zloženie jemných a hrubých častíc prítomných v ovzduší.



Obr. 5 Chemické zloženie jemných a hrubých častíc prítomných v ovzduší, ktoré zverejnil Český hydrometeorologický ústav [25]

Okrem uhlíkovej zložky sa v časticiach nachádzajú aj iné látky. Špeciálne v časticiach z biomasy to často bývajú látky na báze dusíka, síry, alebo kovov. Capasso a spol. z University of Milano v Taliansku publikovali príspevok, v ktorom analyzovali vzniknuté častice spaľovacích procesov a ich vplyv na zdravie človeka. Pri spaľovaní biomasy sa ukázalo, že jemné častice obsahujú aj isté množstvo zinku a mangánu. Pri časticiach z dieselových motorov to boli zasa jemné častice s obsahom chrómu, niklu a platiny [26].

### 3.2 Vplyv častíc na zdravie človeka

Vysoké koncentrácie aerosólov v atmosfére môžu mať nezanedbateľný dopad na ľudské zdravie. Svetová zdravotnícka organizácia v roku 2012 poukázala na to, že organický uhlík a elementárny uhlík nachádzajúci sa v časticiach, má nepriaznivé účinky na zdravie [27]. Napríklad, v roku 2000 zomrelo v Európe na následky znečisteného ovzdušia približne 370 tisíc obyvateľov, čo je približne 10-krát viac, ako počet úmrtí následkom dopravných nehôd. V Českej republike spôsobilo znečistenie ovzdušia časticami PM<sub>2,5</sub> v tom istom roku zníženie priemernej očakávanej dĺžky ľudského života o takmer 12 mesiacov [3].

Negativný účinok jemných částic na zdravie človeka závisí predovšetkým od:

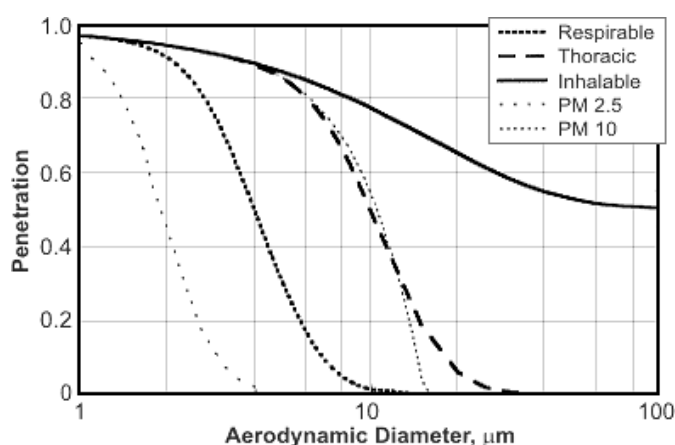
- ich počtu,
- tvaru (špecifický povrch, guľovitý/vláknitý tvar, porozita, ...),
- respirability (vdychovateľnosť),
- chemického zloženia,
- rozpustnosti vo vode,
- elektrického náboja,
- schopnosti viazania iných látok (napr. PAH, As, Cd, Zn, Cu atď.) [28].

Napríklad organický uhlík a elementárny uhlík rôzne vplyvajú na zdravie človeka. Veľkosť, tvar, chemické a fyzikálne vlastnosti a povrchové vlastnosti častíc sú osobitne dôležité pre ich interakciu s biologickými membránami. Ďalšie štúdie naznačujú, že povrch vláknitých častíc je dôležitejší pri reakciách v bunkách a pre účinky na zdravie ako samotné jadro častíc [29].

Zo strany človeka, alebo všeobecne živého organizmu, ovplyvňuje depozíciu častíc anatómia dýchacích ciest a spôsob dýchania (dýchanie ústami alebo nosom, hĺbka, frekvencia a rýchlosť nádychu). Jemné častice spôsobujú v dýchacích cestách človeka ich dráždenie, znižujú ich samočistiacu funkciu a obranyschopnosť, vytvárajú podmienky pre respiračné infekcie a v neposlednom rade pôsobia karcinogénne. Zvyšujú riziko úmrtia na kardiovaskulárne ochorenia a počet hospitalizovaných na respiračné ochorenia [30].

Podľa Svetovej zdravotníckej organizácie, pri zvýšení dennej koncentrácie častíc  $PM_{10}$  o  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  sa zvýši celková úmrtnosť o 0,7 %, hospitalizácia na akútne respiračné ochorenia o 0,8 %, kašeľ u ľudí sa zvýši o 3,6 % a akútne symptómy dolných dýchacích ciest o 3,2 %. Pri zvýšení ročnej koncentrácie o  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  sa úmrtnosť na respiračné ochorenia zvýši až o 10 % [31].

Účinky častíc  $PM_{2,5}$  na respiračné ochorenia u pacientov s astmou sa líšia podľa zdroja alebo chemických vlastností častíc. Penttinen a ďalší zo Švédska v rámci ich výskumného programu *EU ENVIRONMENT and CLIMATE Research Programme* skúmali vplyv jemných častíc  $PM_{2,5}$  vznikajúcich zo spaľovania na 57 dospelých astmatikov počas 181 dní. Ich výsledky ukázali, že jemné častice majú jednoznačne negatívny vplyv na zdravie dospelých astmatikov [32].



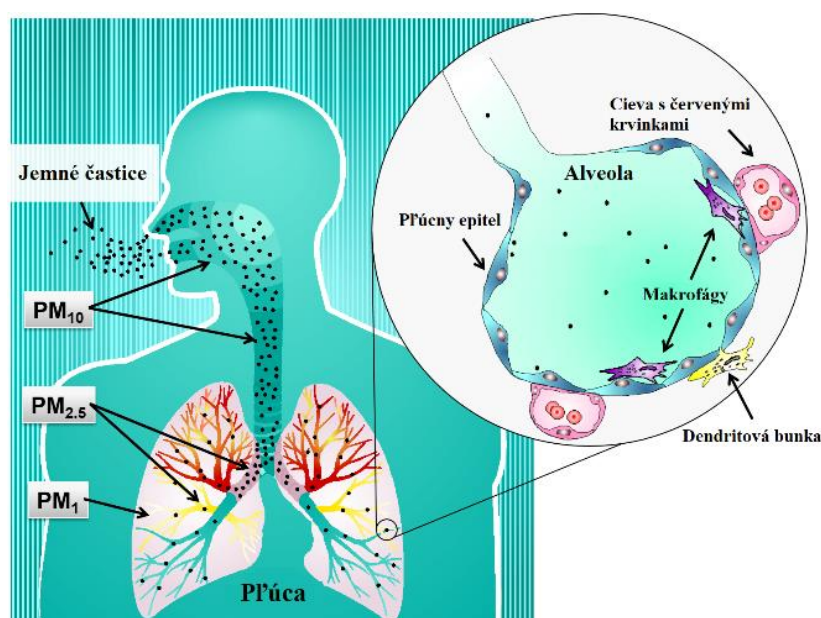
Penetration – preniknutie do pľúc; Aerodynamic Diameter – aerodynamický priemer častice; Respirable – respirabilná frakcia; Thoracic – thorakálna frakcia; Inhalable – vdychovateľná frakcia

Obr. 6 Rozdelenie častíc podľa depozície v pľúcach [33]



Ako vidieť na obrázku 6, častice väčších rozmerov sú efektívnejšie zachytávané v horných dýchacích cestách. Ako vdychovateľná frakcia je označovaná hmotnostná frakcia aerosólových častíc, ktorú človek vdýchne nosom a ústami. Thorakálna frakcia sú častice, ktoré prenikajú cez hrtan do dolných dýchacích ciest. Spravidla sa jedná o častice do veľkosti 10  $\mu\text{m}$ . Respirabilná frakcia je hmotnostná frakcia častíc, ktorá preniká hlboko do dýchacích ciest, kde sa už nenachádza riasinkový epitel (obrázok 7).

Svetová zdravotnícka organizácia v roku 2012 na základe epidemiologickej štúdie a viacerých toxikologických štúdií krátkodobých a dlhodobých účinkov jemných častíc  $\text{PM}_{2,5}$  na zdravie naznačuje, že BC nie je priamo hlavnou toxickou zložkou jemných častíc, ale môže pôsobiť ako univerzálny nosič širokej škály chemických látok s rôznou toxicitou. Tieto látky ovplyvňujú pľúca, bunky pokožky a krvný obeh ľudského organizmu. Podľa tejto organizácie, zníženie produkcie častíc  $\text{PM}_{2,5}$  obsahujúcich BC a ďalšie látky súvisiace so spaľovaním, by malo viesť ku značnému zníženiu zdravotných účinkov spojených s týmito látkami [27].



Obr. 7 Schopnosť prenikania jemných častíc do tela človeka. Prevzaté a upravené z [34], [35].

Vplyv ultrajemných častíc uvoľnených spaľovaním biomasy na bunkový systém človeka skúmali Galli a spol z Università degli Studi di Milano v Taliansku. V experimentálnej peci spaľovali pelety z mäkkého jedľového a z tvrdého bukového dreva. Ich spaľovacie experimenty sa uskutočňovali na komerčne dostupnom horákovom kotli na pelety s výkonom 11 kW. Hmotnostná koncentrácia ultrajemných častíc bola stanovená gravimetrickým prístupom a bola v priemere asi  $30 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  pri teplote  $0^\circ\text{C}$ , tlaku 1 atm, suchých spalinách so zvýšeným kyslíkom 13 %. Bunky boli zasahované časticami 24 hodín so zvyšujúcimi sa koncentraciami (0 až  $100 \text{ mg}\cdot\text{ml}^{-1}$ ). Životaschopnosť buniek bola hodnotená únikom enzýmu laktátdehydrogenázy (LDH). Výsledky naznačujú, že spaľovanie dreva môže generovať biologicky aktívne ultrajemné častice, ktoré značne ovplyvňujú životaschopnosť ľudských buniek. Častice získané z jedle boli aktívnejšie ako častice z bukového dreva [36].

Marchetti a ďalší publikovali štúdiu, ktorá preskúmala možné toxikologické vlastnosti častíc uvoľňovaných spaľovaním rôznych zdrojov biomasy. Zachytávali častice  $\text{PM}_{10}$ , v ktorých určovali obsah polycyklických aromatických uhľovodíkov a naviazaných kovov. Ľudské alveolárne bunky A549 vystavili na 24 hodín pôsobeniu častíc v množstve až  $5 \text{ g}$  na  $\text{cm}^2$ . Na bunkách sledovali a hodnotili ich

životaschopnosť, reakciu na zápal buniek, antioxidačnú aktivitu, aktiváciu xenobiotického metabolizmu, a poškodzovanie DNA. Výsledky ukázali rôzne biologické reakcie v bunkách pri pôsobení rôznych častíc. To naznačuje možnú koreláciu medzi chemickými vlastnosťami častíc a ich toxikologickými vlastnosťami. Jemné častice z peliet biomasy vyvolávali v bunkách nekrózu (nekontrolovaná, neregulovaná smrť buniek), zatiaľ čo častice z dreva a dreveného uhlia vyvolali v bunkách hlavne apoptózu (organizovaná, programovaná, prísno regulovaná smrť buniek). Častice z peliet zároveň vyvolávali zápal v bunkách. Častice zo všetkých skúmaných horiacich materiálov spôsobili značné zvýšenie hladiny enzýmu označovaného HO-1, čo potvrdilo reakcie súvisiace s oxidačným stresom, čo je nestabilita medzi antioxidačnou schopnosťou bunky a množstvom voľných radikálov. Zároveň tieto častice mali vplyv na aktiváciu enzýmov cytochrómu P450, ktoré v bunkách riadia oxidačno-redukčné reakcie. Taktiež sa ukázalo, že častice z biomasy podporovali prerušenie reťazca DNA. Tieto údaje ukazujú, že častice zo spaľovania biomasy môžu byť toxické, a ich vplyv na ľudský organizmus závisí aj od typu spaľovanej biomasy [37].

### 3.3 Legislatíva, emisné a imisné limity jemných častíc

Imisné hodnoty častíc v ovzduší sú v Českej republike stanovené na základe Zákona o ochrane ovzdušia 201/2012 Sb. a vyhlášky o spôsobe posudzovania a vyhodnocovania úrovne znečistenia 330/2012 Sb. Imisná hodnota sa uvádza v mikrogramoch na meter kubický vonkajšieho vzduchu pri atmosférickom tlaku a teplote 0 °C. Ďalším parametrom je doba priemerovania, ktorá odlišuje krátkodobé koncentrácie od dlhodobých. Maximálne denne prípustné imisné limity pre častice PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> sú uvedené v tabuľke 2 [38].

Tab. 2 Imisné limity PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> pre ochranu zdravia a maximálny počet ich prekročenia [39]

Znečisťujúca látka	Doba priemerovania	Limit pre posudzovanie [μg.m <sup>-3</sup> ]		Imisný limit [μg.m <sup>-3</sup> ]
		Dolný	Horný	
PM <sub>10</sub>	24 hodín	25 max. 35x za rok	35 max. 35x za rok	50 max. 35x za rok
	kalendárny rok	20	28	40
PM <sub>2,5</sub>	kalendárny rok	12	17	20

Vyhláška Ministerstva životného prostredia Českej republiky č. 415/2012 Sb. s účinnosťou od 1.12.2012 stanovuje maximálne prípustné množstvo znečisťujúcich látok vypustených do ovzdušia. Táto vyhláška zároveň uvádza, za akých podmienok a akým postupom sa majú emisné hodnoty merať pre daný typ paliva, výkon zariadenia a podobne. Spaľovanie biomasy ako pevného paliva produkuje v porovnaní so spaľovaním plyných či kvapalných látok pomerne veľké množstvo jemných prachových častíc. Metódy stanovenia sú popísané v normách ČSN EN 303-5, časti 5: „Kotle pro ústřední vytápění na pevná paliva, s ruční a samočinnou dodávkou, o jmenovitém tepelném výkonu nejvýše 500 kW - Terminologie, požadavky, zkoušení a značení.“

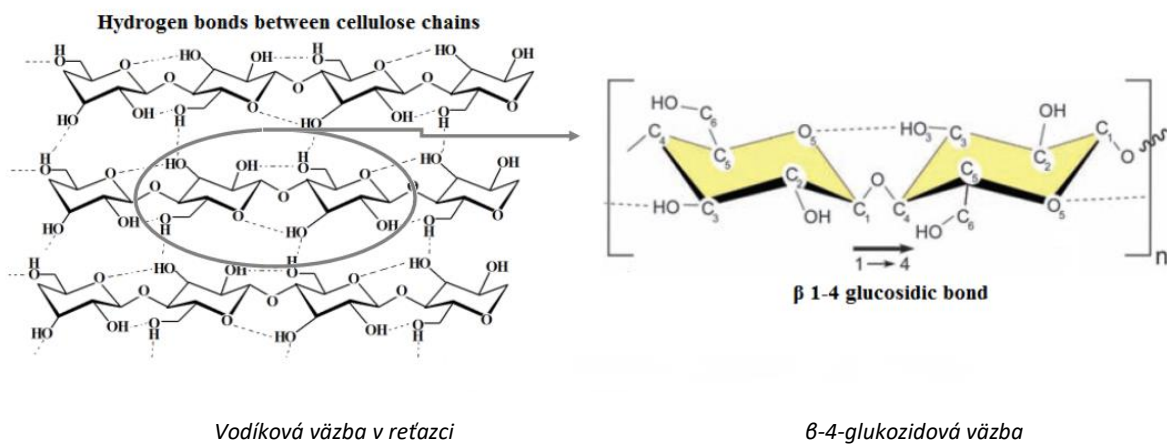
Česká republika je jedným z členov Európskej agentúry pre životné prostredie (ang. *European environmental agency, EEA*). Jej úlohou je poskytovať širokej verejnosti nezávislé informácie o životnom prostredí v Európe. Česká republika, ako členský štát tejto agentúry, preberá emisné limity a ďalšie údaje pre tvorbu svojej politiky a riadenie životného prostredia práve z tejto organizácie [40].

Žiaľ, pre častice  $PM_{10}$ , ktoré majú nezanedbateľné účinky na ľudský organizmus, na úrovni Európskej únie neexistujú limitné hodnoty určené legislatívou. Je to najmä z dôvodu náročnosti detekcie častíc a obmedzeného počtu staníc, ktoré by dokázali koncentráciu častíc merať. Imisný limit pre častice  $PM_{2,5}$  je od roku 2020 stanovený na  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  [41].

### 3.4 Zloženie biomasy

Biomasa je považovaná za obnoviteľný zdroj energie. Jej zloženie ovplyvňuje proces horenia ako aj tvorbu jemných častíc. Pozostáva zo zložitých uhľovodíkových reťazcov. V porovnaní s fosílnymi palivami obsahuje vyšší podiel vody. Tiež obsahuje väčšie množstvo kyslíka a menej uhlíka v porovnaní s uhlím. Obsahuje iba stopové množstvo síry. Základné polyméry v biomase sú celulóza, hemicelulóza a lignín. Každý z týchto polymérov má špecifický vplyv na celkové správanie biomasy v spaľovacom procese.

**Celulóza** je prírodný polymér pozostávajúci z kruhovitých molekúl glukózy. V prírode je celulóza najčastejšie sa vyskytujúcim polymérom, so sumárnym vzorcom  $[\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5]_n$ . Základnou jednotkou je opakujúci sa monosacharid D-glukóza (konkrétne  $\beta$ -D-glukopyranóza). Tieto glukózové jednotky sú medzi sebou vzájomne spojené  $\beta(1\rightarrow4)$  glykozidickou (kovalentnou) väzbou, vodíkovým mostíkom, a Van der Waalsovými silami a tak tvoria dlhé lineárne reťazce (viď obrázok 8). Reťazce sa usporadujú do stále väčších celkov (elementárne fibrily, mikrofibrily, fibrily), ktoré následne tvoria bunkové steny [42], [43].



Obr. 8 Molekulová štruktúra základnej stavebnej jednotky celulózy [44]

Medzery medzi fibrilami celulózy sú vyplnené hemicelulózou a lignínom. Na rozdiel od celulózy má **hemicelulóza** omnoho nižší polymeračný stupeň (60 – 200) a jej reťazce sú rozvetvené. Tvoria ju monosacharidy ako je D-xylóza, D-manóza, D-glukóza, D-galaktóza, L-arabínóza a kyselina D-glukurónová. Ich kombináciou potom vznikajú makromolekuly, pomenované podľa monosacharidov. Pri listnatých drevinách je to glukuronoxylan a glukomanan. S fibrilami celulózy sú spojené vodíkovým mostíkom. Tepelný rozklad hemicelulózy počas pyrolýzy prebieha pri teplote 220 až 315 °C. Celulóza sa uvoľňuje z biomasy pri teplotách 315 – 400 °C [45].

**Lignín** je amorfný polymér zložený prevažne z náhodne spojených fenyľpropanových jednotiek, ako je koniferylalkohol, p-kumarylalkohol a sinapylalkohol. Tvorí trojrozmerné štruktúry a nie je pravidelný, ako je to v prípade celulózy. Pretože lignín prerastá sacharidovými zložkami dreva a reaguje

na akékoľvek fyzikálne i chemické pôsobenie, nie je možné ho z dreva stopercentne izolovať. Izolovaný lignín je vždy znečistený zvyškami sacharidov alebo má izoláciou pozmenenú štruktúru. V porovnaní s celulózou má lignín vyššiu výhrevnosť, pretože jeho zloženie je bohatšie na uhlík. Jeho zahrievaním sa uvoľňujú z paliva aromatické uhľovodíky [46], [43]. Tepelná dekompozícia lignínu prebieha v širšom rozmedzí teplôt (160 až 900 °C). Vyším obsahom lignínu v palive sa zvyšuje množstvo vytvorených sadzí v spalínach, rovnako ako jemných častíc [45].

### **3.5 Vplyv parametrov spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc**

#### **3.5.1 Vplyv povrchu a tvaru vzorky dreva pri horení**

Momeni a spol. skúmali zapálenie, odplyňovanie a vyhorenie jednotlivých elementov biomasy rôznych tvarov a veľkostí za podmienok, podobných priemyselnému spaľovaniu. Na zaznamenávanie celého procesu spaľovania používali špeciálnu CCD kameru. Pri frakciách biomasy s podobným objemom (hmotnosťou) sa zistilo, že cylindrické frakcie strácajú hmotu rýchlejšie ako sférické, a doba vyhorenia sa skracaie zvýšením pomeru strán častíc (povrchovej plochy).

Časy konverzie cylindrických frakcií s takmer rovnakým pomerom povrchu a objemu sú veľmi blízke. Doby zapálenia, odplyňovania a vyhorenia týchto frakcií sú tiež ovplyvnené teplotou oxidačného činidla a koncentráciou kyslíka. Zistilo sa, že koncentrácia kyslíka má výraznejší vplyv na dobu konverzie pri nižších teplotách oxidačného činidla [47].

#### **3.5.2 Práškové palivo**

Experimentálnu štúdiu o správaní pri spaľovaní rôznych typov častíc biomasy (pražené drevo, odpad z kávy a splaškový kal) previedli Mock a spol. z Cranfield University v Anglicku. Hlavnými parametrami boli teploty plynu 1090 K a 1340 K a koncentrácie kyslíka v rozmedzí od 10 % do 40 %. Spaľovanie biomasy pozorovali priamo pomocou vysokorýchlostnej kamery pri 7000 snímkach za sekundu. Vybrané boli vzorky biomasy v rozmedzí veľkostí zrn 150 až 500  $\mu\text{m}$ .

Zistili, že častice práškoveho tuhého paliva biomasy v prúde horúceho plynu majú odlišné správanie v niekoľkých štádiách: a to pri zahrievaní, uvoľňovaní prchavých látok aj samotného spaľovania tuhého uhlíka. Vlastnosti týchto štádií sa môžu značne líšiť v závislosti od miery odplynenia, tepelnej histórie častíc a ich chemických a fyzikálnych vlastností. Častice biomasy sa správajú inak ako častice uhlika za rovnakých podmienok spaľovania, pretože obsahujú viac prchavých látok (menej pevného uhlíka) a majú vzhľadom na ich vláknitú štruktúru pomerne nižšiu hustotu častíc [48].

#### **3.5.3 Vplyv chemického zloženia biomasy**

Riaza a spol. skúmali kinetiku spaľovania práškovej biomasy z rôznych materiálov. Cukrová trstina, borovicové piliny, pražené borovicové piliny a zvyšky olív spaľovali v trúbkovom spaľovacom zariadení pri 1400 K a pri koncentráciách kyslíka 21, 30, 35 a 50 %.

Pozorovali, že spaľovanie týchto častíc biomasy sa odohrávalo v dvoch fázach. Spočiatku sa uvoľňovali prchavé látky, ktoré horeli v sférických obalových plameňoch s nízkou svietivosťou. Po vyhorení týchto plameňov sa zapália zvyšky uhlíka a zhoria v krátkom čase. Takéto správanie bolo

spoločné pre všetky skúmané materiály biomasy len s malými rozdielmi. Najväčší vplyv na vlastnosti plameňa mala predchádzajúca tepelná úprava borovicových pilín. Plamene prchavej horľaviny biomasy obsahovali oveľa menej sadzí než plamene vopred tepelne upravených (torifikovaných) prachových častíc [49].

Zhang a spol. z čínskej Academy of Sciences, v Pekingu merali vlastnosti častíc  $PM_{10}$  zo spaľovania uhlia a biomasy pomocou aerosólového hmotnostného spektrometra. Porovnávali vlastnosti a správanie častíc počas obdobia, kedy sa spaľovala biomasa a obdobia, kedy sa spaľovalo prevažne uhlie. Okrem iného pozorovali, že sekundárne organické aerosóly tvorili počas vykurovacej sezóny biomasou 55 % z celkového množstva častíc, čo bolo viac ako počas obdobia spaľovania uhlia (40 %). Hmotnostná koncentrácia  $PM_{10}$  častíc počas obdobia spaľovania prevažne uhlia bola oveľa nižšia ako v prípade biomasy. Naopak, priemerná koncentrácia polycyklických aromatických uhľovodíkov pri spaľovaní uhlia bola približne 5-násobne vyššia ako ich koncentrácia v období spaľovania biomasy [50].

Xu, Wang a ďalší, z Čínskej meteorologickej spoločnosti porovnávali spaľovanie kusového dreva a lisovaných peliet v rôznych druhoch kotlov. V starších typoch krbových kachiel boli pri spaľovaní peliet priemerné hodnoty emisií  $PM_{2,5}$  nižšie, ako keď sa jednalo o nezlisovanú drevenú hmotu. Zistili, že pelety spaľované v účinnom kotle v porovnaní so spaľovaním nezlisovanej drevnej hmoty v nízkoúčinných zariadeniach produkujú až o 84 % menej častíc  $PM_{2,5}$ , z toho o 96 % menej OC a o 93 % menej BC. Ďalej poukázali, že keby sa spaľovaný materiál z biomasy kukuričného pôvodu pri peletovaní zmiešal s 10 % uhoľným práškom z antracitu, a tak spaľoval, došlo by ku značnému poklesu emisií  $PM_{2,5}$  [51].

### 3.5.4 Vplyv zloženia atmosféry spaľovania

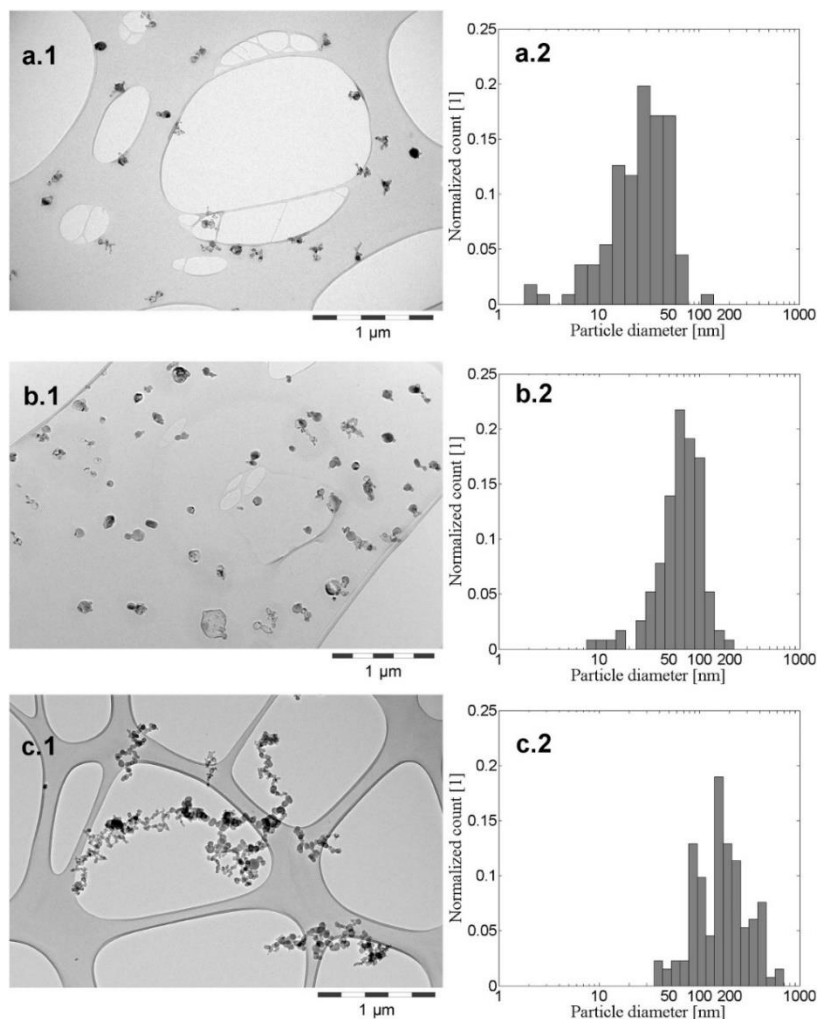
Riaza a spol. okrem iného skúmali aj vlastnosti horenia pri oxy-fuel spaľovaní, tým, že namiesto dusíka ako plynu na pozadí použili  $CO_2$ . Zistili, že pri 21 %  $O_2$  sa znížila intenzita spaľovania v porovnaní so spaľovaním v štandardnej oxy-fuel atmosfére. Znížili sa teploty spaľovania a predĺžili sa doby vyhorenia častíc biomasy. Zvyšovaním množstva kyslíka v  $CO_2$  na 28-35 % sa obnovila rýchlosť spaľovania jednotlivých častíc biomasy na hodnotu podobnú ako je vo vzduchu [49].

Vzťah medzi množstvom kyslíka v spalínach a tuhými emisiami zo spaľovania rôznych druhov biomasy vyrábaných v Grécku skúmali v roku 2014 Zosima a spol. z gréckej National Technical University of Athens v Aténach. Priemerné emisie tuhých častíc sa pohybovali od 65 do 170  $mg \cdot m^{-3}$  pri 13 %  $O_2$  a 85 až 220  $mg \cdot m^{-3}$  pri 20 %  $O_2$  v spalínach. V niektorých prípadoch bol presiahnutý maximálny povolený limit emisií pre tuhé častice 150  $mg \cdot m^{-3}$ . Väčšina tuhých častíc mala veľkosť medzi 10 až 200  $\mu m$ .

Výsledky teda ukázali, že pri 20 %  $O_2$  v spalínach boli emisie tuhých častíc v spalínach vyššie ako pri 13 %  $O_2$ . Tvrdia, že nižšie percento kyslíka vo výfukových plynch umožňuje lepšie spaľovanie biomasy a tým aj menej častíc. Približne 22 % celkovej hmotnosti častíc predstavuje celkový organický uhlík s 13 %  $O_2$ , zatiaľ čo 34 % častíc je celkový organický uhlík pri 20 %  $O_2$ . Zistilo sa, že pelety z olivovníkov emitujú pomerne nízke množstvo tuhých častíc a sú vhodné na domáce vykurovanie. Príslušné podmienky spaľovania biomasy boli stanovené termogravimetrickou analýzou. Väčšina tuhých častíc mala veľkosť medzi 10 a 200  $\mu m$ . Okrem toho zistili, že zo skúmaných palív bukové pelety emitujú najmenej častíc, zatiaľ čo najviac sa ich uvoľňuje spaľovaním smreka [52].

Množstvo vzduchu a z toho vyplývajúce podmienky horenia ovplyvňujú aj chemické zloženie častíc. Fyzikálne a chemické vlastnosti častíc biomasy pri efektívnom, stredne efektívnom a tlejúcom

spaľování porovnávali Torvela a ďalší z University of Eastern vo Fínsku. Na štúdium morfológie a chemického zloženia častíc využívali elektrónový mikroskop a disperznú röntgenovú spektroskopiu. Častice sa skladali z uhlíkatých látok a z ďalších anorganických prvkov. Sledovali častice oxidu zinočnatého so stredným priemerom menším ako 13 nm. Tieto častice tvoria zárodky pre kondenzáciu anorganických pár a organických látok. Týmto procesom sa vytvárajú štruktúrované čiastočky popola. Vonkajšia vrstva týchto čiastočiek bola zložená hlavne z alkalických solí. Pri zhoršených podmienkach spaľovania a vysokých koncentráciách častíc sa vytvárali sadze a plynné uhľovodíky.



Emisie pri: a-účinnom spaľovaní; b-stredne účinnom; c-tlejúcom (dymiacom) spaľovaní biomasy.  
Normalized count – normalizovaný počet; Particle diameter – priemer častice.

Obr. 9 Porovnanie častíc a emisií PM [53]

Torvela a spol. sledovali dva režimy distribúcie veľkosti častíc, pričom každý vykazoval špecifické charakteristiky. V nukleačnom a Aitken (ultrajemnom) móde sa tvorili častice o veľkosti do 100 nm. Zhoršením podmienok spaľovania sa zvýšilo uvoľňovanie sadzí a kondenzácia organických látok na vzniknutých časticiach, ktoré sa nachádzali hlavne v režime akumulácie (nad 100 nm). Pozorovania odhalili, že kondenzovaná organická hmota ovplyvnila veľkosť a vzhľad častíc popola. Ich výsledky rozšírili dovtedajšie poznanie o tvorbe častíc pri spaľovaní biomasy. Ukázali, že procesy formovania popola a sadzí prebiehajú z veľkej časti nezávisle. Na obrázku 9 je možné vidieť zachytené častice na impaktore pri jednotlivých procesoch a ich veľkostnú distribúciu. Oká na obrázku sú pravdepodobne spôsobené vazelínou, ktorou sa potiera plocha impaktora pre efektívny záchyt častíc [53].

Lamberg a další z University of Eastern vo Fínsku poukazujú vo svojom výskume na to, že rôzne typy spaľovacích jednotiek môžu síce produkovať približne totožné množstvo častíc PM<sub>1</sub>, pritom sa však ich zloženie môže značne odlišovať v množstve polycyklických aromatických uhľovodíkov (až 10-násobne). Viacstupňový prívod vzduchu značne znižuje množstvo týchto, pre zdravie nebezpečných uhľovodíkov [54].

### 3.5.5 Typ spaľovacieho zariadenia

Vývoj noriem na emisie technológií jednotlivých výrobcov vedie ku zlepšeniu emisií spaľovacích zariadení z hľadiska účinnosti spaľovania, a ku zníženiu produkcie oxidu uhoľnatého, tuhých častíc a prchavých organických zlúčenín. Brandelet a spol. z *Institut National de La Recherche Agronomique* vo Francúzsku porovnávali 3 generácie krbových kachlí na biomasu. V emisiách sledovali množstvo čierneho uhlíka (Black carbon). Vzorky zo spalín odoberali priamym odberom na filtre a termo-optickými meraniami v komíne.

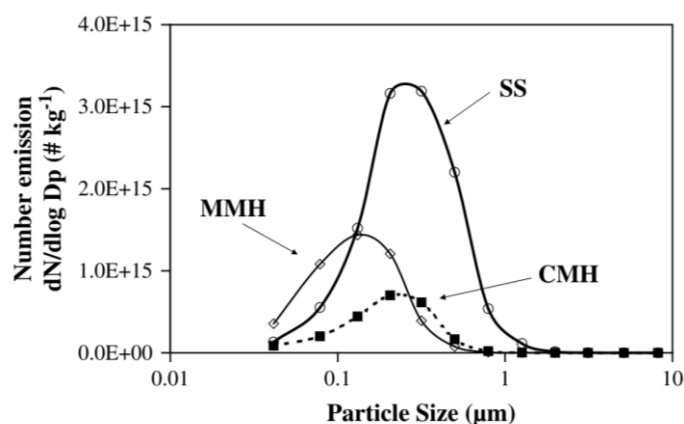
Ich výsledky potvrdili, že nová generácia krbových kachlí pre domácnosti spaľujúcich palivové drevo je vhodná pre využívanie v budúcnosti a z hľadiska čistoty ovzdušia je dôležité, aby tieto nové spaľovacie jednotky nahradili staršie typy. Z meraní vyplýva, že emisie oxidu uhoľnatého, prchavých organických zlúčenín, celkových uvoľnených častíc, organického uhlíka a elementárneho uhlíka z nových spaľovacích jednotiek sú podstatne nižšie ako emisie zo starších generácií spaľovacích zariadení. Navyše, tepelná účinnosť novej generácie je značne vyššia. Výsledky ďalej ukazujú, že množstvo BC a OC závisí od výkonu kachlí a ich technických charakteristík [29].

V roku 2016 Yue Xu a ďalší, z Čínskej meteorologickej spoločnosti, publikovali príspevok, kde sa venujú vplyvu paliva a typu spaľovacieho zariadenia na emisie elementárneho uhlíka a ďalších látok. Zistili, že nie všetky moderné typy domácich kotlov na biomasu ponúkajú zníženie emisií škodlivých látok. Záleží hlavne od podmienok, pri akých sa palivo spaľuje. Krby s vyššou účinnosťou produkujú nižšie emisie PM<sub>2,5</sub> a elementárneho uhlíka. V novších a účinnejších spaľovacích jednotkách boli emisie častíc PM<sub>2,5</sub> podstatne nižšie ako to isté palivo v nízko-účinných peciach [51].

Tissari a spol. z *Fine Particle and Aerosol Technology Laboratory, University of Kuopio* vo Fínsku študovali emisie rôznych vykurovacích zariadení používaných v saunách. Tieto zariadenia sa odlišujú od bežných typov tým, že primárne vykurojú steny sauny. Ich experimenty opäť potvrdzujú, že množstvo emisií závisí od účinnosti spaľovacieho procesu, čiže od druhu použitého kotla. Zdvojnásobenie množstva spaľovaného materiálu prinieslo 4-násobné zvýšenie emisného faktora organického uhlíka, avšak zníženie celkových emisií na kilogram paliva o polovicu. Emisné faktory sú ovplyvnené najmä spôsobom prevádzky. Proces spaľovania v saunových ohrievačoch sa značne odlišuje od bežných zariadení ako sú krbové kachle hlavne kvôli uzavretému ohňu, obmedzenému spaľovaciemu vzduchu.

Tissari a spol. uvádzajú, že pre zníženie emisií v týchto zariadeniach je dôležitá kontrola rýchlosti splyňovania s množstvom dávky paliva, ako aj obsahu vlhkosti paliva. Moderné vykurovacie zariadenia pre sauny, so správnou prevádzkou a pokročilým dizajnom roštov (distribúcia a miešanie vzduchu) ukázali, že emisie spôsobené neúplným spaľovaním sú minimálne. V takomto prípade je zloženie emisií takmer totožné s emisiami z bežného spaľovania, napr. v krbe na pelety. Častice sú potom zložené najmä z popolových zlúčenín, ale počet a emisie PM môžu byť relatívne vysoké. Zdravotné účinky týchto častíc popola sú pravdepodobne odlišné. Získané výsledky by sa neskôr mohli použiť na odvodenie rozdielov v zdravotných účinkoch emisií zo spaľovania v domácnostiach pri používaní rôznych typov zariadení a prevádzkových postupov. Výsledky sú tiež priamo uplatniteľné na ostatné uzavreté spotrebiče. Okrem toho môžu byť emisné faktory použité v emisných inventároch.

V budúcnosti je dôležité podrobnejšie preskúmať zloženie jemných častíc z dávkových spaľovacích zariadení, najmä anorganických a organických zlúčenín a elementárneho uhlíka [55].



Moderné vykurovanie muriva sauny (MMH); konvenčné vykurovanie muriva (CMH); staršie tradičné saunové kachle (SS)  
Particle Size – veľkosť častíc; Numberin emission – množstvo emisií

Obr. 10 Priemerné rozdelenie veľkosti častíc pre jednotlivé typy vykurovacích zariadení [55]

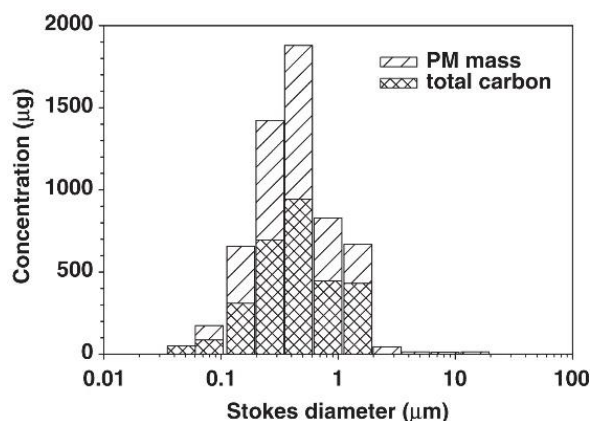
### 3.6 Hmotnostná a povrchová charakteristika jemných častíc

Dôležitým ukazovateľom vygenerovaných jemných častíc pri procese spaľovania je aj ich celková hmotnosť a povrch. Pravdou je, že hmotnosť jednej častice o priemere jeden mikrometer je rovnaká ako hmotnosť niekoľko sto častíc s priemerom 10 nm. Samozrejme, aktívna plocha rovnakej hmotnostnej jednotky častíc je pri malých veľkostiach mnohonásobne vyššia z dôvodu ich vysokého počtu. Poznať hmotnosť častíc je pre nás prínosom hlavne pri hmotnostnej bilancii. Pomôže nám určiť, aké hmotnostné percento paliva sa transformovalo práve do jemných častíc.

Sarnat a kolektív vo svojom príspevku analyzovali častice pod  $2,5 \mu\text{m}$  s cieľom nájsť hmotnostnú bilanciu. Využívali metódu „*factor analytical and chemical mass balance*“. Pozorovali významný vzťah medzi časticami pochádzajúcimi z mobilných zdrojov a časticami zo spaľovania biomasy. Na základe týchto analýz modelovali odhady akútneho zdravotného rizika [56].

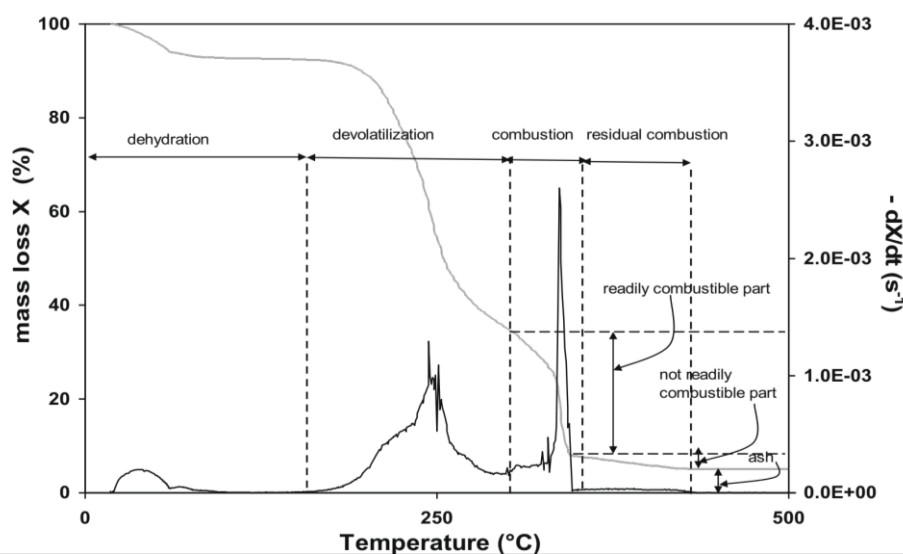
Gaston a spol. Z University of Washington, USA vo svojom príspevku uvádzajú on-line merania jemných častíc vznikajúcich zo spaľovania biomasy s použitím hmotnostnej spektrometrie. Ich snahou bolo charakterizovať ultrajemné PM. Túto techniku použili na detekciu a kvantifikáciu látok vznikajúcich spaľovaním dreva, a to takmer v reálnom čase. Zistili, že počas kampane boli hmotnostné koncentrácie zlúčenín v rozmedzí od  $0,002$  do  $19 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  so strednou hmotnostnou koncentráciou  $0,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Vo svojom príspevku uvádzajú radu molekulových vzorcov jednotlivých látok a ich príslušné molekulárne hmotnosti. Sledovali množstvo faktorov, ako organický uhlík, ukazovatele účinnosti spaľovania (pomer CO ku  $\text{CO}_2$ ), meteorologické podmienky, smer vetra a podobne [57].





Obr. 11 Rozdelenie veľkosti hmotnosti častíc  $PM_{2,5}$  a celkovej hmotnosti uhlíka pri spaľovaní zvyškov z ryže [58]

Niekoľko štúdií o hmotnostnej bilancii častíc  $PM_{10}$  a  $PM_{2,5}$  uvádzajú vo svojom rešeršnom príspevku Chow a kol. Skúmali použitie modelu hmotnosti, v ktorom kvantifikovali hmotnostné príspevky zo spaľovania fosílnych palív a iných zdrojov do koncentrácií  $PM_{2,5}$  a  $PM_{10}$  v mestských a regionálnych mierkach. Analýzy chemickej hmotnosti v 22 rôznych štúdiách ukazujú, že spaľovanie fosílnych palív je veľkým prispievateľom častíc  $PM_{2,5}$  a  $PM_{10}$ , pričom väčšina primárnych častíc pochádza z výfukových plynov vozidiel poháňaných dieselovým a benzínovým motorom. Príspevky z vedľajších zdrojov, ako sú uhoľné elektrárne, sú zanedbateľné po tom, čo sa tieto zariadenia modernizovali. Detegované sú aj sekundárne sulfáty a dusičnany z fosílnych palív [59].



Temperature – teplota; mass loss – úbytok hmotnosti

Obr. 12 Termogravimetrická analýza a množstvo vyprodukovaných častíc *Miscanthus giganteus* (plodina ozdobnica veľká) v atmosfére vzduchu [60].

Chemickú a fyzikálnu analýzu plynovou chromatografiou a hmotnostnou spektrometriou a určenie pôvodu jemných častíc  $PM_{2,5}$  vzniknutých zo spaľovania obilných plodín, ryže a pšenice priniesli Hays a spol. Vo svojom príspevku uvádzajú hmotnostné emisné faktory častíc spaľovania. Zároveň uvádzajú, že pozorovali aerosóly prevažne v režime akumulácie (100-1000 nm). Ich štúdia podrobne špecifikuje vlastností jemných častíc vzniknutých zo spaľovania, na základe ktorej je čiastočne možné rozlíšiť pôvod jednotlivých jemných častíc v ovzduší [58].

Správanie tepelne ovplyvnenej vzorky energetických plodín skúmali pomocou termogravimetrickej analýzy Jeguirim a ďalší z Laboratoire Gestion des Risques vo Francúzsku. Vzorky zahrievali rýchlosťou  $5\text{ °C min}^{-1}$  v atmosfére vzduchu. Zistili jednotlivé fázy vysušenia, odplynenia a mieru tepelnej degradácie na základe DTG krivky termogravimetrickej analýzy. Zároveň kvantifikovali emisie vzniknutých plynov a jemných častíc  $\text{PM}_{0,1}$  –  $\text{PM}_{2,5}$ . Uvádzajú, že počas ich experimentov sa uvoľnilo približne  $1,8 \times 10^{13}$  častíc na gram drevnej hmoty. Hmotnosť uvoľnených častíc do veľkosti  $1\text{ }\mu\text{m}$  tvorila 4,04 % celkovej hmotnosti vzorky [60].

Tab. 3 Percentuálne vyjadrenie jednotlivých veľkostných frakcií častíc vyprodukovaných termogravimetrickou analýzou pri teplotnom rozsahu  $20\text{--}450\text{ °C}$  pre materialy *Miscanthus giganteus* (Ozdobnica obrovská) a *Arundo donax* (Trst' rákosovitá) [60]

Sample	PM <sub>0,1</sub>	PM <sub>0,1-1</sub>	PM <sub>1-2,5</sub>	PM <sub>2,5-10</sub>
Miscanthus giganteus	73,7	26,2	0,1	0
Arundo donax	70,4	29,5	0,1	0

Podobným výskumom spaľovania biomasy v laboratórnych podmienkach a analýze vznikajúcich častíc sa venoval so svojím kolektívom Mitsuhiko Hata z Kanazawa University v Japonsku v roku 2013. Ako palivo použili vzorky kaučukovníka (rubber wood), drevených peliet (whole wood pellets) a ryžové zbytky (rice husks). Zároveň skúmali vplyv rýchlosti ohrevu vzoriek na produkciu jemných častíc. Uvádzajú, že vyše 30 % hmotnosti detekovaných jemných častíc tvorila veľkostná frakcia do  $100\text{ nm}$ . Z ich výsledkov vyplýva, že pri ohreve paliva rýchlosťou  $10\text{ °C}$  za minútu produkujú ryžové zbytky približne  $53\text{ mg}$  jemných častíc veľkosti do  $1\text{ }\mu\text{m}$  na gram paliva. V prípade drevených peliet to bolo  $65\text{ mg}$  častíc na gram paliva.

Ďalej skúmali častice dymu emitované pri spaľovaní biomasy v laboratórnej peci. Znovu využili: kaučukové drevo, pelety z dreva a ryžové šupky. Sledovali polycyklické aromatické uhľovodíky (PAH) a vo vode rozpustný organický uhlík (WSOC) v časticiach menších ako  $70\text{ nm}$ . Ďalej sa sledoval vplyv rýchlosti ohrevu počas spaľovania, typu biomasy na správanie pri spaľovaní vzhľadom na emisie častíc. Častice menšie ako  $0,43\text{ }\mu\text{m}$  výrazne prispeli k celkovej úrovni toxických PAH a WSOC. Vlastnosti týchto častíc boli ovplyvnené zložením paliva, podmienkami horenia a veľkosťou častíc. Výsledky TG-DTA ukázali, že rýchlosť ohrevu v rozmedzí  $10\text{--}20\text{ °C}$  za minútu nemá významný vplyv na spaľovacie vlastnosti [61].

### 3.7 Využitie hmotnostného spektrometra pre prvkové zloženie spalín

Okrem termogravimetrickej analýzy, ktorá nám poskytne informácie o úbytku hmotnosti v závislosti na tepelnom ovplyvnení vzorky biomasy je kľúčové poznať, aké chemické látky sú uvoľňované v samotnom procese.

Štúdiom variability hmotnostných spektier organických aerosólových častíc produkovaných pri spaľovaní rôznych druhov dreva sa zaoberal Weimer a spol. zo švajčiarskeho výskumného centra Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research. Pri svojich výskumoch používali aerodynamický hmotnostný spektrometer Aerodyne. Spaľovacie skúšky prebiehali v malom spaľovacom zariadení na kusové drevo. Hmotnostné spektrá počas začiatkovej, horiacej fázy dreva (fáza I) a konečnej, dohorievanej tlejúcej fázy (fáza II)

Tab. 4 Diagnostické hodnoty o niektorých vlastnostiach častíc pre päť experimentov s rôznymi typmi dreva v dvoch rôznych fázach [62]

(wc – obsah vody v %; T – teplota v °C; Org - nezriedená hmotnosť organických častíc v mg.m<sup>-3</sup>; Number – početná koncentrácia častíc v spalínach na cm<sup>3</sup>; ToF - režim rozloženia veľkosti veľkosti v nanometroch. I -začiatočná, horiacej fázy dreva; II - konečná, tlejúca fáza. (beech - buk, larch - smrekovec, fir - jedľa, oak - dub a chestnut – gaštan)

Experiment	wc	T		CO/CO <sub>2</sub>		Org		Number		ToF	
		I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Beech	12.5	410	300	0.007	0.07	25	7	1.2e08	8.8e07	100	140
Larch	14.5	320	240	0.01	0.07	12	3	5.8e07	3.6e07	105	110
Fir	10.8	320	200	0.008	0.13	10	4	3.9e07	4.5e07	100	90
Oak	10.4	240	220	0.05	0.09	22	5	1.1e08	5.3e07	110	130
Chestnut	11.4	300	230	0.01	0.1	4	10	1.8e08	1.2e08	130	60
Beech automatic	10.2 <sup>b</sup>	200 <sup>b</sup>		0.0003 <sup>b</sup>		4 <sup>b</sup>		1.7e08 <sup>b</sup>		140 <sup>b</sup>	

Zistili, že hmotnostné spektrá horiacej a tlejúcej fázy toho istého druhu dreva vykazujú väčšie rozdiely ako spektrá medzi rôznymi druhmi dreva v rámci tej istej fázy. Ďalej sa zistilo, že počas jedného experimentu, pri ktorom bola spaľovaná kôra z bielych jedlí, bol podiel polycyklických aromatických uhľovodíkov na celkovej organickej hmote značne vysoký (~ 30 %) v porovnaní s inými prípadmi pri spaľovaní dreva (0,4-2,2 %) [62].

#### 4 Analýza, interpretácia a zhodnotenie poznatkov

Uvedené zhrnutie súčasného stavu problematiky produkcie a merania jemných častíc pri spaľovaní biomasy je východiskovým bodom pre ďalšie skúmanie. Téma dizertačnej práce znie: „Vliv provozních parametrů spalovacího procesu na koncentraci jemných částic ve spalínách biomasových kotlů“. Je potrebné zdôrazniť, že táto problematika zažíva rapidný rozmach až v poslednom desaťročí. Je to najmä z dôvodu vývoja technológií pre detekciu jemných častíc, predovšetkým do veľkosti 1 μm. Intenzívnym výskumom a pokrokom v zdravotníctve vieme s istotou povedať, že vplyv jemných častíc na dýchaciu sústavu človeka je nezanedbateľný a žiaľ, väčšinou negatívny [29] - [63].

V prvej časti druhej kapitoly sme sa venovali súčasným poznatkom o jemných časticiach. Dnes je možné analyzovať ich veľkosť, popísať chemické zloženie či tvar [27], [26]. Vďaka pokročilým technológiám mikroskopov sme schopní zachytiť fotografie častíc až do veľkosti niekoľkých nm [3], [53]. Uhlíkové častice sa delia, podľa ich pôvodu a pôsobenia na otepľovane, resp. ochladzovane planéty, na čierny uhlík (BC) a organický uhlík (OC) [18] - [20]. Rovnako vieme približne popísať mechanizmy tvorby týchto častíc, ich postupnú formáciu a jednotlivé veľkostné módy [4] - [8].

V ďalšej časti sú uvedené výsledky jednotlivých autorov a pracovísk, ktoré mapujú vplyv vybraných parametrov spaľovania na produkciu jemných častíc [47] - [55]. Autori skúmali vplyv povrchu a tvaru vzorky paliva [47], [48], vplyv chemických vlastností [49] - [51], závislosť na atmosfére spaľovania [49], [52] - [54]. Nakoniec porovnávali jednotlivé typy spaľovacích zariadení [29], [51], [55]. Z týchto výsledkov vyplýva, že produkcia jemných častíc je premenlivá a hlavne závislá od uvedených

parametrov. Výrazne závisí hlavne od prítomnosti množstva vzduchu pri spaľovaní, ako aj od emisnej triedy použitého kotla.

V ďalšej časti sme uviedli autorov publikujúcich hmotnostnú bilanciu produkovaných častíc. Tí uvádzajú špecifické druhy spaľovaných energetických plodín, a porovnávajú produkciu jemných častíc [56] - [61]. Tu sa dostávame do bodu, kedy je hmotnosť častíc určená buď priamo zo zachytenej hmotnosti na impaktore, alebo z identifikovaného počtu a veľkosti častíc. V druhom prípade je potrebné z koncentrácie jemných častíc určiť ich hmotnosť.

Rešeršná časť poskytuje dostatočný teoretický základ pre ďalšie realizované experimenty. Tieto poznatky, doplnené o skúsenosti časticového tímu Odboru energetického inžinierstva, budú využité pri spracovaní problematiky, ktorej sa venuje dizertačná práca.

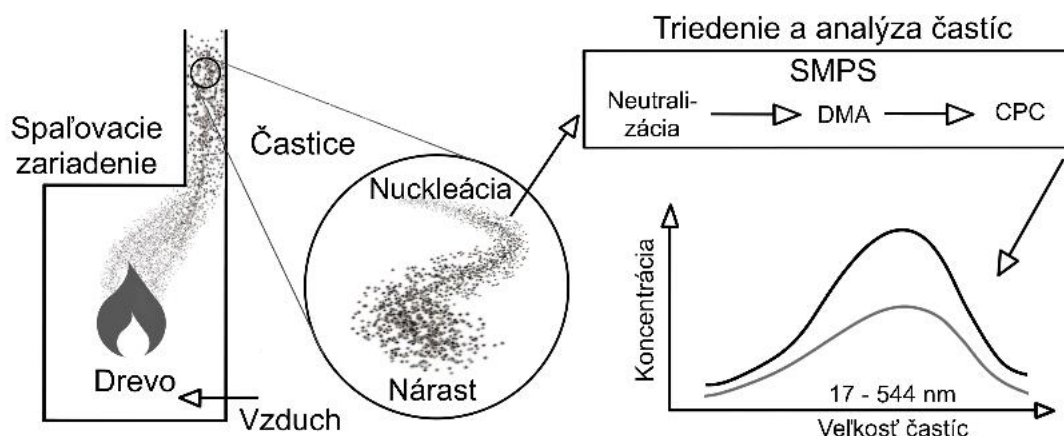
## 5 Experimentálne merania a prístrojové vybavenie

Experimentálne merania prebehli na pracovisku Energetického ústavu FSI, VUT v Brně. Pre detailné pochopenie procesov odohrávajúcich sa pri teplotnom ovplyvnení biomasy boli využité laboratórne podmienky, kde sa v prvej fáze spaľovali malé vzorky dreva v prístroji pre termogravimetrickú analýzu. Tu sa sledoval pokles hmotnosti danej vzorky a zároveň produkcia jemných častíc v priebehu riadeného ohrevu vzorky.

Ďalej boli realizované experimenty na reálnych spaľovacích zariadeniach v kotolni. Spaľované boli vzorky dreva rôzneho materiálu a vlastností. Odoberali sa a analyzovali vzorky spalín pre identifikáciu prítomných jemných častíc. V nasledujúcom texte sú uvedené jednotlivé metódy meraní a prístrojové vybavenie, ktoré bolo využité pre získanie výsledkov tejto dizertačnej práce.

### 5.1 Odber spalín pre následnú analýzu a detekciu jemných častíc

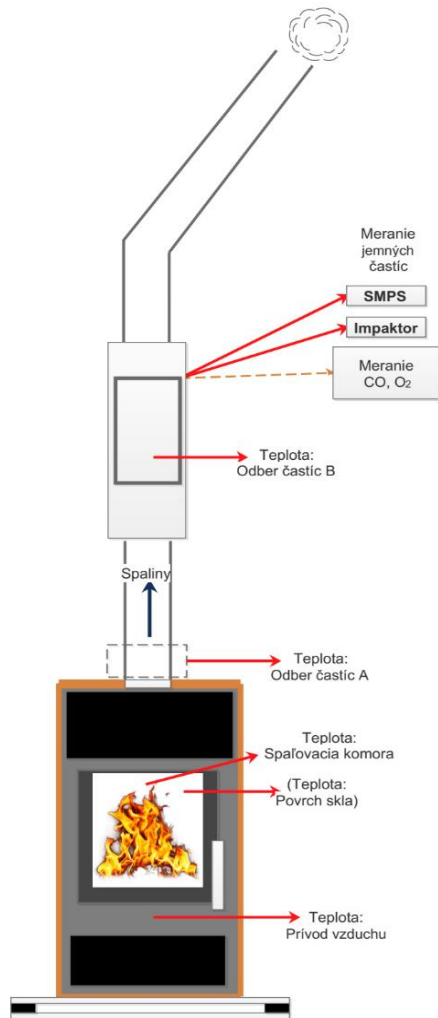
Odber a analýza jemných častíc, vo veľkostnom rozsahu do 550 nm, prebiehali podľa schémy na obrázku 13. Z rešeršnej časti tejto práce vyplýva, že jemné častice v závislosti na koncentrácií, teplote a ďalších podmienkach podliehajú procesu nukleácie a koagulujú [4], takže je mnoho faktorov, ktoré ovplyvňujú výsledné meranie. Snahou ale bolo čo najpresnejšie určiť závislosť tvorby jemných častíc vzhľadom na podmienky, v ktorých pri spaľovacom procese vznikajú.



Obr. 13 Schéma odberu a analýzy jemných častíc produkovaných spaľovacím zariadením

Pravidlá pre odber jemných častíc sú určené príslušnými normami. Norma ČSN EN 13284, s názvom **Stacionárne zdroje znečisťovania. Stanovenie nízkych hmotnostných koncentrácií tuhých znečisťujúcich látok**, určuje metódy stanovenia tuhých znečisťujúcich látok pre stacionárne zdroje emisií. Táto norma sa venuje manuálnym gravimetrickým metódam, ako aj automatizovaným meracím systémom.

Ďalej je to norma EN 13229 s názvom **Vstavané spotrebiče na vykurovanie a krbové vložky na pevné palivá - Požiadavky a skúšobné metódy**. Táto norma zavádza kritériá pre jednotlivé skúšobné metódy na spaľovacích jednotkách.



Obr. 14 Schéma merania teplôt a odberových miest na krbe

### 5.1.1 Vplyv izokinetiky na odber jemných častíc

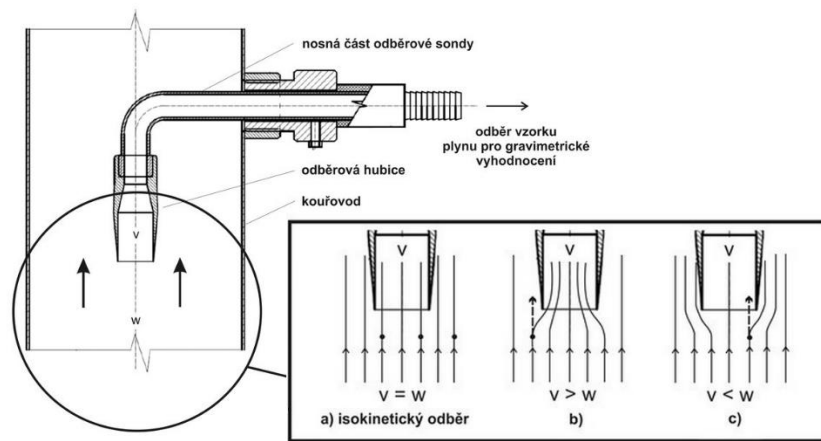
V súvislosti s odberom jemných častíc zo spalín je dôležité dodržať správnu metodiku, danú i normou, s cieľom zabezpečiť čo najpresnejšie výsledky s minimálnymi vplyvmi rôznych faktorov na meranie či odber vzorky. Pre odber pevných častíc zo spalín je známe, že izokinetika môže hrať kľúčovú rolu. Rýchlosť prúdenia spalín v spalinovode a rýchlosť odberu vzorky pomocou vývevy hrajú rozhodujúcu úlohu v efektívite a účinnosti zachytených častíc. Preto sa odporúča odber za splnenia izokinetických podmienok, čo znamená že rýchlosť prúdenia v odberovom mieste je rovnaká, ako rýchlosť prúdenia v spalinovode.

Ako je znázornené na obrázku 15, v prípade izokinetického odberu ústia do odberovej sondy práve tie prúdnice, ktoré určuje prierez odberovej sondy. Písmenom „w“ označujeme rýchlosť spalín v meranom úseku a písmenom „v“ je vyjadrená rýchlosť odoberanej vzorky. Ak je rýchlosť odberu je vyššia, než rýchlosť prúdu spalín (prípád b) na obrázku 15), väčšie častice prachu sa vďaka svojej zotrvačnosti dostanú do odberovej sondy s nižšou účinnosťou. Vo výsledku nameriame nižšie hodnoty pevných častíc, než pri izokinetickom odbere. Pri rýchlosti v odberovej sonde nižšej než je rýchlosť v prúde spalín platí opačný prípad, a nameraná koncentrácia, zvlášť pre väčšie častice bude väčšia než pri izokinetickom odbere.

Norma EN 303-5, s názvom **Vykurovacie kotly na tuhé palivá s ručným a automatickým prikladaním paliva s menovitým výkonom do 500 kW. Terminológia, požiadavky, skúšanie a označovanie**, ďalej definuje limitné hodnoty prachu pre jednotlivé emisné triedy kotlov na tuhé palivá určené na ústredné kúrenie [64].

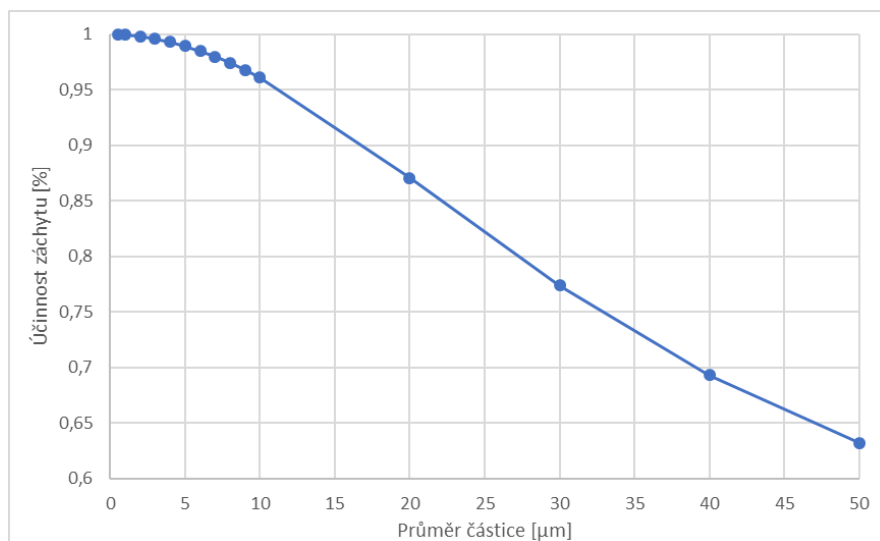
Tieto normy boli využité pre návrh odberových tratí pre meranie emisií jemných častíc. Vo vzdialenosti viac ako jeden meter nad ústím spalín krby, bola v spalinovode nainštalovaná príruha pre realizáciu odberov. Odberové sondy boli zavedené do strednej časti prierezu spalinovodu, so vstupom proti prúdu spalín, aby dochádzalo ku minimálnemu skresleniu rýchlostného profilu prúdu spalín v blízkosti stien spalinovodu.

Ďalšie odberové miesto bolo v ústi spalín do komína, aby sme sa dostali, pokiaľ možno, čo najbližšie k ohnisku a mohli tak sledovať dianie priamo v plameňoch („Odber častic A“, na obrázku 14). Tento odber nie je v súlade s uvedenými normami, slúži hlavne pre vedecké účely skúmania formácie jemných častíc.



Obr. 15 Vplyv izokinetiky na trajektóriu častíc počas odberu spalín. Prevzaté a upravené z [65]

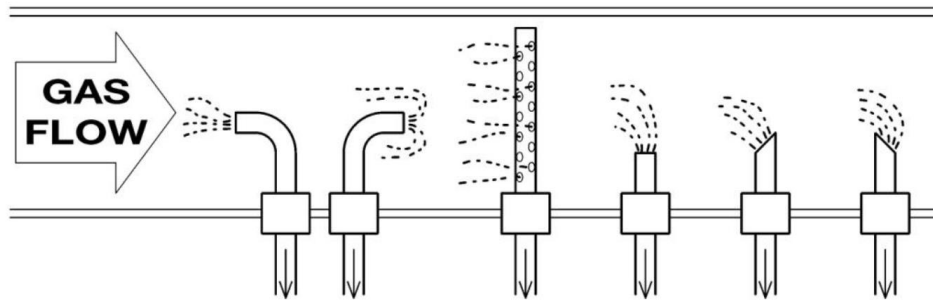
Aj pri neizokinetickom odbere je možné dodatočne urobiť úpravu skreslenia výsledkov, pokiaľ poznáme účinnosť s ktorou prebieha odber častíc. Autori Belyaev a Levin vo svojom článku s názvom „Techniques for collection of representative aerosol samples“ poskytujú jednoduché vzorce a prepočtové koeficienty ku množstvu parametrov ovplyvňujúcich odber vzorky. Výsledky získané pomocou vzorcov zároveň porovnávajú so spoľahlivými experimentálnymi dátami [66].



Obr. 16 Účinnosť záchytu pre rôzne veľkosti prachových častíc, pri neizokinetickom odbere s rýchlosťou spalín v spalínovode  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a odberu v sonde  $2,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pri použití riedičky DEKATI [66], [67]

Aj na základe týchto dát sme počítali účinnosť záchytu pre náš prípad. Rýchlosť prúdenia v spalínovode sa pohybovala približne okolo  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rýchlosť odberu v sonde bola v prípade použitia ejektorovej riedičky  $2,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Riedičkou bolo odoberané množstvo vzorky 7 litrov za minútu. Výsledná účinnosť je vyjadrená v diagrame na obrázku 16. Môžeme vidieť, že neizokinetický odber má veľký vplyv na častice väčších veľkostí. No v prípade častíc  $\text{PM}_{10}$  je účinnosť vyššia než 95 %, a v prípade častíc  $\text{PM}_{1}$ , na ktoré sme sa v našich výskumoch zameriavali, to bolo dokonca viac než 99 %.

Podobnej problematike sa venuje aj výrobca vyhrievanej riedičky s rotačným diskom od spoločnosti TSI, ktorá bola využívaná pri časti experimentov. Ako je uvedené v manuáli od výrobcu, smer odberu častíc, ako aj izokinetický odber môžeme v prípade častíc  $PM_{10}$  zanedbať (obrázok 17). Tieto faktory prakticky nemajú vplyv na účinnosť odberu jemných častíc. Viac o vlastnostiach a princípe fungovania riediacich zariadení DEKATI a TSI je uvedené v kapitole 5.4 s názvom „Riedenie vysokých koncentrácií spalín“.

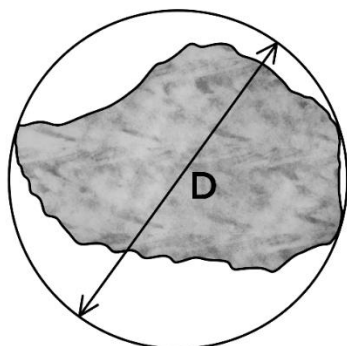


Obr. 17 Rôzne možnosti odberu jemných častíc z prúdu spalín uvedené výrobcom v manuáli riediaceho zariadenia od firmy TSI [68]

(Gas flow – prúdenie plynu)

### 5.1.2 Ekvivalentný priemer častice

Pre overenie produkcie jemných častíc pri zmenách parametrov spaľovania je nevyhnutný ich záchyt, určenie koncentrácie, veľkostnej distribúcie a následná analýza.



Obr. 18 Ekvivalentný priemer častice nepravidelného tvaru

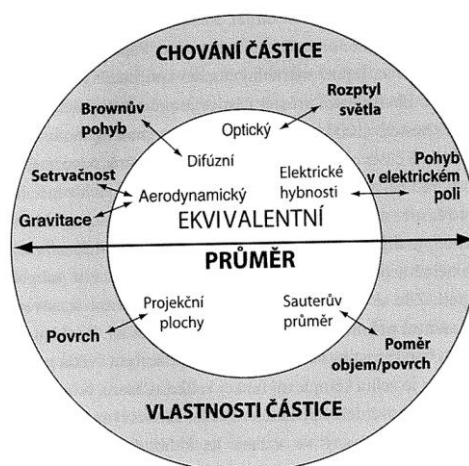
Existuje niekoľko prístupov, ako detegovať a vyhodnocovať množstvo, veľkosť, prípadne zloženie a iné vlastnosti jemných častíc. Väčšina častíc je nepravidelného tvaru. Pre zjednodušenie upravujeme veľkosť častíc napríklad na priemer ekvivalentnej guľovej plochy tvoriacej obálku častice nepravidelného tvaru, ktorá má blízku aerodynamickú charakteristiku (obr. 18). Priemer častice označujeme  $D_p$  [69].

Zo začiatku sa ku časticiam pristupovalo na základe ich hmotnosti, čiže gravimetricky. Jemné častice uvoľnené zo spaľovania biomasy sa odlišujú veľkosťou, ako aj fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. Dnes sa v prípade častíc  $PM_{10}$  používajú gravimetrické merania iba zriedka, pretože sa zistil význam počtu a celkového povrchu častíc. Z hľadiska vplyvu na zdravie človeka je rozhodujúci práve povrch častíc. Toto hodnotenie je založené na skutočnosti, že škodlivé látky sa viažu na povrch jemných častíc. Preto je okrem hmotnosti alebo počtu častíc viac zmysluplné merať ich celkovú aktívnu povrchovú plochu [29], [4], [70].

Pre zjednodušenie je bežnou praxou predpoklad, že všetky vyprodukované častice sú sférické. Ich merný povrch sa vypočíta na základe nameranej koncentrácie častíc a ich veľkostnej distribúcie. Podobným spôsobom sa prepočítava hmotnostné množstvo častíc. Hmotnosť každej častice sa vyjadruje z jej veľkosti (priemeru) na základe dopyčítaného objemu za predpokladu známej strednej hustoty častíc rovnej [71].



Z hľadiska chovania častíc v atmosfére sú podstatné ich tvar, veľkosť a hustota. Určenie veľkosti častíc je však kľúčové pre popis chovania častíc z hľadiska fyzikálnych zákonov. Pre najmenšie častice, o veľkosti do desiatok nanometrov, platia zákony dané Brownovým pohybom. Častice väčšie než 10  $\mu\text{m}$  sa riadia zasa zákonmi gravitácie a zotrvačnosti. Pri meraní veľkostí častíc, odvodzujeme ich priemer na základe správania sa častice v danom prostredí. Napríklad, na základe rýchlosti difúzie častíc do 1  $\mu\text{m}$  určujeme ich difúzny ekvivalentný priemer. Na základe elektrickej mobility (hybnosti), meriame ekvivalentný priemer elektrickej mobility. Pokiaľ je sledovanou charakteristikou rozptyl svetla aerosolu, ide o optický ekvivalentný priemer. Často sa používa Sauterov priemer, čo je priemer kvapôčky s priemernou hodnotou pomeru povrchu a objemu všetkých sledovaných kvapôčok aerosolu [72]. Na obrázku 19 je znázornený ekvivalentný priemer častice, určený na základe jej vlastností.



Obr. 19 Ekvivalentný priemer častice závislý na meraní jej chovania alebo vlastností [72]

Pojem ekvivalentný priemer častice je teda veľkosť častice určená nepriamo na základe ďalších fyzikálnych či geometrických vlastností, ktoré sme schopní merať priamo. Nami použitá metóda SMPS využíva práve elektrickú mobilitu častíc pre určenie ich veľkosti [73].

## 5.2 Identifikácia veľkostnej distribúcie častíc

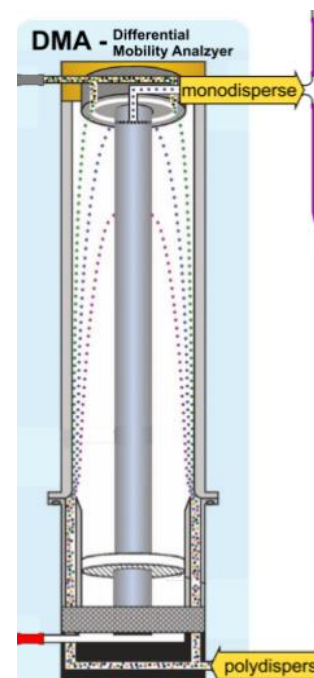
Najdôležitejšou súčasťou experimentálneho vyhodnocovania produkcie jemných častíc pri jednotlivých spaľovacích skúškach pre dosiahnutie stanovených cieľov bola aparátúra pre analýzu, veľkostnú klasifikáciu a počítanie množstva jemných častíc. Keďže najmenšie častice dosahujú veľkosť už okolo 5 nm, nie je možné použiť priamu optickú detekciu. Minimálna vlnová dĺžka svetla v použitých optických laseroch je okolo 300 nm. Malé častice sú však kondenzačné jadrá, ktoré v prostredí nasýtených pár a vďaka procesu kondenzácie zväčšujú svoju veľkosť a stávajú sa detekovateľnými.

Zostava takejto aparátúry pozostáva z impaktora pre odlúčenie častíc väčších ako  $\text{PM}_{10}$ , neutralizátora pre prerozdelenie elektrického náboja častíc, zariadenia DMA a CPC. Naše pracovisko Energetického ústavu disponuje prístrojom SMPS od firmy TSI, ktorý pozostáva z elektrostatického kvalifikátora model 3080L, zariadení DMA (model 3081, alebo model 3081) s negatívnou polaritou a kondenzačného čítača častíc model 3775. Na vyhodnotenie a export dát bol použitý počítač s aplikáciou „Aerosol Instrument Manager“ [71].

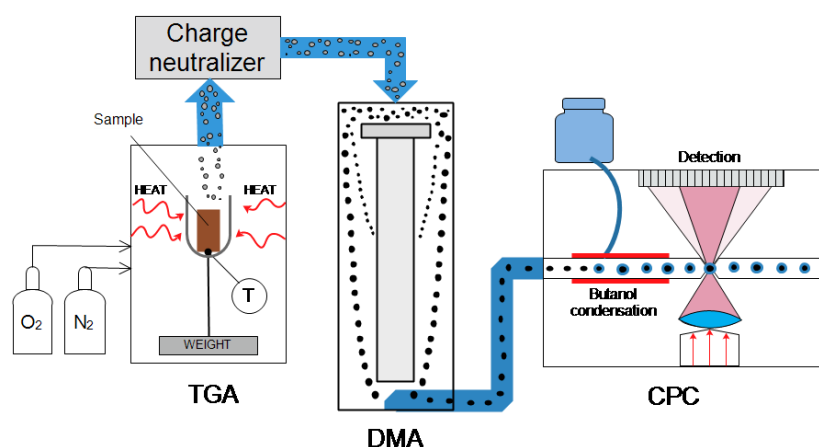
Na základe elektrickej mobility jednotlivých veľkostných frakcií v polydisperznom aerosóle používame na určenie veľkostí častíc ( $D_{EM}$ ) metódu SMPS. (z angl. *Scanning Mobility Particle Sizer*).

**DMA** (*Differential Mobility Analyzer*) je zariadenie, ktoré slúži na klasifikáciu častíc podľa elektrickej mobility. Pozostáva z dvoch elektród valcovitého tvaru. Častice vletia do medzipriestoru elektród, a na základe veľkosti elektrického napätia a náboja častíc je ich trajektória ovplyvnená elektrostatickým polom. DMA opúšťa monodisperzný aerosól konkrétnej veľkostnej frakcie častíc. K dispozícii sú 2 typy DMA. **Long DMA** ponúka klasifikáciu v priemernom rozsahu od 10 do 1000 nm. **Nano DMA** dokáže klasifikovať častice v priemere od 2 do 150 nm.

**CPC** (*Condensation Particle Counter*) je kondenzačný počítač, prístroj pre detekciu počtu monodisperzných častíc. Samotné častice sú príliš malé na to, aby boli detegované optickou metódou. Preto častice najprv prechádzajú nasýtenými parami butanolu. Následne sa schladia a pary butanolu kondenzujú na prítomných časticiach. Častice takto narastú na veľkosť nad 1  $\mu\text{m}$ , čo umožňuje ich optickú laserovú detekciu (obr. 21 vpravo).

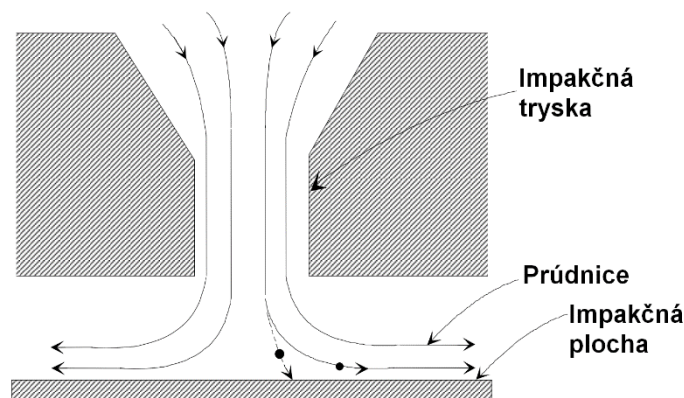


Obr. 20 Zariadenie DMA a jeho princíp fungovania. *Differential Mobility Analyzer* – triedenie na základe rozdielnej mobility častíc; monodisperse – monodisperzný aerosól; polydisperse – polydisperzný aerosól [71]



Obr. 21 Schéma meracej trate: Termogravimetrická analýza spolu s SMPS prístrojom. Charge neutralizer – neutralizácia elektrického náboja; Sample – vzorka; Heat – ohrievanie; Weight – váha; Butanol condensation – kondenzácia butanolu; Detection – detekcia.

Kondenzačný počítač zároveň disponuje pumpou, ktorá vyvoláva prúdenie celou sústavou SMPS a ovplyvňuje rýchlosť nasávania vzorky aerosólu. V nastaveniach tohto prístroja je možné zvoliť dva režimy prúdenia a to 0,3 a 1,5 litrov za minútu. Pred vstup monodisperzného aerosólu do prístroja CPC je možné pridať HEPA filter s dvojcestným ventilom. Tento ventil vďaka veľmi jemnej regulácii umožňuje prisávať časť čistého vzduchu do CPC prístroja práve cez HEPA filter a tým znížiť množstvo odberu samotnej vzorky. Na prístroji SMPS sa nachádza aj kontrolný prietokomer, ktorý zobrazuje prietok vzorky. Týmto je prístroj schopný nasávať vzorku v rozsahu 0,1 až 1,5 litrov za minútu.



Obr. 22 Princíp impaktora a záchytu nečistôt na impakčnej ploche pred vstupom do prístroja SMPS. Prevzaté a upravené z [73]

Pred vstupom do prístroja SMPS vzorka aerosólu prejde impaktorom. Ten obsahuje trysku, zvyšujúcu rýchlosť prúdenia. K dispozícii sú tri trysky s rôznym priemerom: 0,0457 cm, 0,0508 cm a 0,071 cm. Veľkosť trysky sa volí podľa nastavenia prietoku prístroja. Hneď za tryskou sa nachádza impakčná plocha (obr. 22), na ktorej prúd aerosólu mení smer ostro do pravého uhla. Veľké častice nad 1  $\mu\text{m}$  sa odlúčia a zvyšok vzorky putuje do zariadenia DMA.

Na impakčnú plochu sa nanáša veľmi tenká vrstva vazelíny, aby nedochádzalo ku odrazu väčších častíc, ale aby ostali „nalepené“ na impaktore. Impakčnú plochu je potrebné pravidelne čistiť, v závislosti od znečistenia meraného aerosólu.

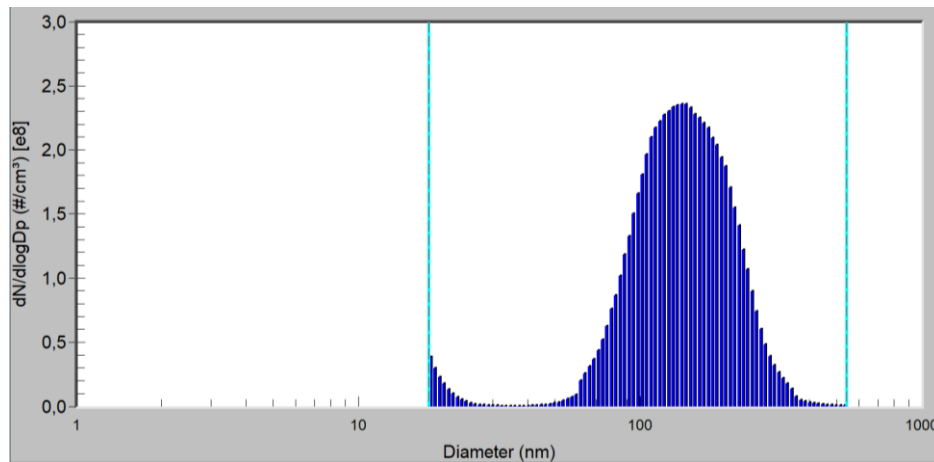
Zariadenie SMPS teda dokáže detegovať častice od 2 nm do 1000 nm, podľa použitého diferenčného analyzátoru mobility. Polydisperzný aerosól prechádza bipolárnou nabíjačkou. Častice majú buď kladný, záporný alebo neutrálny náboj. V neutralizátore sa v prvej fáze neutralizuje náboj na časticiach a následne sa častice nabijú na jednu polaritu. Častice potom vstupujú do DMA a sú roztriedené podľa ich elektrickej mobility. Požadovanú veľkosť monodisperzných častíc, ktoré opúšťajú DMA je možné zvoliť nastavením veľkosti napätia na elektródach DMA.

Klasifikátor častíc sa môže používať v dvoch režimoch: podtlakový režim, počas ktorého je prietok polydisperzného aerosólu nastavený CPC a pretlakový režim, v ktorom prietok určuje polydisperzný aerosól vstupujúci do klasifikátora [71].

Meraním veľkosti častíc a zároveň ich koncentrácie získavame veľkostnú distribúciu (size distribution). Je to najbežnejší spôsob prezentácie výsledkov meraní atmosférických aerosólov (obrázok 23).

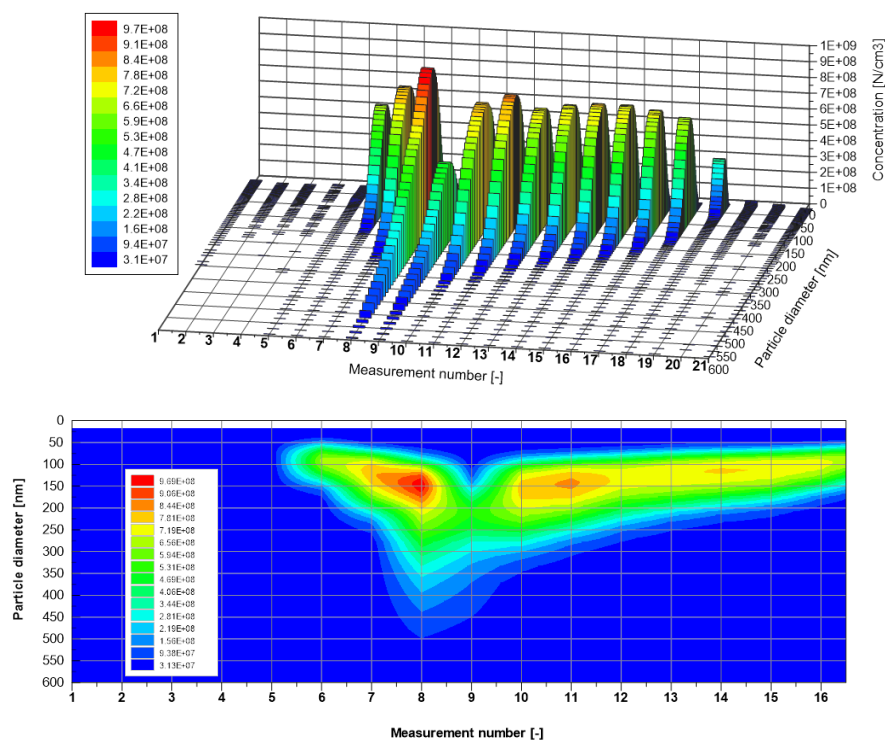
V našich experimentoch sme využívali v rámci prístroja SMPS software *Aerosol Instrument Manager* dodávaný priamo výrobcom prístroja. Software zaznamenáva priebeh meraní a umožňuje základný export nameraných dát vo forme počtu častíc, priemeru, povrchu objemu alebo hmotnosti. Prístroj vizualizuje aktuálny priebeh meraní online, ako je zobrazené na obr. 23.

Nami zvolené časové nastavenie rýchlosti skenovania veľkostnej distribúcie bolo 50 sekúnd. Ku tomu 10 sekúnd tzv. „retrace“, čo znamená čas, ktorý potrebuje prístroj DMA na „regeneráciu“ napätia na elektródach. Tieto hodnoty nám zaručili, že každú minútu (dohromady 60 sekúnd) sme získali veľkostnú distribúciu, ako je znázornená na obr. 23.



Obr. 23 Veľkostná distribúcia jemných častíc. Meranie SMPS metódou a prístrojom od spoločnosti TSI. Záznam so softvéru Aerosol Instrument Manager. (Diameter – priemer častíc)

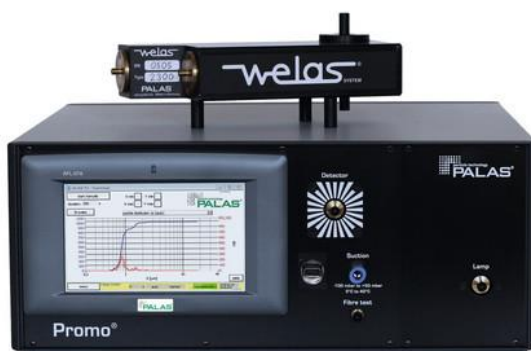
Aby sme mohli vizuálne vyhodnotiť merania, ktoré trvali niekoľko minút, alebo až hodín, pomohli sme si tzv. „koncentračnými mapami“, čiže farebným diagramom, kde boli naskladané jednotlivé minútové distribúcie vedľa seba, a zároveň farebne rozlíšené koncentrácie jednotlivých veľkostí častíc. Na spracovanie dát a vykreslenie diagramov sme využili software MATLAB, prípadne DIAdem od National Instruments. Na obrázku 24 je znázornený postup vykresľovania v prostredí DIAdem. Číslo merania (Measurement number) na osi X reprezentuje čas po jednej minúte. Os Y udáva veľkosť častíc, a os Z ich koncentráciu vo farebnej škále, podľa legendy.



Obr. 24 „Koncentračné mapy“ pre znázornenie veľkostnej distribúcie častíc pri meraniach v dlhších časových intervaloch. Measurement number – číslo merania; Particle diameter – veľkosť častíc; Concentration – koncentrácia.

### 5.3 Optické meranie koncentrácie jemných častíc (Palas Promo 2000)

Palas Promo 2000 je zariadenie určené na meranie koncentrácie a veľkosti aerosólových častíc pomocou rozptylu svetla. Pomocou optických káblov môžu byť podľa potreby k tomuto zariadeniu pripojené optické senzory Welas. Tieto senzory umožňujú spoľahlivé meranie v koncentračnom rozsahu 1 až  $10^6$  častíc  $\cdot$  cm<sup>-3</sup> a sú k dispozícii na meranie v plynoch, ako aj v kvapalinách. V závislosti od použitého senzoru dokáže toto zariadenie merať častice o veľkosti 0,2  $\mu$ m – 40  $\mu$ m. Zariadenie obsahuje až 128 veľkostných kanálov. Merania sa dajú ľahko spustiť na displeji prístroja a všetky údaje, ako napríklad okamžitá veľkostná distribúcia, koncentrácia častíc a 24 ďalších štatistických hodnôt sa môžu zobraziť v reálnom čase.



Obr. 25 Zariadenie Palas Promo 2000 [74]

Výhodou je, že všetky prichádzajúce údaje je možné uložiť s časovým rozlíšením 1 s, čo znamená, že prístroj každú sekundu zmeria celú distribúciu vo zvolenom rozsahu. Obsahuje procesor na spracovanie signálu s frekvenciou 20 MHz, ktorý analyzuje priebeh každého signálu častíc. Ďalšou výhodou je jeho kompatibilita a možnosť riadenia programom Labview. Môžu byť ku nemu pripojené ďalšie snímače teploty, vlhkosti a tlaku [74].

### 5.4 Riedenie vysokých koncentrácií spalín

Keďže v reálnych podmienkach pri spaľovaní biomasy vznikajú pomerne vysoké koncentrácie spalín, priamym odberom by mohlo dôjsť ku rýchlemu znečisteniu prístrojov pre meranie koncentrácie jemných častíc. Navyše, priamym odberom by často došlo aj ku prekročeniu horného limitu možnej meranej koncentrácie. Z tohto dôvodu je potrebné spaliny riediť s čistým vzduchom vo vhodnom pomere. Pri experimentoch boli využité dva druhy riediacich zariadení, pracujúcich na rozdielnych princípoch:

Rotating Disk Thermodiluter od spoločnosti TSI – model 379020A (*Termoriedička s rotačným diskom*). Tento prístroj je vhodný najmä na riedenie odoberaných vzoriek častíc z dieselových a benzínových motorov, olejových horákov alebo zo spaľovania dreva či uhlia. Je vybavený samostatnou sondou a riediacou jednotkou, ktorá účinne riedi vzorku čo najbližšie pri zdroji (napríklad v komíne), aby sa zachovala pre čo najpresnejšie meranie. Jeho veľkou výhodou je tiež variabilný riediaci pomer, ktorý je plynule nastaviteľný od 15: 1 až do 3000: 1. Umožňuje tiež voliteľnú teplotu vyhrievania disku v mieste riedenia do 150 ° C, aby sa zabránilo kondenzácii prchavých látok. Vzorky nezriedených plynov sa odoberajú rýchlosťou približne 1 l·min<sup>-1</sup>. Časť výfukového plynu je zachytená v jednotlivých dutinách rotujúceho disku a transportovaná do meracieho kanála, kde je zmiešaná s čistým riediacim vzduchom prejde cez HEPA filter. Riediaci pomer je lineárna funkcia závislá od

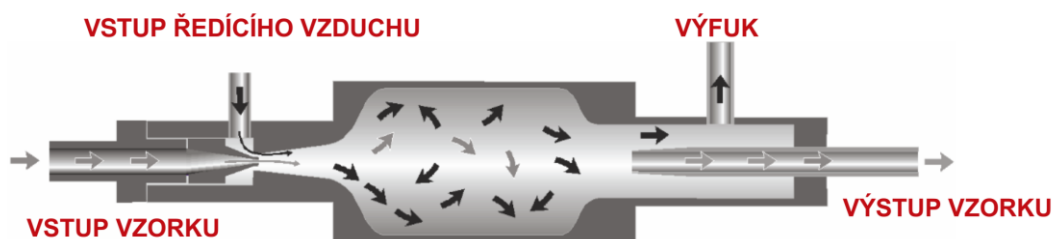
kalibračního faktora disku. Pomer riedenia ďalej závisí na objeme dutiny a počte dutín na disku, na frekvencii otáčania a prietoku riediaceho vzduchu.



Obr. 26 Princíp fungovania riedičky s rotačným diskom [75], [76]

Táto metóda poskytuje riedenie emisií s vysokou presnosťou a stabilitou. Riadiaca jednotka kontroluje a reguluje prietok a indikuje prípadné chybné stavy. Aby sa zabránilo meraniu kondenzovaných prchavých látok, môže sa zahrievať aj riediaci vzduch. Nižšie teploty riedenia umožňujú štúdium prchavých frakcií v spalínach. Hlavica termoriedičky by mala byť pripojená čo najbližšie k zdroju aerosólu. Na riadiacu jednotku je pripojená elektrickým a pneumatickým vedením o dĺžke 3 m. Rýchlosť otáčania disku závisí od prietoku riediaceho vzduchu, ktorý sa nastavuje v riadiacej jednotke. Nevýhodou tejto riedičky je nutnosť pravidelnej údržby a čistenia disku vždy po niekoľkých hodinách prevádzky [71].

Ejektorová riedička Dekati® je riediace zariadenie, ktoré umožňuje dlhodobé meranie jemných častíc vysokých koncentrácií, vysokých teplôt a za vlhkých podmienok. Vyžaduje odber približne  $7 - 8 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  vzorky na analýzu častíc. Princíp jej činnosti je založený na ejekčnom riedení. Čistý a suchý tlakový riediaci vzduch vstupuje do zariadenia cez kritickú trysku, ktorá reguluje množstvo prietoku riediaceho vzduchu. Tento prietok vytvára tlakovú stratu v ejektorovej dýze, ktorá vtáhuje vzorku cez dýzu do riediacej komory.



Obr. 27 Princíp fungovania ejektorovej riedičky DEKATI [77]

Riediaci čistý vzduch sa mieša so vzduchom vzorky v riediacej komore, čo má za následok homogénne riedenie plynov a častíc. Pomer prietoku riediaceho vzduchu k prietoku vzorky určuje faktor riedenia, ktorý sa vďaka konštrukcii automaticky udržiava konštantný v širokom rozsahu prevádzky. Pokiaľ je rozdiel tlakov medzi vstupom a výstupom riedidla konštantný, faktor riedenia zostáva konštantný. Pomer riedenia tohto typu riedičky je 1:8,44 [77].

## 5.5 Impaktor DEKATI

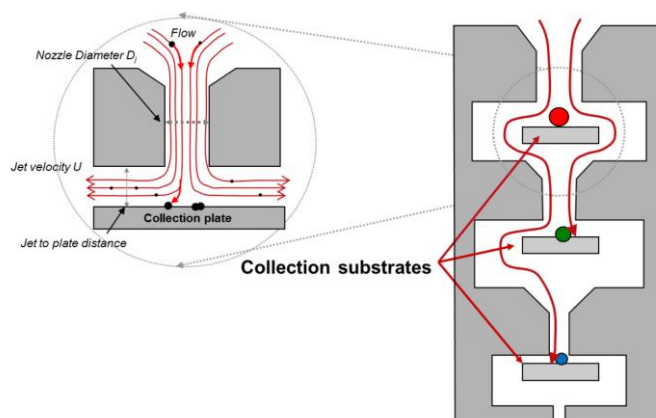
Nízkotlakový impaktor Dekati® HT-DLPI+ meria rozloženie veľkosti častíc v rozmedzí 16 nm až  $10 \mu\text{m}$  na 14 kanáloch (poschodiach). Ide o kaskádový impaktor, ktorý klasifikuje častice na základe ich zotrvačnosti (podľa ich aerodynamického priemeru). Pomocou gravimetrickej analýzy zhromaždených aerosólových častíc je možné vyhodnotiť hmotnosť jednotlivých frakcií častíc. Prvé poschodie odstráni

z prúdu častíc častice väčšie ako 10  $\mu\text{m}$ . Ďalšie poschodia zachytávajú postupne menšie a menšie častice.



Obr. 28 Impaktor DEKATI HT-DLPI+ [77]

Zariadenie obsahuje jednotku impaktora, ohrievač impaktora a regulátor teploty integrovaný do radiacej jednotky. Ku radiacej jednotke môže byť pripojený termočlánok pre meranie teploty vzorky na vstupe do impaktora. K dolnej časti impaktora je potrebné pripojiť vývevu, ktorá zabezpečuje odber vzorky. Na každé poschodie sa pripevní vopred zvažovaný filter, na ktorom je nanosený tenký film vazelíny. V našom prípade sme používali filtre z tenkej hliníkovej fólie. Takto sa jednotlivé poschodia naukladajú na seba a impaktor sa uzavrie krytom.



Obr. 29 Princíp fungovania impaktoru [78]

(Flow – prúdenie; Nozzle Diameter – priemer trysky; Jet velocity – rýchlosť prúdu; Jet to plate distance – vzdialenosť plochy od trysky; Collection substrates – zachytený materiál)

Ako je znázornené na obrázku 29, impaktor zachytáva na každom poschodí určitú veľkosť častíc. Impakcia je ovplyvnená rýchlosťou prúdenia a vzdialenosťou impakčnej plochy od ústia trysky pod predchádzajúcim stupňom. Po doske s tryskami smeruje prietok aerosólu smerom ku zbernej doske (impakčnej plochy) a medzi otvormi dochádza k ostrému obratu. Častice, ktoré sú väčšie, ako je daná aerodynamická veľkosť pre konkrétny stupeň, nemôžu "vytočiť" ostrý obrat a narazia na impakčnú plochu. Menšie častice zostávajú v prúde aerosólu a pokračujú na ďalší stupeň s vyššou rýchlosťou.

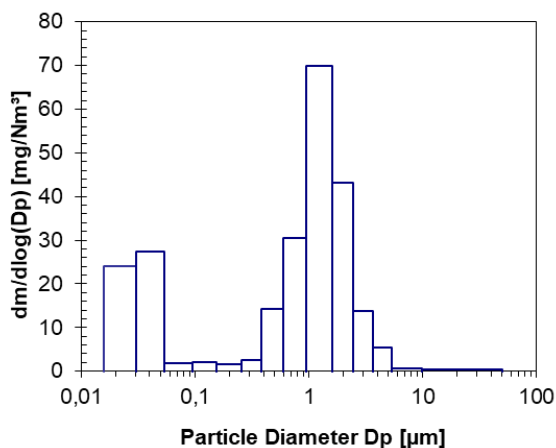
Doba odberu na impaktor je závislá od úrovne znečistenia vzorky. Je potrebné, aby sa na jednotlivých poschodiach nachádzala požadovaná hmotnosť častíc. V prípade meraní okolitého vzduchu to môže byť až niekoľko dní, no v prípade spalín zo spaľovania biomasy iba pár minút. Ak by sa na poschodiach zachytilo príliš veľké množstvo prachových častíc, mohlo by dôjsť ku zaneseniu trysiek prúdiaceho média a tým ku znehodnoteniu merania [77].



Obr. 30 Ukážka zachytených jemných častíc na povrchu impakčnej plochy

### 5.5.1 Vyhodnocovanie meraní impaktorom

Po samotnom odbere vzorky na impaktor, ktoré trvalo v našom prípade približne 10 minút, sa impaktor nechá vychladiť a následne sa filtre jednotlivých poschodia zväžia. Výrobca poskytuje Excel súbor s názvom „DLPI plus calculation sheet ver 1.2“, kde sa vložia údaje o hmotnostiach impakčnej fólie každého poschodia pred a po odbere, na základe čoho je vygenerovaný stĺpcový graf znázorňujúci hmotnosti jednotlivých poschodí (obr. 31).



Obr. 31 Stĺpcový diagram znázorňujúci výsledky namerané impaktorom DEKATI [77]

Vzorky zachytené na impakčnú plochu boli vážené na analytických váhach *Ohaus Pioneer Semi - Micro 225 D*. Tie disponujú vážiacou miskou s priemerom 90 mm. Vážia v rozsahu 110 gramov, s citlivosťou 0,0001 g. Umožňujú pripojenie cez rozhranie RS232 [79].



## 5.6 Odber vzorky na filter a ich analýza

Pre určenie morfológie a chemického zloženia vznikajúcich častíc v spalinách sme pri vybraných spaľovacích skúškach odoberali vzorky spalín na filter. Využitie boli polykarbonátové filtre s priemerom pórov 0,4  $\mu\text{m}$ . Analýza týchto filtrov bola vykonaná využitím skenovacieho elektrónového mikroskopu MIRA3 od firmy TESCAN, ktorý pre svoju experimentálnu činnosť využíva Český hydrometeorologický ústav (pobočka Brno) [80].



Obr. 32 Odber vzorky jemných častíc na filter pomocou SMPS zariadenia. Zapojenie odberovej kazety do prúdu častíc (vľavo); odber veľkostne roztriedených častíc priamo pred CPC zariadením (uprostred) a odber častíc priamo zo spalinovodu (vpravo).

Boli použité odberové kazety od spoločnosti SKC Inc. venujúcej sa analýze kvality ovzdušia a odberu vzoriek spoločne s filterami o priemere 37 mm. Testované boli nasledujúce filtre rovnako od spoločnosti SKC [81]:

1. membránové filtre materiálu PVC s priemerom 37 mm s porozitou 5  $\mu\text{m}$ ;
2. membránové filtre z materiálu polykarbonát s priemerom 37 mm s porozitou 0,4  $\mu\text{m}$ .

Po úvodných testoch boli ako vhodné pre ďalšie testovanie vybrané polykarbonátové filtre 0,4  $\mu\text{m}$ . Ako vývevu pre zabezpečenie prúdenia aerosólu cez filter sme využili zariadenie CPC v režime 0,3 litrov za minútu. Odberové kazety boli v prvom prípade umiestnené priamo do odberu zo spalinovodu (obr. 32 vpravo). Vzhľadom ku vysokým koncentráciám častíc v spalinách mohol odber prebiehať iba niekoľko sekúnd. Zachytávané boli častice o veľkosti 1 nm - 5  $\mu\text{m}$ .

V druhom prípade sme odberovú kazetu s filtrom umiestnili medzi prístroj SMPS a CPC (obr. 32 uprostred), čiže za triediacim zariadením DMA. Tu už boli veľké častice odlúčené na impaktore pred vstupom do SMPS prístroja a odber trval 2 minúty. Zachytávané boli častice s veľkosťou 18 - 550 nm. Následne sme prepli režim SMPS prístroja do monodisperzného módu a zachytávali častice špecifickej veľkosti – 50 nm, 100 nm, 200 nm a 400 nm.

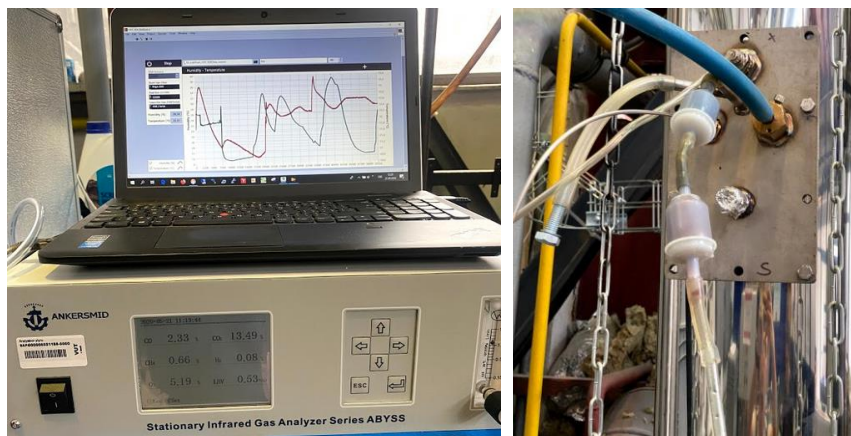
Rozdielne umiestnenie kaziet s filterami umožnilo odber a následnú analýzu častíc menších ako PM<sub>1</sub> a väčších než PM<sub>1</sub> s následným porovnaním chemického zloženia. Analýza filtrov zároveň umožnila sledovať rozdielnú morfológiu častíc vo zvolených pozíciách.

Následne bola vykonávaná analýza filtrov s využitím skenovacieho elektrónového mikroskopu MIRA3 od firmy TESCAN, Ltd. Tento mikroskop má vysokú rozlišovaciu schopnosť vďaka Schottkyho auto-emisnej katóde. Unikátny systém šošoviek umožňuje pozorovanie v rôznych skenovacích módoch. Pre zobrazovanie je tak využívaný pohyblivý zväzok elektrónov. Jedná sa o nepriamu zobrazovaciu metódu prostredníctvom sekundárneho signálu. Táto metóda dokáže v ideálnom prípade dosiahnuť rozlíšenie lepšie ako 1 nm. Metóda umožňuje štúdium povrchov, zisťovanie rozmerov častíc

a získanie prvkového spektra s využitím sondy EDX. Softvér, ktorý je určený pre riadenie mikroskopu, snímame a spracovanie obrázkov umožňuje prácu aj v prostredí Windows [82].

## 5.7 Analýza plynov v spalinách

Prístroj ABYSS® ASG Online Syngas Analyser od spoločnosti Ankersmid *Sampling* bol použitý pre online sledovanie zloženia plynov v spalinách. Toto zariadenie je špeciálne navrhnuté pre nepretržité monitorovanie plyných zložiek atmosféry. Prístroj zaznamenáva koncentrácie uhľovodíkových plynov ( $C_xH_y$ ), Metánu ( $CH_4$ ), oxidu uhličitého ( $CO_2$ ), oxidu uhoľnatého ( $CO$ ), kyslíka ( $O_2$ ) a vodíka ( $H_2$ ). Jeho fungovanie je založené na princípe infračervenej technológie a detektora tepelnej vodivosti [83].



Obr. 33 Prístroj ABYSS® ASG Online Syngas Analyser použitý pre analýzu plynov (vľavo) a odber plynov zo spalinovodu prechádzajúci filterami (vpravo)

Toto zariadenie disponuje LCD obrazovkou so zobrazovaním aktuálnych hodnôt jednotlivých plynov. Na prednom paneli sa ďalej nachádzajú ovládacie tlačidlá a stavaný prietokomer s reguláciou prietoku. Pred vstupom do prístroja je filter zachytávajúci nečistoty, ktoré by mohli ovplyvňovať životnosť alebo funkčnosť prístroja. Zariadenie umožňuje prepojenie s počítačom a záznam nameraných dát vďaka portu RS 232 [83].

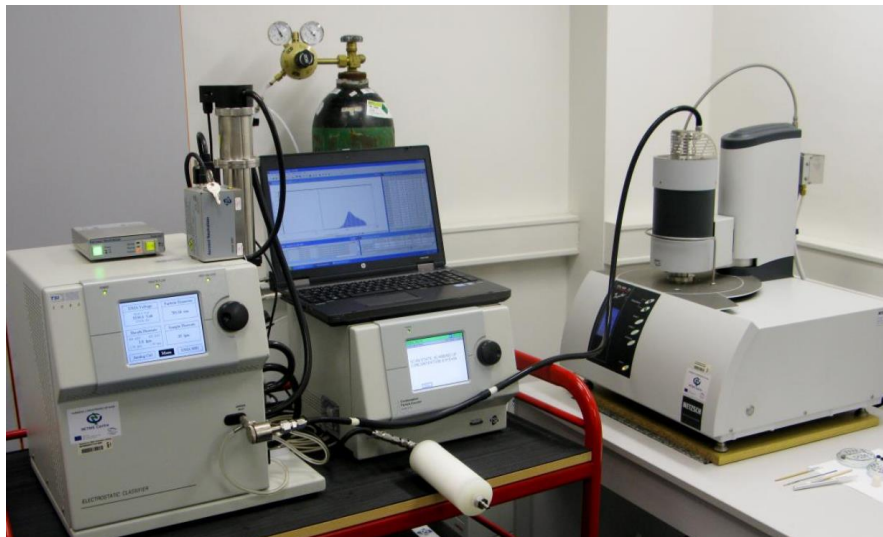
Hneď za odberom spalín zo spalinovodu pre analýzu plynov prechádzala vzorka dvoma filterami zapojenými do série, ktoré zachytávali najhrubšie nečistoty. Z dôvodu funkčnosti a cenovej dostupnosti boli použité palivové filtre pre automobily. Následne putovala vzorka spalín do vymrazovačky s vývevou. Tu došlo, vďaka procesu kondenzácie, ku odvedeniu vlhkosti zo vzorky spalín. Takto vysušené plyny boli privedené cez ďalšie filtre do prístroja ABYSS pre ich online analýzu.

## 5.8 Spaľovanie v laboratórnych podmienkach (TGA + SMPS)

Pred tým, než došlo ku meraniam na reálnych spaľovacích jednotkách sme pre detailnejšie porozumenie procesu spaľovania využili laboratórium s prístrojom pre termogravimetrickú analýzu, ktorý spaľuje malé vzorky paliva. Zároveň sme sledovali produkciu jemných častíc veľkosti do  $1\ \mu\text{m}$ .

Použitý laboratórny postup kombinuje termogravimetrickú analýzu (TGA) a metódu pre identifikáciu veľkosti a koncentrácie častíc (SMPS). TGA umožňuje určiť teplotné intervaly, kedy dochádzalo k zmenám hmotnosti v súvislosti s rôznymi procesmi, ako je tepelný rozklad alebo dehydratácia danej vzorky. Počas merania TGA monitoruje hmotnosť vzorky ovplyvnenej teplotou a identifikuje jej stratu.

Meranie bolo vykonané s využitím zariadení TGA NETZCH - Jupiter F3. Výsledkom merania je TGA krivka znázorňujúca zmenu hmotnosti v závislosti na teplote vzorky (obr. 37). Plynné zložky tepelne ovplyvnenej vzorky sú rozptýlené spolu s časticami v testovanej atmosfére. Prúd aerosólu vstupuje do SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), kde dochádza ku triedeniu jemných častíc na základe ich veľkosti a následne je určená ich koncentrácia. Zariadenia TGA a SMPS boli navzájom prepojené elektricky vodivou silikónovou hadičkou s dĺžkou 1,5 metra. Priebežne bola meraná produkcia jemných častíc počas procesu spaľovania vzoriek bukového dreva.



Obr. 34 Prepojenie prístrojov pri experimentálnom zahrievaní drevených vzoriek. SMPS (vľavo) a termogravimetrický analyzátor (vpravo)

## 5.9 Nepresnosť, opakovateľnosť a možné chyby meraní

Je dôležité poznamenať, že aj napriek dodržiavaniu normy, nastaveniu spaľovacích podmienok na čo najpodobnejšie, nie je možné dosiahnuť sto percentnú presnosť a opakovateľnosť. Je zrejmé, že každý z vyššie použitých prístrojov meria a vyhodnocuje s určitou presnosťou. No kľúčovým faktorom je práve samotný proces horenia, kedy prebieha množstvo procesov, ktoré nie sú užívateľom ovplyvniteľné.

Z hľadiska použitého zariadenia pre spaľovanie dreva sa javil ako najpresnejší prístroj termogravimeter. Tu sme aj z výsledkov mohli vidieť, že jednotlivé opakovania v prípade čo najpresnejšej vzorky boli takmer totožné. Z použitých kotlov spaľujúcich biomasu viedli v opakovateľnosti automatické kotle spaľujúce pelety. Z hľadiska dlhodobého spaľovania



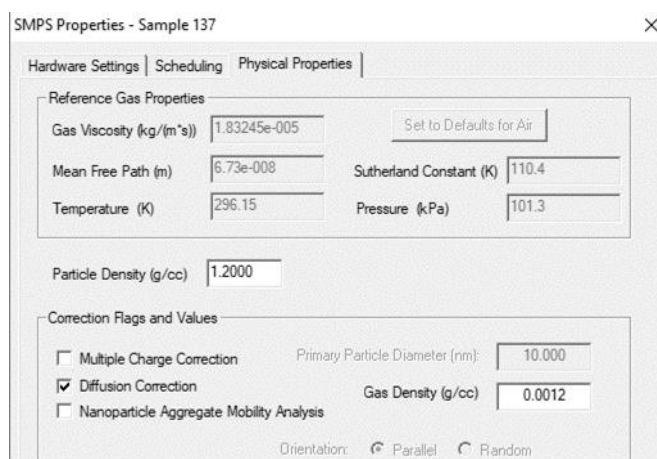
Obr. 35 Horenie v krbe s ručným prikladáním kusového dreva

rovnakého druhu peliet je toto palivo relatívne homogénne.

Pri krbe s ručným prikladáním sme pozorovali najväčšiu nepresnosť opakovania. Aj v prípade priloženia takmer totožných kusov paliva, a pri rovnakých podmienkach dochádzalo ku zahoreniu a priebehu horenia vždy iným spôsobom. Napríklad, čas od momentu priloženia dreva na tlejúce uhlíky z predchádzajúceho cyklu, po moment prvých viditeľných plameňov bol nepredvídateľný. Kým v niektorých prípadoch palivo zahorelo v priebehu pár sekúnd, inokedy bolo potrebné čakať 2 až 3 minúty.

Našou snahou bolo v prípade spaľovania v krbe minimalizovať všetky možné faktory, ktoré by mohli ovplyvňovať presnosť merania. Vyberali sme vždy kusy dreva s približne rovnakou geometriou a hmotnosťou. Tieto kusy sme vkladali do krbu v rovnakom usporiadaní. Počas horenia sme dbali, aby podtlak v komíne bol v hodnote, akú vyžadovalo meranie. Keďže sa tento ťah komína nastavoval manuálne, a v priebehu cyklu sa menil, bolo potrebné ho pravidelne kontrolovať a v prípade potreby upraviť.

Ďalšie nepresnosti môžu byť spôsobené na strane odberu a analýzy jemných častíc. Odberová trať bola pred vstupom do riedičky vyhrievaná, aby nedochádzalo ku kondenzácii. Predsa sa tu však nachádzal krátky nevyhrievaný úsek v mieste odberu spalín. Rotačná riedička pracuje spoľahlivo s riediacim faktorom v prípade, že jej disky a vedenie sú vyčistené stlačeným vzduchom. Výrobca odporúča túto údržbu každých 8 hodín prevádzky [84]. Napriek tomu sme pozorovali veľmi mierny pokles priepustnosti riedičky v priebehu merania. V prípade ejektorovej riedičky môže dochádzať ku zaneseniu trysky, čím sa menia rýchlosti prúdenia média v riedičke a dochádza ku zmene riediaceho pomeru. Rádovo však ide o desatiny riediaceho pomeru, no i tento fakt je potrebné zohľadniť, pokiaľ hovoríme o presnosti merania.

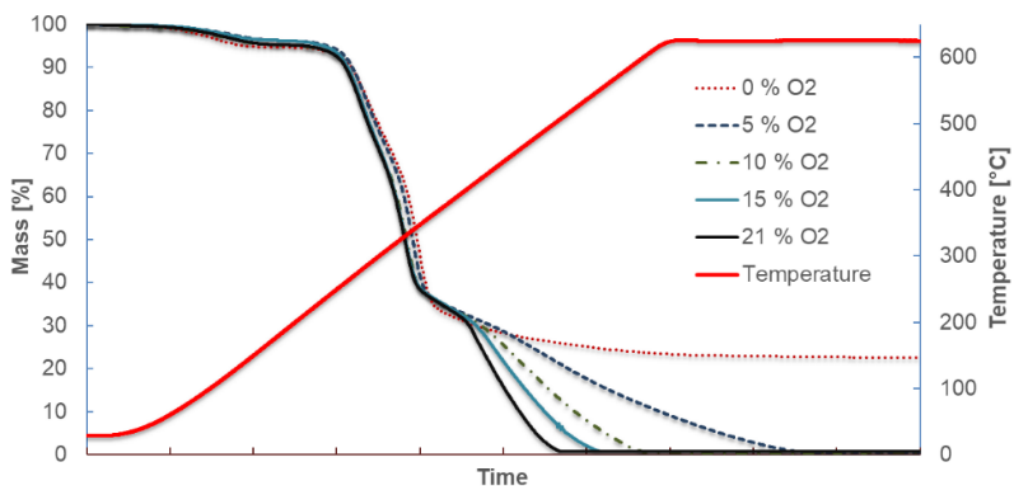


Obr. 36 Možnosť nastavenia korekcie difúzie („Diffusion Correction“) a ďalších veličín vo vlastnostiach merania [73]

Do prístroja SMPS vstupuje vzorka vodivou silikónovou hadicou dodávanou výrobcom. Najmenšie častice majú tendenciu zachytávať sa na stenách vedenia vďaka elektrostatickým silám [4]. Rovnako v samotnom prístroji môže dochádzať ku istej strate vzorky prúdením v jednotlivých hadičkách. Software, ktorým nastavujeme a vyhodnocujeme merané hodnoty ponúka možnosť „Diffusion Correction“, čiže korekcie difúzie spôsobenej stratami jemných častíc pri prúdení hadičkami.

## 6 Spalovanie v laboratórnych podmienkach - TGA

Termogravimetrická analýza alebo termogravimetria (TGA) znamená určenie zmeny hmotnosti vzorky v závislosti od teploty a času, ku ktorým dochádza počas špecifického teplotného programu v definovanej atmosfére. Prístroje sú vákuovo tesné a obvykle vybavené váhovým systémom s vysokým rozlíšením a meraním teploty priamo na vzorke.



Mass – hmotnosť; Time – čas; Temperature - teplota)

Obr. 37 TGA krivky tepelne ovplyvnenej vzorky bukového dreva pri rôznych koncentráciách kyslíka.

Výhodou tohto prístupu je, že pre rôzne druhy palív dokážeme získať podrobné informácie o ich správaní pri tepelnom ovplyvnení. Pre našu problematiku je prínosom prepojenie TGA zariadenia s meraním koncentrácie jemných častíc pomocou SMPS. Môžeme tak sledovať závislosť produkcie jemných častíc v jednotlivých fázach teplotnej dekompozície vzorky biomasy.

Analýza pomocou zariadenia Jupiter F3 umožňuje presné sledovanie vplyvu zmien teploty na hmotnosť malej vzorky paliva. Počas testu TGA precízne monitoruje hmotnosť tepelne ovplyvnenej vzorky a vyhodnocuje jej hmotnostnú stratu. Z analýzy vývoja zvyšovania teploty sa ďalej vyhodnocuje prítomnosť endotermických a exotermických reakcií. Základným komponentom analyzátoru STA-449 Jupiter je veľmi presný digitálny vážiaci systém s vertikálnym dizajnom. Vážiaci systém je pripojený ku tienenej keramike (modul TG), kde sú umiestnené analyzované vzorky. Počas merania je celý modul zasunutý do vzduchotesnej laboratórnej pece s riadenou rýchlosťou ohrevu [85].

### 6.1 Výsledky laboratórnych spaľovacích procesov

Vyššie uvedeným postupom boli na úvod merané vzorky troch rôznych veľkostí bukového dreva označené ako S, M, L (malý, stredný, veľký). Ďalej boli analyzované bukové piliny s hmotnosťou 80 gramov a časť kôry bukového dreva. Zloženie bukového dreva je popísané v tabuľke 5. Porovnávaná bola tepelná dekompozícia vzoriek, rýchlosť horenia, úbytok hmotnosti a produkcia jemných častíc do 1  $\mu\text{m}$ . Experimentálne meranie prebiehalo v dvoch rôznych atmosférach - vo vzduchu a v čistej inertnej atmosfére s dusíkom.

Tab. 5 Charakteristiky meraných vzoriek bukového dreva

Materiál	Hustota	Obsah vody	Lignín	Holocelulóza	$\alpha$ -celulóza	Výťažky
Bukové drevo	730 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	6.1 %	20 %	78 %	50 %	2 %

Teplotný program termogravimetra bol nastavený na dobu 1 hodina a 32 minút. Vzorka bukoveho dreva bola zahrievaná rýchlosťou 10 °C za minútu z teploty 20 °C na maximálnu teplotu 650 °C. Zotrvanie vzorky pri tejto teplote bolo 30 minút. Meranie jemných častíc prístrojom SMPS prebiehalo v minútových intervaloch po celú dobu teplotného ovplyvnenia vzorky bukoveho dreva (92 minút).



Obr. 38 Vzorky analyzované v prístroji TGA. Zľava: veľká, stredná a malá vzorka bukoveho dreva, kôra a piliny [43]

Sledovaný bol vplyv geometrie spaľovanej vzorky dreva rovnakeho materiálu na produkciu ultrajemných častíc. Ďalej sa sledovalo rozdielne správanie rovnakej hmotnosti dreva, kôry a pilín bukoveho dreva.

Tab. 6 Popis meraných vzoriek bukoveho dreva, ich veľkosť a hmotnosť

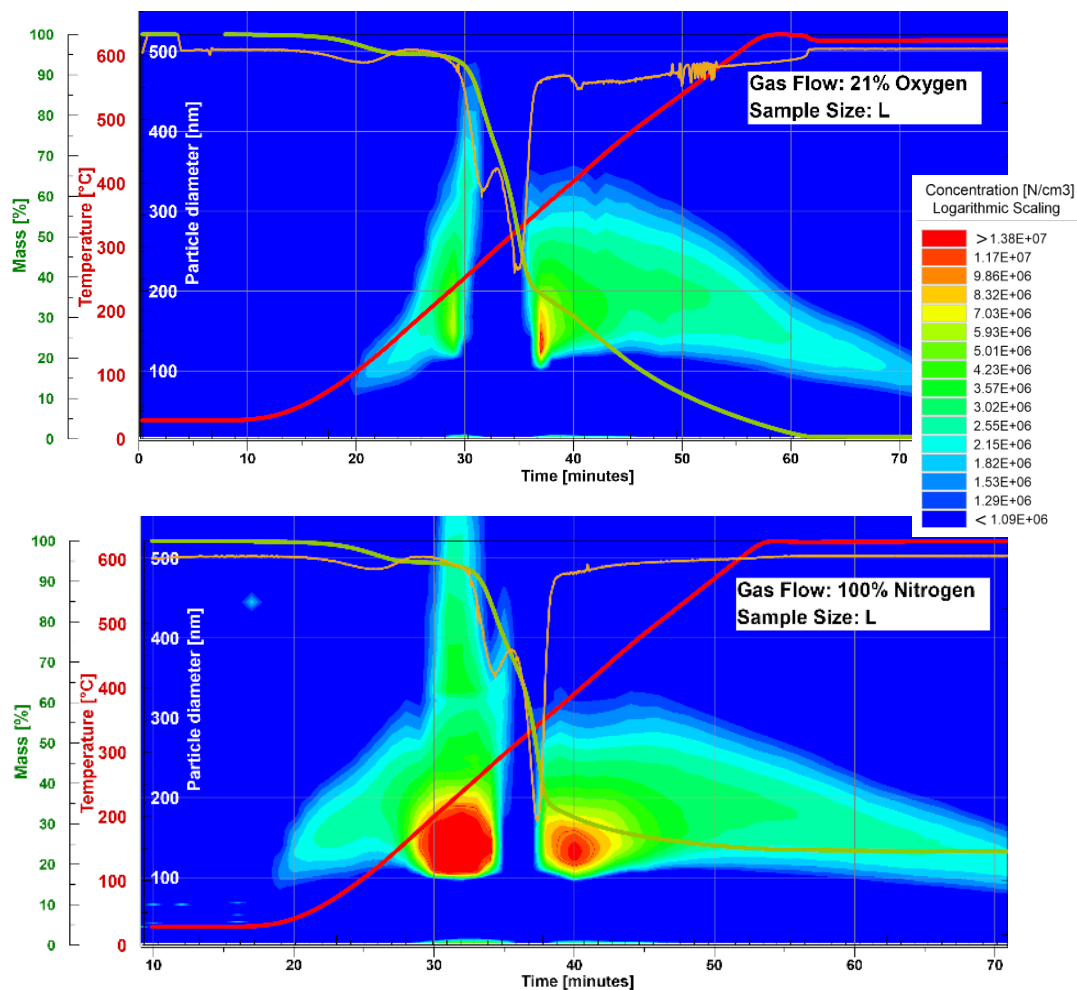
Označenie vzorky	Rozmer	Hmotnosť	Povrch
L (veľký)	20×13×2 mm	280 mg	652 mm <sup>2</sup>
M (stredný)	20×8×2 mm	150 mg	432 mm <sup>2</sup>
S (malý)	20×3×2 mm	80 mg	180 mm <sup>2</sup>

Ako je vidieť na obrázku 38, každý zo vzoriek mal rovnakú výšku a hrúbku, ale odlišovali sa navzájom v šírke. Detailné rozmery sú popísané v tabuľke 6. Meranie bolo opakované trikrát, aby sa zaručila opakovateľnosť merania. Rovnaké vzorky boli zahrievané v inertnej atmosfére čistého dusíka a následne v atmosfére vzduchu. Predpokladali sme, že menšie vzorky zahoria v atmosfére vzduchu rýchlejšie. Inertná atmosféra nám pomohla pri vyhodnocovaní vylúčiť deje, ktoré by mohli súvisieť s oxidačnými reakciami vzdušným kyslíkom.

### 6.1.1 Vplyv prítomnosti kyslíka na produkciu jemných častíc

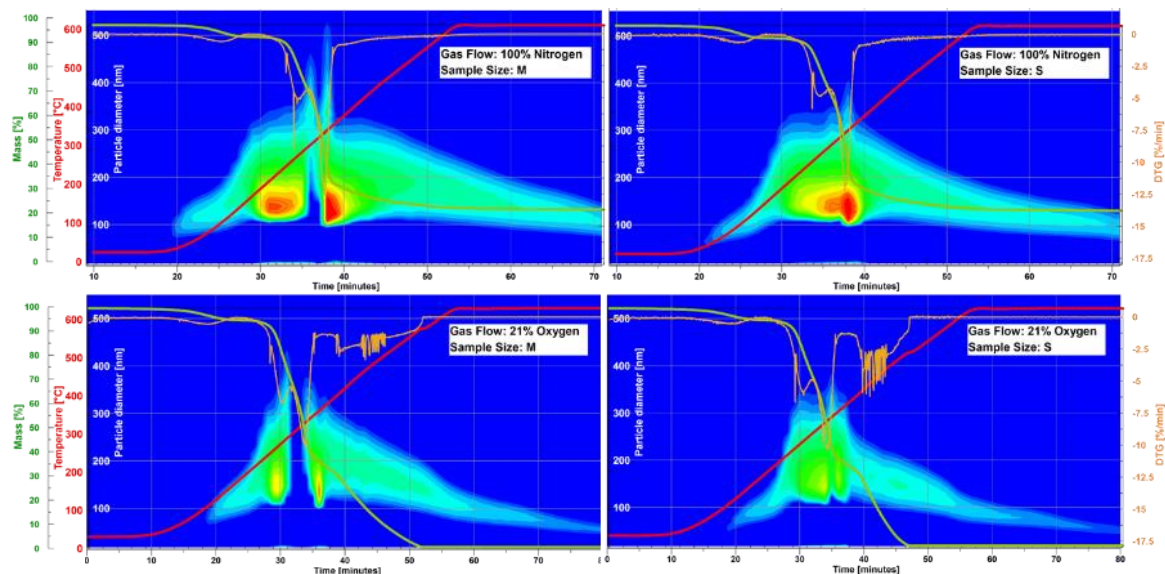
Na obrázku 39, je viditeľná produkcia jemných častíc, priebeh teploty a úbytok hmotnosti vzorky L pri tepelnej dekompozícii v inertnej atmosfére s dusíkom a vo vzduchu.

Vo vzduchu došlo v porovnaní s inertnou atmosférou ku úbytku takmer celej hmotnosti vzorky (zelená krivka) v priebehu jej zahrievania, čo bolo spôsobené zahorením. Významná produkcia častíc bola sledovaná od teploty 90 °C. Pri teplotách 260 - 350 °C bol sledovaný výrazný pokles produkcie jemných častíc. K zahoreniu vzorky, čo vyplýva z poklesu hmotnosti sledovanej prístrojom TGA, došlo pri teplote 320 °C. Celková produkcia jemných častíc vo vzduchu bola menšia, než tomu bolo v prípade inertnej atmosféry.



Obr. 39 Výsledky produkcie jemných častíc a TGA kriviek pre vzorku L bukoveho dreva vo vzduchu (hore) a v inertnej atmosfére (dolu). Červená krivka znázorňuje rastúcu teplotu, zelená klesajúcu hmotnosť, žltá je derivácia hmotnosti. Mass – hmotnosť; Temperature – teplota; Particle diameter – priemer častíc; Gas flow – prúdiaci vzduch; Nitrogen – dusík; Time – čas; Oxygen – kyslík; Concentration - koncentrácia; Logarithmic Scaling –logaritmicke meritko.

Produkcia častíc v inertnej atmosfére začína byť významná približne od teploty 70 °C (22. minúta), čo súvisí s odparovaním vlhkosti v palive. Následne, maximálna produkcia jemných častíc bola sledovaná od teploty 160 °C až po teplotu 250 °C. V rozmedzí teplôt 300 - 340 °C bol sledovaný náhly pokles produkcie jemných častíc. Ich významnejší nárast opäť nastal od teploty 360 °C. Od tejto teploty dochádza k posunu maxima produkcie k menším veľkostiam častíc, približne 160 nm.



Obr. 40 Vzorky M a S v inertnej atmosfére dusíku (hore), a vo vzduchu (dolu). Legenda ku koncentracii jemných částic je zhodná s obrázkom 39.

Ukázalo sa, že množstvo jemných částic uvoľnených z drevenej hmoty jej zahrievaním v tomto prípade významne závisí od zloženia atmosféry. Prítomnosť kyslíka a zahorenie vzorky znižuje množstvo vyprodukovaných jemných částic v sledovanom veľkostnom rozsahu.

Zaujímavosťou je výrazný pokles produkcie jemných částic v rozmedzí teplôt 280 - 350 °C. Tento jav bol zaznamenaný hlavne u väčších vzoriek veľkosti M a L. Súvisí to teda s veľkosťou a tvarom vzorky. Pôvodná hypotéza pre objasnenie poklesu produkcie jemných částic (napr. 30 - 35 minúta, vzorka L) bola zahorenie vzorky a intenzívne oxidačné reakcie, čo sa následne vyvrátilo analýzou rovnakej vzorky v inertnej atmosfére, kde nastal rovnaký pokles, avšak o 5 minút neskôr. Jedným z možných vysvetlení tohto javu je uvoľňovanie kyslíka viazaného v palive práve pri týchto teplotách.

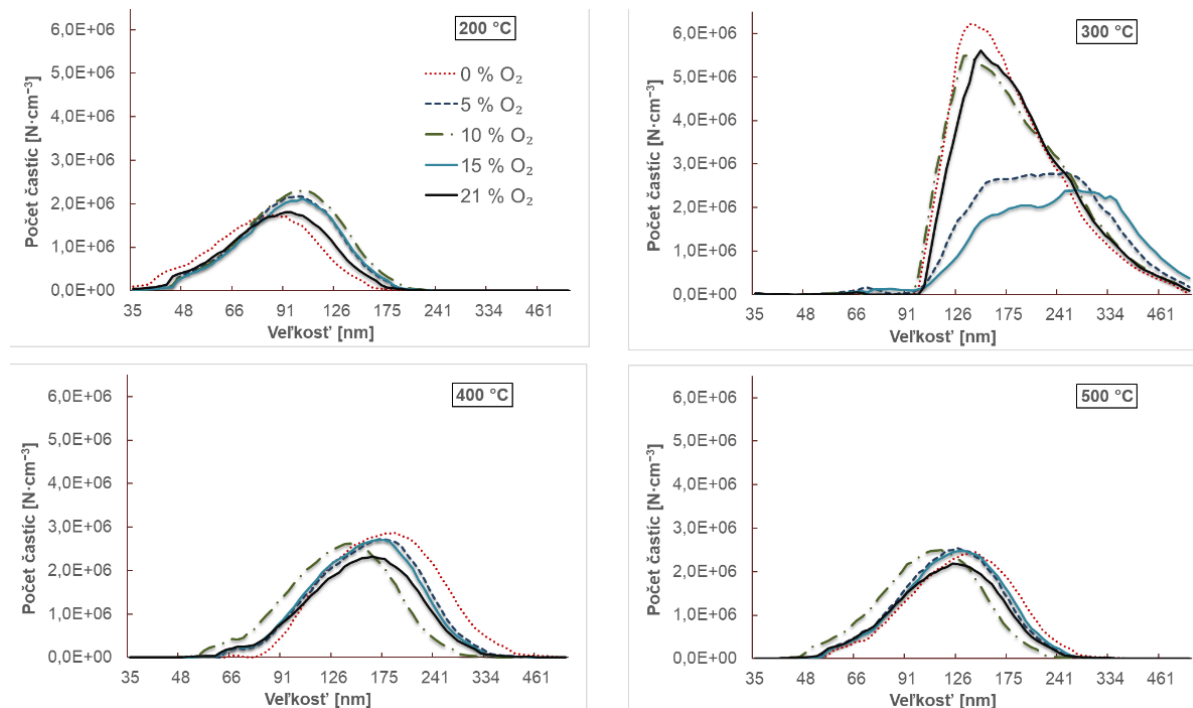
Vyššie zmienené experimenty zobrazujú výsledky pre rôzne veľkosti vzorky bukoveho dreva, avšak pre dve zloženia atmosféry – čistý dusík a vzduch s obsahom kyslíka 21 %. Ďalej bolo zisťované, čo sa deje medzi tým, a ako postupné znižovanie obsahu kyslíka vplyva na produkciu jemných částic. Vybrali sme teda najmenšiu vzorku S, s hmotnosťou 80 mg, znázornenú na obr. 38. Zahrievali sme ju zvoleným teplotným programom v atmosfére s obsahom 21 %, 15 %, 10 %, 5 % a 0 % kyslíka. Sledovali sme tiež, ako postupne znižujúce množstvo kyslíka vplyva na veľkostné zloženie jemných částic.

Výsledky sú znázornené pre vybrané teploty 200 °C, 300 °C, 400 °C a 500 °C na obrázku 41. Produkcia jemných částic bola významná pre všetkých päť prípadov až od teploty 150 °C. Pri teplote 200 °C je vidieť, že v inertnej atmosfére čistého dusíka sa veľkostné spektrum blíži viac ku menším částiciam. Inak pri tejto teplote nesledujeme pri porovnaní jednotlivých meraní významný trend.

Pri teplote 300 °C dochádzalo ku najvýraznejšiemu uvoľňovaniu jemných částic, a to v každej z piatich testovaných zložení atmosféry. Nulová prítomnosť kyslíka vykazuje najvýraznejšiu produkciu jemných částic, o niečo menšiu, no v približne rovnakom veľkostnom spektre zaznamenávame pre 10 a 21 % kyslíka. Atmosféra s prítomnosťou kyslíka o množstve 5 a 15 % uvoľňovala pri tejto teplote nižšie koncentrácie částic s mierne väčšou veľkosťou. Formovali sa častice v rozmedzí 100 až 500 nm. Pri teplotách 400 a 500 °C bola produkcia částic opäť nižšia, a so zvyšujúcou teplotou posúvajúca sa ku menším částiciam s veľkosťou 50 až 250 nm. Aj keď je pri týchto meraniach možné sledovať rozdielne

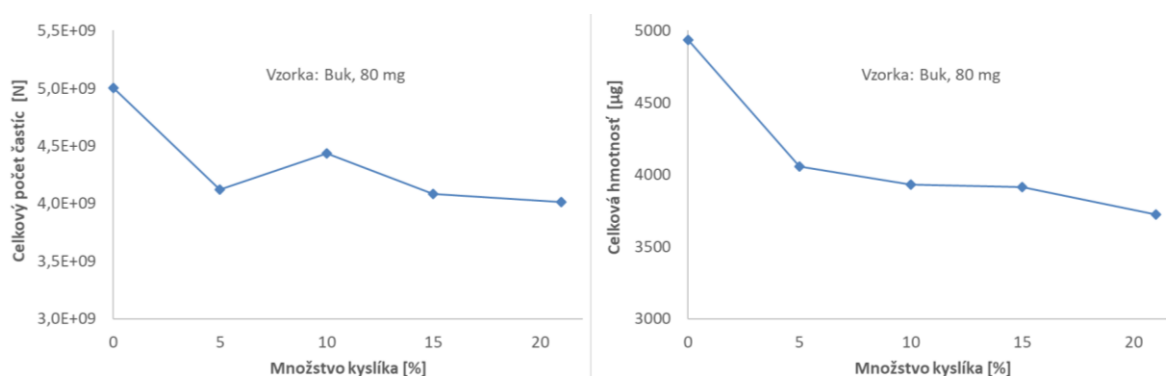


hodnoty počtu vyprodukovaných jemných částic pre rôzne množstvá kyslíka, nie je tu významný trend v zmysle postupného zvyšovania jeho množstva v sledovanej atmosfére.



Obr. 41 Výsledky produkcie jemných částic malej vzorky bukového dreva (S) v atmosfére s rôznym obsahom kyslíka a pre rôzne teploty

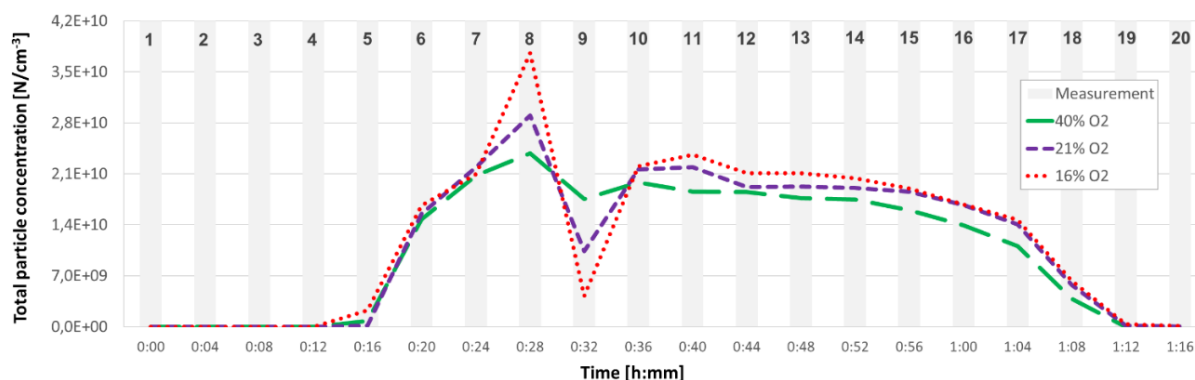
Na základe vyhodnoteného celkového počtu částic jednotlivých meraní, a celkovej hmotnosti vyprodukovaných částic (obr. 42) môžeme sledovať závislosti na množstve prítomného kyslíka. V prípade počtu částic vidíme s rastúcim množstvom kyslíka klesajúci trend množstva jemných částic, s výnimkou prípadu vzorky v atmosfére 10 % kyslíka. Pre celkovú hmotnosť částic však platí, že s rastúcou prítomnosťou kyslíka hmotnosť částic klesá. Súvisí to s vyšším množstvom oxidačných reakcií, ktoré prispievajú ku horeniu, prípadne zmenšovaniu veľkosti produkovaných částic.



Obr. 42 Celkový počet a celková hmotnosť částic zachytených prístrojom počas celej TGA analýzy vzorky, v závislosti na množstve kyslíka pri TGA analýze vzorky buku 80 mg

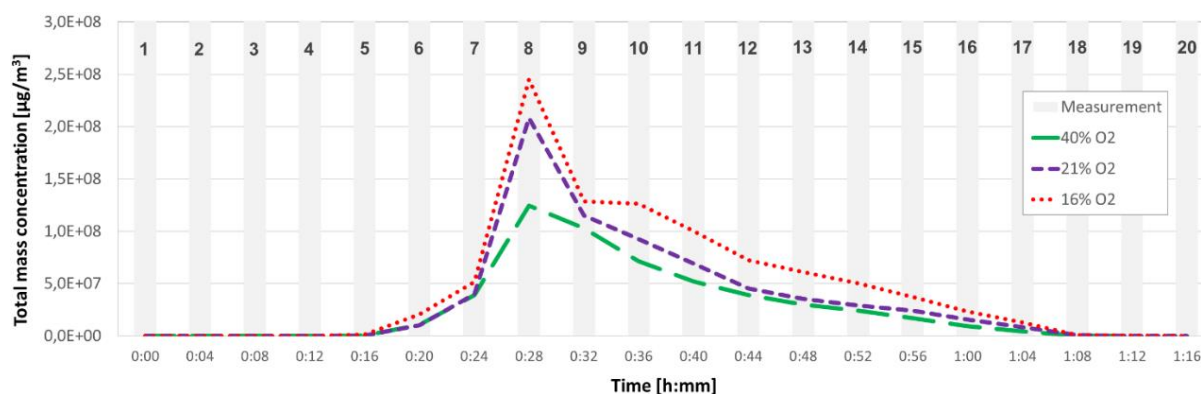
Ďalej bola testovaná iná vzorka dreva s obsahom 34 % lignínu a 49 % celulózy. Sledovaný bol časový priebeh celkovej produkcie jemných částic vo veľkostnom rozsahu 18 – 550 nm v troch rôznych prípadoch zloženia atmosféry – s množstvom kyslíka 16 %, 21 % a 40 %.

Nameraný počet částic je počas jednotlivých meraní ovplyvnený množstvom oxidačných reakcií, ktorých intenzita je úmerná koncentrácii kyslíka v atmosfére. Zatiaľ čo v 28. minúte je v atmosfére so 16 % kyslíka produkcia častíc maximálna, v 32. minúte dochádza ku poklesu vo všetkých troch prípadoch, no najväčšia produkcia častíc je v tomto momente v atmosfére s obsahom kyslíka 40 % (obr 43).



Obr. 43 Závislosť celkovej koncentrácie častíc na čase pri zahrievaní vzorky v atmosfére s rôznym obsahom kyslíka

Hmotnostná koncentrácia ultrajemných častíc pozorovaných v časovom priebehu je znázornená na obrázku 44. Znázornená závislosť ukazuje zníženie hmotnostnej koncentrácie častíc pri zvýšenom obsahu kyslíka v atmosfére v okamihu exotermických reakcií. Z uskutočnených experimentov je teda zrejmé, že zvyšujúci sa obsah kyslíka v atmosfére všeobecne vedie k nižšej produkcii častíc.

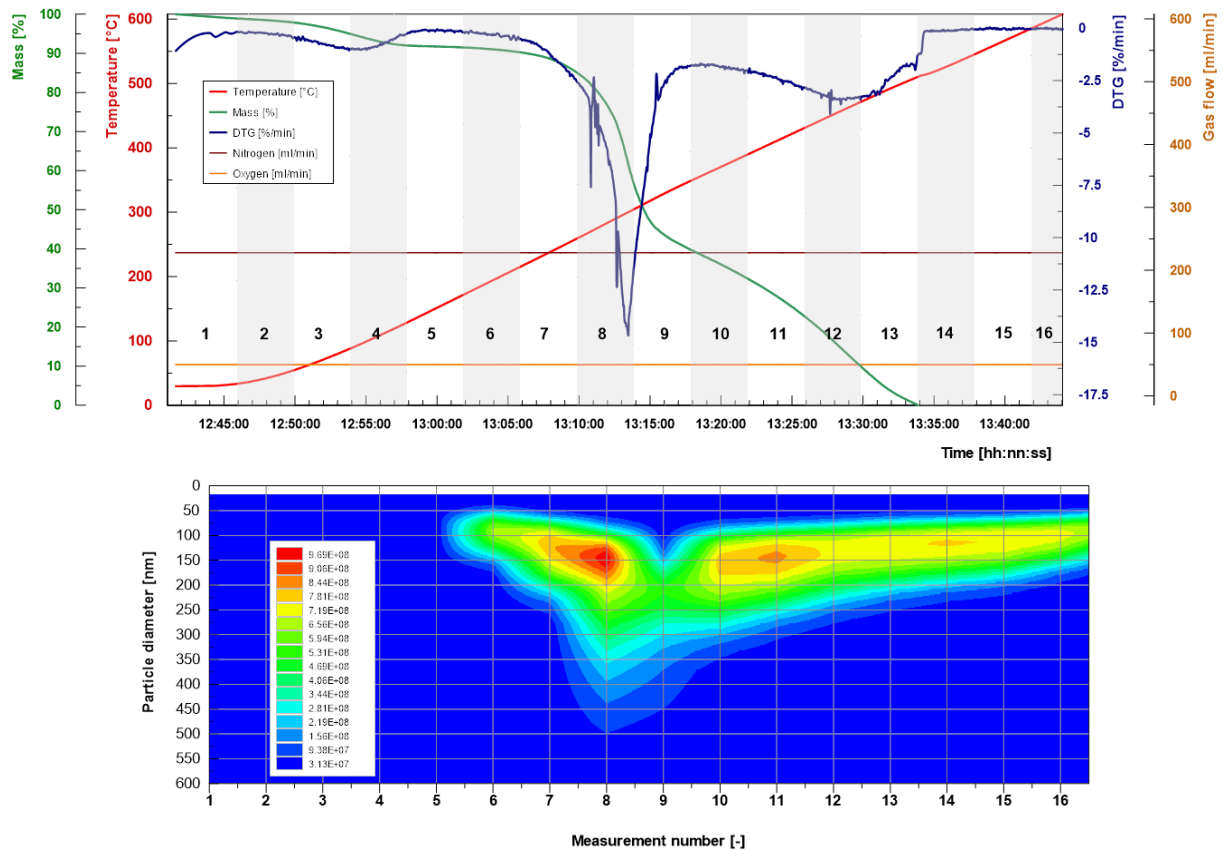


Obr. 44 Závislosť celkovej hmotnostnej koncentrácie častíc na čase pri zahrievaní vzorky v atmosfére s rôznym obsahom kyslíka

### 6.1.2 Vplyv teploty na tvorbu jemných častíc

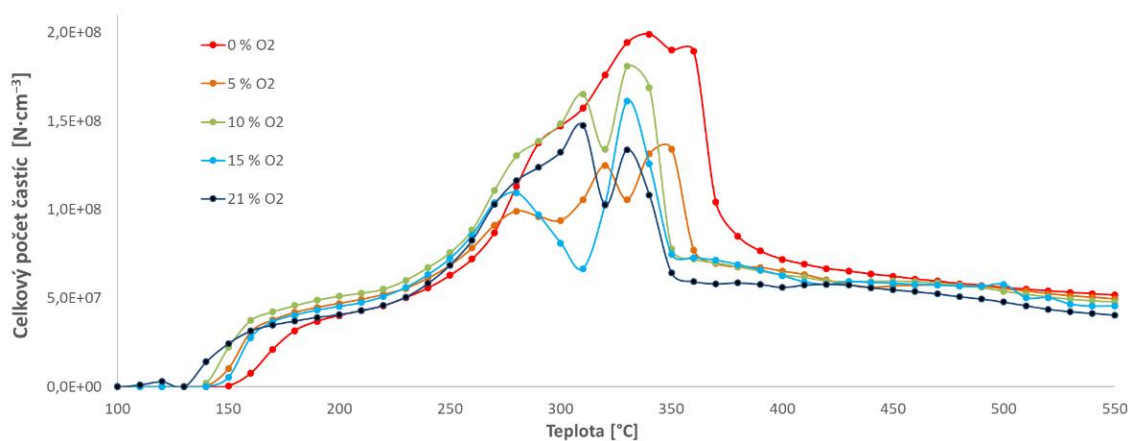
Z predchádzajúcich vyhodnotení okrem iného vyplýva, že v momente, kedy teplota biomasy v TGA prístroji dosiahla približne 250 °C, dochádza ku najintenzívnejšej tvorbe jemných častíc vo väčšine testovaných vzoriek. Dokazuje to aj nižšie zobrazený diagram (obr. 45), kde môžeme vidieť, že práve pri teplote 300 °C došlo ku zahoreniu vzorky dreva v atmosfére s obsahom kyslíka 21%. Moment zahorenia vyplýva z DTG krivky znázorňujúcej intenzitu poklesu hmotnosti v čase.

Prevedené experimenty dokazujú, že existuje istý teplotný rozsah, v ktorom je tvorba jemných častíc intenzívnejšia. Tiež sa ukázalo, že množstvo kyslíka v okolitej atmosfére posúva túto oblasť intenzívnej tvorby jemných častíc smerom ku vyšším teplotám. Môžeme teda konštatovať, že tepelná dekompozícia vzorky biomasy, sprevádzaná uvoľňovaním jemných častíc, prebieha aj pri nedostatku kyslíka.



Obr. 45 TGA krivky a priebeh produkcie častíc pre drevo s obsahom 34 % ligninu a 49 % celulózy. Mass – hmotnosť; Temperature – teplota; Particle diameter – priemer častíc; Gas flow – prúdiaci vzduch; Nitrogen – dusík; Time – čas; Oxygen – kyslík; Measurement number – číslo merania.

Keď sa pozrieme na koncentráciu a veľkosť produkovaných častíc počas zahrievania vzorky, vidíme, že početne bola najväčšia produkcia častíc tesne pred zahorením vzorky – 200 až 300 °C. Veľkosť emitovaných častíc tiež silno súvisí s teplotou vzorky dreva. Maximálna veľkosť emitovaných častíc v sledovanom veľkostnom rozsahu súvisí s prítomnosťou exotermických reakcií.



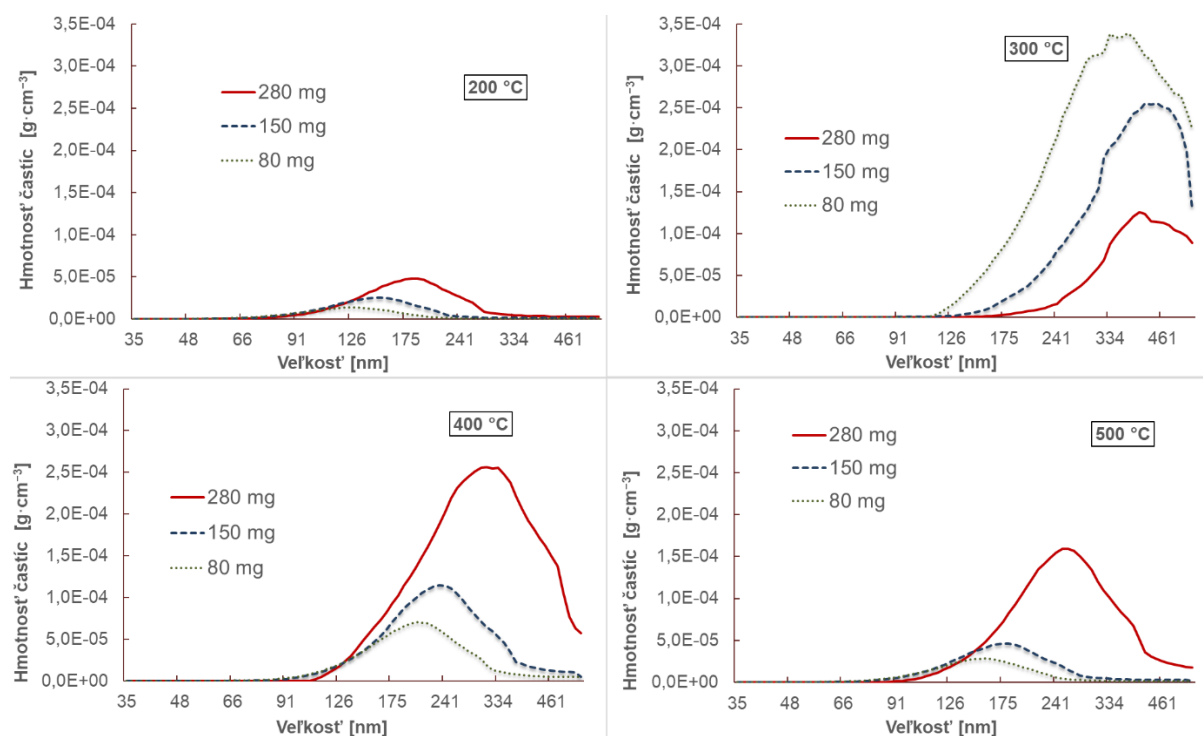
Obr. 46 Závislosť tvorby jemných častíc na teplote pre 80 mg vzorky bukoveho dreva v atmosfére s rôznym obsahom kyslíka

Diagram na obrázku 46 ukazuje množstvo uvoľnených jemných častíc vzorky bukoveho dreva, v závislosti na teplote pri rôznom obsahu kyslíka. V rozmedzí teplôt 250 – 400 °C sa nachádza oblasť najintenzívnejšej tvorby častíc, ktorá je čiastočne závislá aj na obsahu kyslíka v okolitej atmosfére.

### 6.1.3 Vplyv geometrie vzorky a veľkosti povrchu

Ako ďalší faktor bola sledovaná závislosť geometrie vzorky a veľkosti povrchu na tvorbu jemných častíc. Rovnaký materiál – bukové drevo v podobe vzoriek rôznej veľkosti bol zahrievaný pri rovnakých podmienkach vo vzduchu a v inertnej atmosfére dusíka.

Zaujímavosťou je hmotnostná produkcia jemných častíc pozorovaná pri teplote 300 °C. Zatiaľ čo v inertnej atmosfére je ich produkcia úmerná veľkosti vzorky, vo vzduchu je tomu opačne. Tento jav teda súvisí s tvarom a povrchom vzorky. Kým vo vzduchu dochádzalo na najmenšej vzorke (S) ku rýchlemu zahoreniu, už pri teplote 300 °C sme mohli sledovať exotermické reakcie a úbytok hmotnosti. Vyššia produkcia sledovaná na vzorke veľkosti S je tiež spojená s absenciou výrazného poklesu produkcie častíc pri teplote okolo 300 °C.

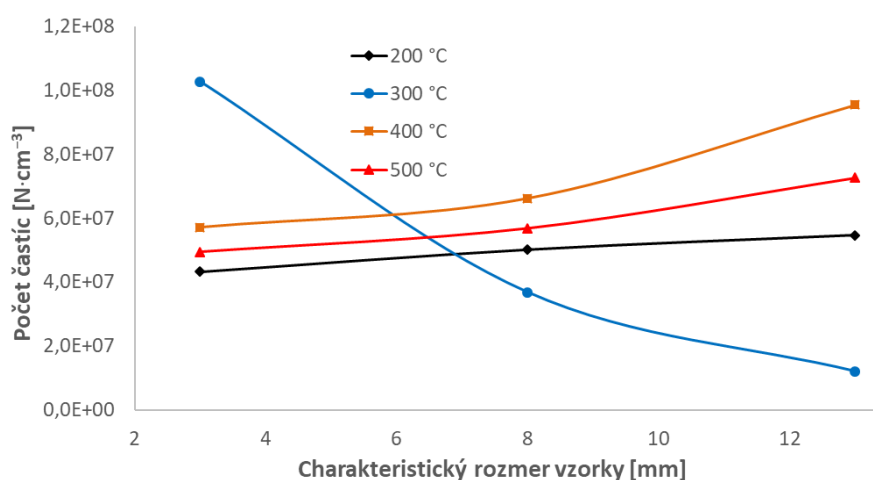


Obr. 47 Porovnanie celkovej hmotnosti meraných jemných častíc pre vzorky L, M a S v atmosfére s obsahom kyslíka 21 % a pri teplotách 200, 300, 400 a 500 °C

Na obrázku 47 sledujeme, že produkcia hmotnosti jemných častíc je závislá na hmotnosti a veľkosti povrchu vzorky, s výnimkou teploty 300 °C. Tento jav súvisí s tým, že práve pri tejto teplote dochádzalo ku najintenzívnejšiemu uvoľňovaniu prchavej horľaviny na najmenšej vzorke. Najpravdepodobnejším je predpoklad, že to je práve z dôvodu jeho malých rozmerov. Kým pri vzorkách väčších rozmerov dochádza ku uvoľneniu prchavej horľaviny a aj ku samotnému horeniu postupne, pri geometricky menších rozmeroch dreva je prehrievanie celej vzorky intenzívnejšie, tým je urýchlený aj celkový proces horenia. Dôkazom toho je TGA krivka zaznamenávajúca percentuálny úbytok hmotnosti v čase. V prospech najmenšej vzorky môže hrať aj fakt, že v malej keramickej nádobke pre vkladanie vzoriek do TGA prístroja boli vďaka jeho rozmerom lepšie podmienky pre prúdenie plynov okolo vzorky v porovnaní s väčšími vzorkami.

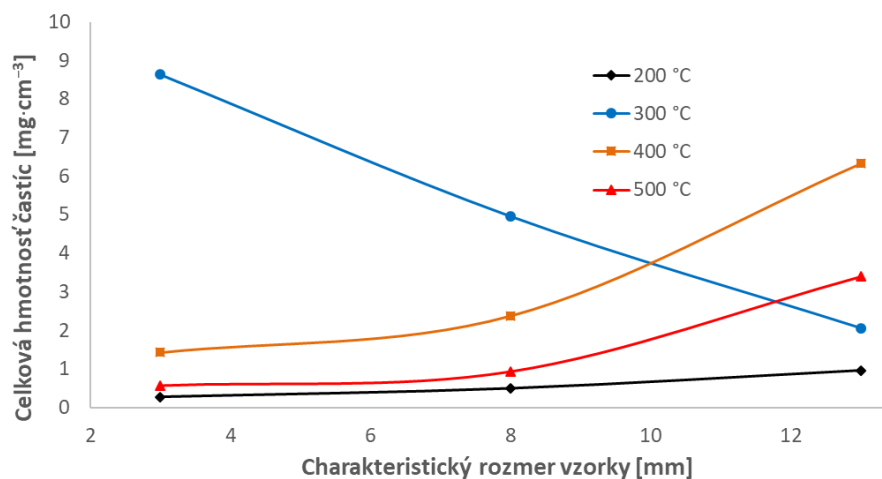
Závislosť uvoľneného počtu častíc na rozmere vzorky pre rôzne teploty je vyjadrená na obrázku 48. Vzorky L, M a S boli rovnakej výšky a hrúbky, no odlišovali sa v šírke (obrázok 38). Práve hrúbku sme určili za charakteristický rozmer, čo bolo pre vzorky S, M a L postupne 3, 8 a 13 milimetrov. Práve

13 mm bol limitný rozmer, ktorý sa podarilo do malej keramickej nádoby termogravimetrického prístroja vložiť.



Obr. 48 Množstvo uvoľnených častíc v závislosti na charakteristickom rozmere vzorky pre rôzne teploty

Z celkového počtu i hmotnosti uvoľnených častíc pri zahrievaní vzorky v termogravimetri teda vidíme, že rozmer má nezanedbateľný vplyv na produkciu častíc. Ďalej, ako je možné vidieť na obrázku 49, pri teplote 500 °C vznikali prevažne menšie častice v nižších koncentráciách. Dobre znázornená je produkcia častíc pri teplote 300 °C. Tu mala produkcia jemných častíc v našich experimentoch klesajúci trend s rastúcim charakteristickým rozmerom vzorky.



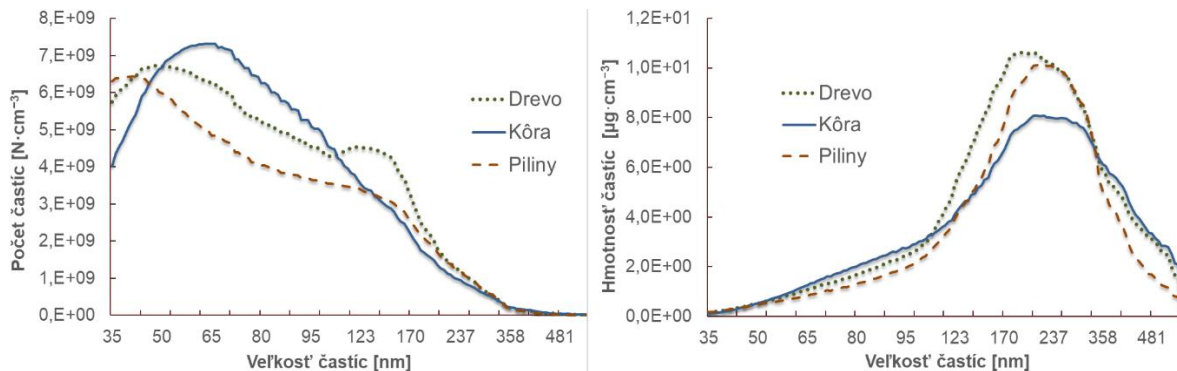
Obr. 49 Celková hmotnosť uvoľnených častíc v závislosti na charakteristickom rozmere vzorky pre rôzne teploty

Môžeme teda konštatovať, že tvar spaľovanej vzorky značne ovplyvňoval produkciu jemných častíc. S rastúcou šírkou (a teda i hmotnosťou) vzorky všeobecne rastie aj produkcia jemných častíc, čo však neplatí v momente uvoľňovania prchavej horľaviny a horenia vzorky, kedy (v našom prípade pri približne 300 °C) je pri rozmermi menšej vzorky proces horenia intenzívnejší a rýchlejší, čo sa prejavuje na produkcii jemných častíc.

Môžeme teda predpokladať, že podobný jav sa dá pozorovať aj pri reálnom spaľovaní v kotle na biomasu, kedy tvar spaľovaného dreva bude ovplyvňovať rýchlosť a intenzitu horenia drevnej hmoty.

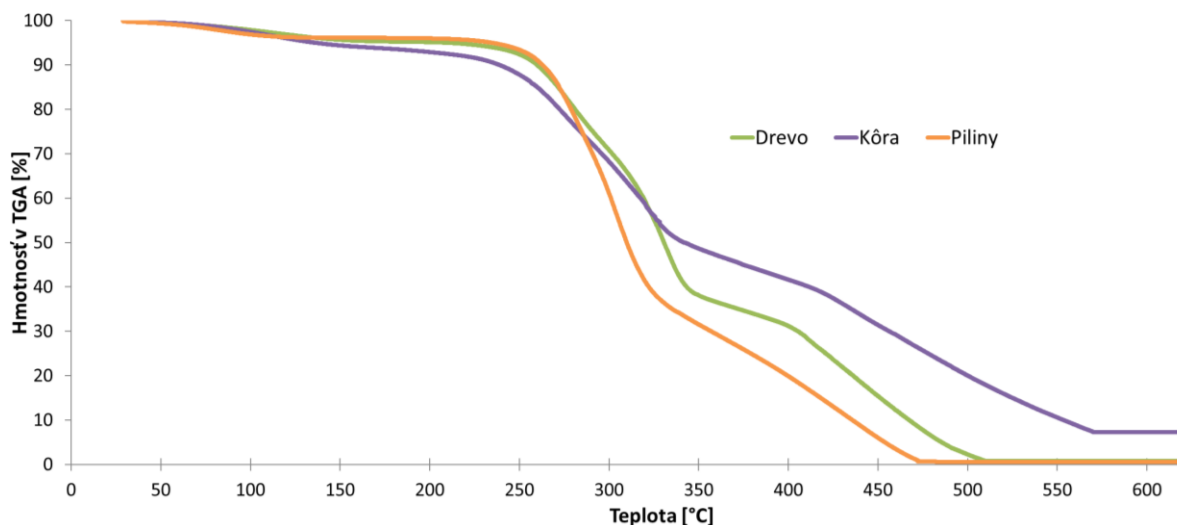
### 6.1.4 Vplyv rôznych vlastností spaľovaného paliva

Nakoniec boli testované tri rôzne druhy materiálu bukového dreva, a to samotné drevo, kôra a drevo vo forme pilín (obrázok 50). Všetky tri druhy vzorky boli rovnakej hmotnosti, a to 80 mg. TG analýza prebehla na rovnakom teplotnom programe pre všetky vzorky. Piliny boli nadrvené na jemno zo stredovej časti bukového odrezku.



Obr. 50 Porovnanie veľkostnej distribúcie pre celkový počet (vľavo) a hmotnosť častíc (vpravo) vzoriek dreva, kôry a pilín analyzovaných v termogravimetri

Z výsledkov početnej a hmotnostnej distribúcie jemných častíc môžeme pozorovať, že kôra produkuje veľké množstvo menších častíc, no hmotnostne bola táto suma častíc v porovnaní s ďalšími testovanými vzorkami najnižšia. Ďalej vidíme, že piliny v porovnaní s drevom produkujú len o niečo menšie množstvo častíc, v takmer totožnom veľkostnom spektre.



Obr. 51 Úbytok hmotnosti jednotlivých materiálov pri TG analýze v závislosti na teplote.

Rýchlosť zahorenia a tuhý nedohorený zvyšok môžeme vyčítať z diagramu na obrázku 51. Tu vidíme, že v prípade pilín, ktoré majú v porovnaní s kusom dreva pri rovnakej hmotnosti veľkú plochu povrchu vďaka sypkej forme, došlo ku dohoreniu najrýchlejšie. Rovnako ako pri dreve, zhorela takmer celá hmotnosť vzorky. Pri kôre bolo horenie pomalším procesom. Po vyhorení zostalo približne 8 % hmotnosti, čo je tuhý zvyšok.

Jasne môžeme vidieť, že rôzny materiál spaľovanej vzorky vplýva na rýchlosť horenia, ako aj na produkciu jemných častíc. Dokonca pozorujeme, že piliny a malá vzorka dreva, kedy išlo o rovnaký

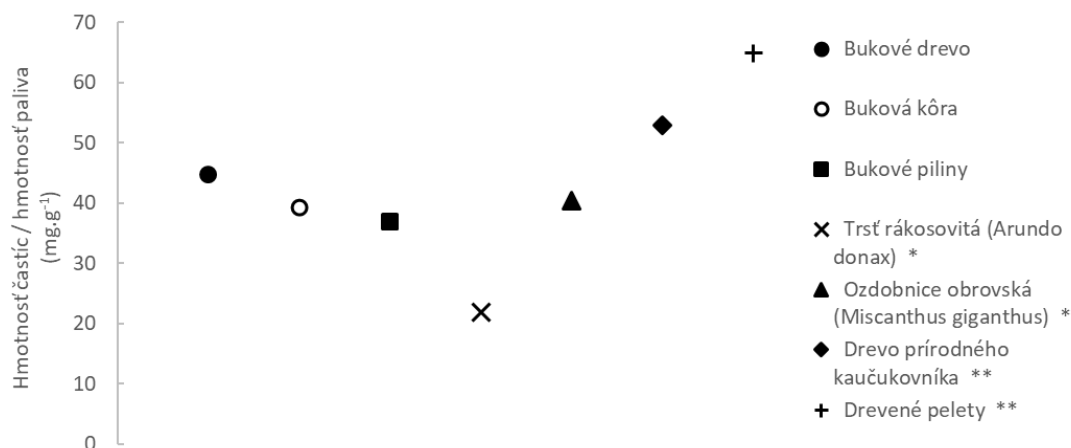
materiál s rovnakou hmotnosťou no v inej forme (sypké piliny verzus celý kus vzorky dreva) horeli inou rýchlosťou a odlišovali sa aj produkciou častíc.

## 6.2 Porovnanie výsledkov s inými autormi

Vybrané výsledky našich laboratórnych experimentov sme porovnali s výsledkami autorov, ktorí sa venovali obdobnému spôsobu zahrievania vzoriek dreva pri termogravimetrickej analýze so sledovaním produkcie jemných častíc, ako sme ich uviedli v rešeršnej časti tejto práce [61], [60]. Z nižšie zobrazenej tabuľky 7 a grafu na obrázku 52 je zrejmé, že hodnoty koncentrácie jemných častíc iných autorov sú rádovo porovnateľné s našimi nameranými výsledkami.

Tab. 7 Porovnanie hmotnosti jemných častíc pri rôznych rýchlostiach ohrevu a pre rozličné vzorky biomasy. Porovnanie našich nameraných výsledkov a výsledkov od iných autorov (\* - Jeguirim a spol; \*\* - Hata a spol) [60], [61].

	Bukové drevo	Buková kôra	Bukové piliny	Trst' rákosovitá (Arundo donax) *	Ozdobnice obrovská (Miscanthus giganteus) *	Drevo prírodného kaučukovníka **	Drevené pelety **
Hmotnosť častíc / hmotnosť paliva (mg.g <sup>-1</sup> )	44,7	39,4	36,9	21,9	40,4	53	65
Hmotnosť vzorky (mg)	80	80	80	20	20	4 - 6	4 - 6
Rýchlosť ohrevu (K.min <sup>-1</sup> )	10	10	10	5	5	10	10
Vlhkosť (%)	6	6	6	8,2	10	43,9	11



Obr. 52 Grafické porovnanie pomeru hmotnosti jemných častíc PM<sub>2,5</sub> a hmotnosti meranej vzorky paliva. Výsledné hodnoty sú porovnaním našich, doposiaľ nameraných výsledkov a výsledkov od rôznych autorov (\* - Jeguirim a spol; \*\* - Hata a spol) [60], [61].

Nami namerané hodnoty pomeru hmotnosti častíc na gram spaľovanej vzorky dokazujú, že sa nachádzame v meraných rozsahoch iných autorov na zahraničných pracoviskách. Prvotné experimenty realizované na termogravimetri nás uisťujú, že nami zvolená metodika merania je vhodná pre ďalšie, neskôr realizované spaľovacie skúšky, ktoré uvádzame v nasledujúcich kapitolách.

## 7 Experimenty na automatických spaľovacích jednotkách

V rámci experimentov s cieľom získať výsledky pre výskum týkajúci sa tejto dizertačnej práce, boli na kotloch vykonané spaľovacie skúšky s odberom vzorky jemných častíc pri rôznych prevádzkových parametroch. Vždy, počas celého spaľovacieho procesu bola prístrojom SMPS sledovaná produkcia jemných častíc a v niektorých prípadoch boli odobraté vzorky častíc na filter a následná analýza mikroskopom.

Tab. 8 Vlastnosti a zloženie palív spaľovaných v automatických kotloch

Druh paliva	Vlhkosť [%]	Množstvo popola [%]	Prchavá horľavina [%]	Spalné teplo [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	Výhrevnosť [MJ·kg <sup>-1</sup> ]	Prvkové zloženie v pôvodnej vzorke [%]				
						N	C	H	S	O
Pelety drevo	9,5	0,3	75,4	18,3	16,7	0,8	48,3	6,1	0	44,5
Agro-pelety	7,5	8,6	68,8	16,9	15,4	0,5	60	6,2	0	29,6
Pelety obilie	9,4	8,6	67,1	16,4	14,9	1,5	42	6,1	0,2	33,9
Pelety repka	9,5	25,5	47,5	14,3	11	2,2	35,7	4,8	0,3	25,1
Piliny	13,53	4,4	76,9	15,6	13,8	0,1	45	6,5	0,1	33,8

Hlavným spaľovacím zariadením určeným pre naše experimenty bol krb s ručným prikladaním, ďalej popísaný v kapitole 8. Experimenty ďalej prebiehali aj na zariadeniach Ekoscroll Alfa, Verner a Gemos, čo sú automatické kotle s kontinuálnym dodávaním paliva. Pri týchto zariadeniach boli však naše merania a odbery jemných častíc súčasťou iných experimentov prebiehajúcich na pracovisku Energetického ústavu, preto nie vždy bolo možné realizovať komplexné meranie s dostatočným množstvom spaľovacích skúšok pri rôznych parametroch. Vlastnosti palív spaľovaných pri spaľovacích skúškach v automatických kotloch sú uvedené v tabuľke 8 a 9.

Tab. 9 Rozmery palív spaľovaných v automatických kotloch

Palivo	Rozmer [mm]
Agro-pelety	7-8
Pelety smrekové	8-10
Pelety repkové	8
Pelety obilné	8
Piliny drevené	-

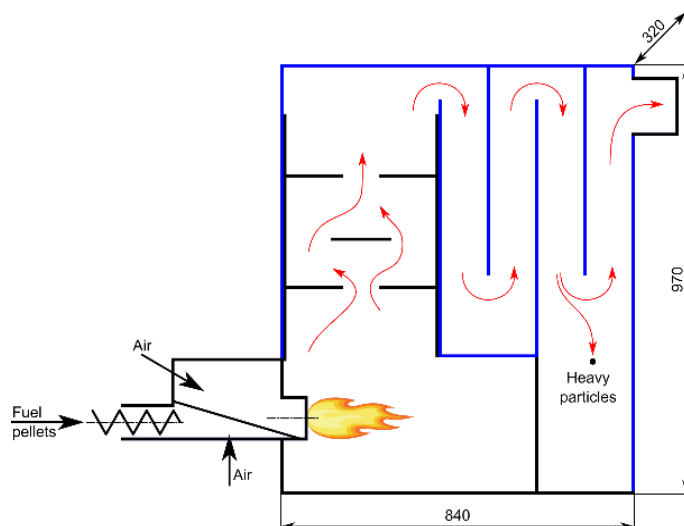
### 7.1 Kotel Ekoscroll Alfa

Ide o automatický kotel 5. emisnej triedy, vyrobený spoločnosťou Ekogalva, s.r.o., spaľujúci uhlie (trieda energetickej účinnosti B) alebo pelety (trieda energetickej účinnosti A +). Je určený pre vykurovanie domácností a malých priestorov. Ku kotlu bol pripojený zásobník paliva o objeme 330 l s automatickým dávkovačom riadeným počítačom. Testovaným palivom boli drevené pelety. Experimentálne spaľovacie zariadenie s odberom spalín je zachytené na nasledujúcom obrázku.

Maximálny výkon tejto spaľovacej jednotky je 25 kW. Kotel však umožňuje regulovať výkon v rozsahu 7,5-25 kW. Účinnosť kotla, ako ju udáva výrobca, je 93,1 %. Kotel má päť-ťahovú konštrukciu so zvislými výmenníkmi, ktoré sú vyrobené z 6 mm hrubého kotlového plechu P265GH. Pelety sa spaľujú v horáku s kontrolovaným množstvom primárneho a sekundárneho prúdu vzduchu. Prúd spalín pri teplote do 1200 °C vychádza z horáka v horizontálnom smere, viď obr. 53. Potom sa tento prúd



spalín otočí a prechádza do vertikálneho kanála, kde dochádza ku doháraniu. Tento kanál je vybavený vnútornými vstavanými elementmi, ktoré významne ovplyvňujú smer prúdenia a miešanie spalín. Vertikálny kanál je nechladený vnútorný priestor kotla. Spaliny potom vstupujú do chladenej časti kotla, kde prenášajú tepelnú energiu studeným plochám prostredníctvom žiarenia a konvekcie. Tieto vnútorné povrchy na výmenu tepla sú chladené vodou.



Obr. 53 Schéma geometrie vnútorného priestoru kotla Ekoscroll [86]

Teplota povrchov pre výmenu tepla je takmer 80 °C. Spaliny na výstupe z kotla majú teplotu 150 -180 °C. Výhoda takejto konštrukcie je, že zvislé výmenníky sa nezanášajú tak intenzívne ako vodorovné výmenníky, čo predpokladá dlhšiu životnosť. Po menších konštrukčných úpravách môže kotol spaľovať aj kusové drevo. Riadiaca jednotka zaisťuje prevádzku kotla a automatické dávkovanie peliet s minimálnymi nárokmi na obsluhu [87].

Tab. 10 Zloženie spalín počas spaľovania v automatickom kotle Ekoscroll pri stabilnej prevádzke

	NO [mg·m <sup>-3</sup> ]	CO [mg·m <sup>-3</sup> ]	O <sub>2</sub> [%]
Agro - pelety	77	63,9	11,3
Pelety smrekové	350	27,3	9,3

Merania jemných častíc na tomto spaľovacom zariadení prebiehali s cieľom posúdiť vplyv rôznych druhov spaľovaných peliet a vplyvu teploty spaľovacej komory a vnútorných plôch kotla na formovanie jemných častíc. Zároveň, počas vybraných spaľovacích skúšok dochádzalo aj ku optimalizácii metodiky odberu spalín na filter pre ich následnú analýzu (rýchlosť odberu na filter 1,5 l na minútu pomocou prístroja CPC). Počas celého spaľovacieho procesu bola sledovaná produkcia jemných častíc.

Výstupom je koncentračná mapa jemných častíc zachytávajúca studený a teplý štart kotla, spoločne so stabilnou prevádzkou. Produkcia a koncentrácia jemných častíc sa menila v závislosti na teplote v spaľovacej komore. Pri štarte vznikalo väčšie množstvo častíc, ako tomu bolo pri stabilnej prevádzke automatického kotla. Boli testované dva druhy paliva: agro-pelety, prevažne z rastliny pohánkovec japonský (*Latinsky: Reynoutria*), a pelety smrekového dreva. Výsledky merania spalín plynovým analyzátorom, počas ustálenej prevádzky sú uvedené v tabuľke 10.



Obr. 54 Kotel Ekoscroll Alfa 28 kW (vľavo) a aparátúra SMPS (vpravo)

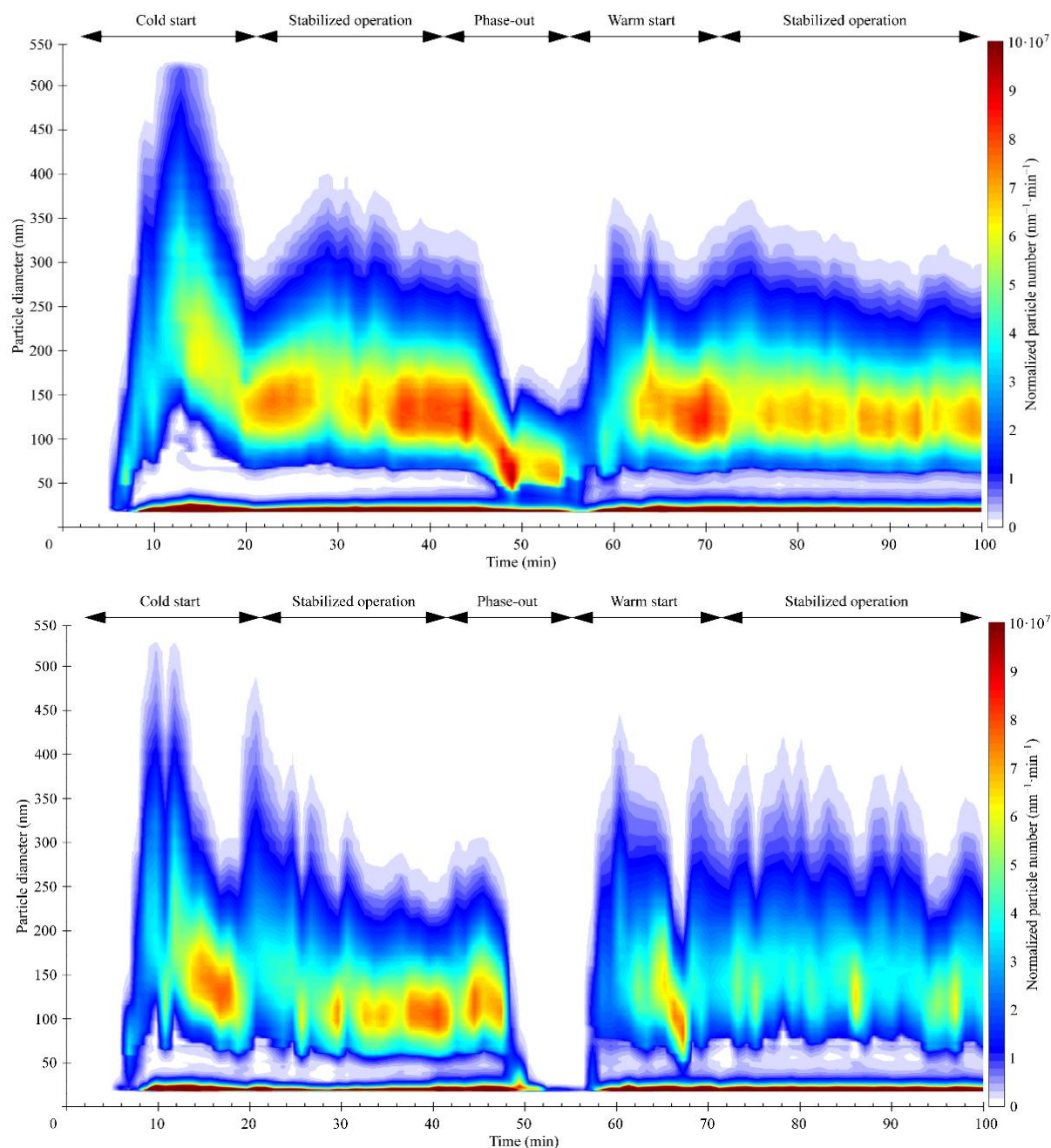
### 7.1.1 Vplyv teploty spaľovacej komory na produkciu jemných častíc.

Kotel bol naštartovaný zo studeného stavu, kedy teplota spaľovacej komory bola rovná teplote okolia. Elektricky vyhrievaný odporový drôt s povrchovou teplotou 390 ° C bol použitý na automatické zapáľovanie peliet počas studeného aj teplého štartu. Kotel sme po studenom štarte nechali v oboch prípadoch bežať 45 minút. Následne bola dodávka paliva na 15 minút odstavená. Pelety nachádzajúce sa v spaľovacej komore dohoreli, a nasledoval teplý štart s dosiahnutím stabilnej prevádzky kotla pri menovitom výkone.

Nameraná koncentrácia a veľkostná distribúcia častíc identifikovaná meracou aparátúrou v priebehu celej testovacej sekvencie prevádzkových stavov je zobrazená na obr. 55. V počiatkových okamihoch studeného štartu je pri oboch palivách pozorovaný vznik menšieho množstva častíc o väčšej veľkosti (až do 530 nm). V prípade spaľovaných agro-peliet sledujeme po štarte okamžité zvýšenie koncentrácie jemných častíc až do veľkosti 550 nm. Po asi 10 minútach sa dostávame ku ustáleniu produkovaných častíc na veľkosti približne 80 – 250 nm.

Nasledovalo odstavenie kotla po prvom, studenom štarte a prerušenie dodávky paliva. Sledujeme výrazný pokles produkovanej veľkosti častíc. Najvýraznejšia koncentrácia bola vo veľkostnom rozsahu 50 až 100 nm. Tiež sledujeme, že aj počas prerušenej dodávky paliva častice naďalej vznikajú. Agro-pelety totiž, aj vďaka svojmu zloženiu, dohárali pomalšie v porovnaní s drevenými smrekovými peletami. Po prerušení dodávky paliva ostala tlejúca časť peliet na horáku produkovať dym. Na meracom prístroji SMPS sme na rozdiel od drevených peliet stále zaznamenávali značné množstvo produkovaných jemných častíc. Ich koncentrácia sa mierne znížila až po uplynutí 10 minút.

Následný teplý štart nevyvolal tak prudký nárast množstva častíc väčších veľkostí, a produkcia bola aj po ustálení takmer konštantná. V priebehu kontinuálneho chodu kotla boli produkované najmä častice v rozmedzí veľkostí 60 až 170 nm.



Obr. 55 Priebeh koncentrácie a veľkostnej distribúcie jemných častíc v spalínach automatického kotle pre agro-pelety(hore) a smrekové pelety (dole). (Cold start – studený start; Stabilized operation – stabilní hoření; Phase-out – dohořívání; Warm start – teplý start; Particle diameter – veľkosť častíc; Time – čas; Normalized particle number – normalizovaný počet častíc).

Pri spaľovaní smrekových peliet monitorujeme v počiatočných okamihoch studeného štartu tvorbu menšieho množstva častíc väčších veľkostí (až do 530 nm). Postupne dochádza k významnému zvýšeniu koncentrácie častíc s veľkosťou 100 až 250 nm. Keď kotol horí dlhšiu dobu pri ustálenom výkone (spaľovacia komora sa zahrieva), dochádza k väčšej produkcii častíc menších veľkostí. Zároveň sa znižuje produkcia najväčších meraných častíc. Počas ustálenej prevádzky kotla sa produkované častice pohybujú prevažne v rozmedzí veľkosti od 60 do 170 nm.

Na konci tohto intervalu došlo k veľmi rýchlemu zníženiu koncentrácie produkovaných častíc a potom sa tvorba častíc skončila. V 58. minúte meracieho sledu bol zahájený „teplý štart“, t. j.

spaľovanie paliva v horúcej spaľovacej komore. Teplota nechladených povrchov blízko horáka bola vyššia ako 200 ° C. Počas intervalu zapaľovania vzrástla veľkosť a koncentrácia produkovaných častíc iba mierne nad úroveň zodpovedajúcu nepretržitej prevádzke kotla. Od 70. minúty sa výroba spaľín stabilizovala na hodnotách približne rovných nepretržitej prevádzke kotla.

Z uvedených výsledkov je teda zrejmý vplyv teploty spaľovacej komory na produkciu jemných častíc. Teplota ovplyvňuje koncentráciu i veľkosť jemných častíc. V studenej spaľovacej komore dochádza ku formovaniu častíc väčších veľkostí. Predpokladáme, že koagulácia je intenzívnejšia a ku väčším veľkostiam prispieva aj kondenzácia častíc, ktorá má pri nižších teplotách lepšie podmienky. Teplý štart kotla ukazuje, že predhriate vnútorné plochy kotla z predchádzajúceho štartu udržiavajú produkciu jemných častíc na konštantnej úrovni, o niečo nižšej, než je tomu pár minút po studenom štarte.

### 7.1.2 Vplyv spaľovaného paliva na produkciu jemných častíc

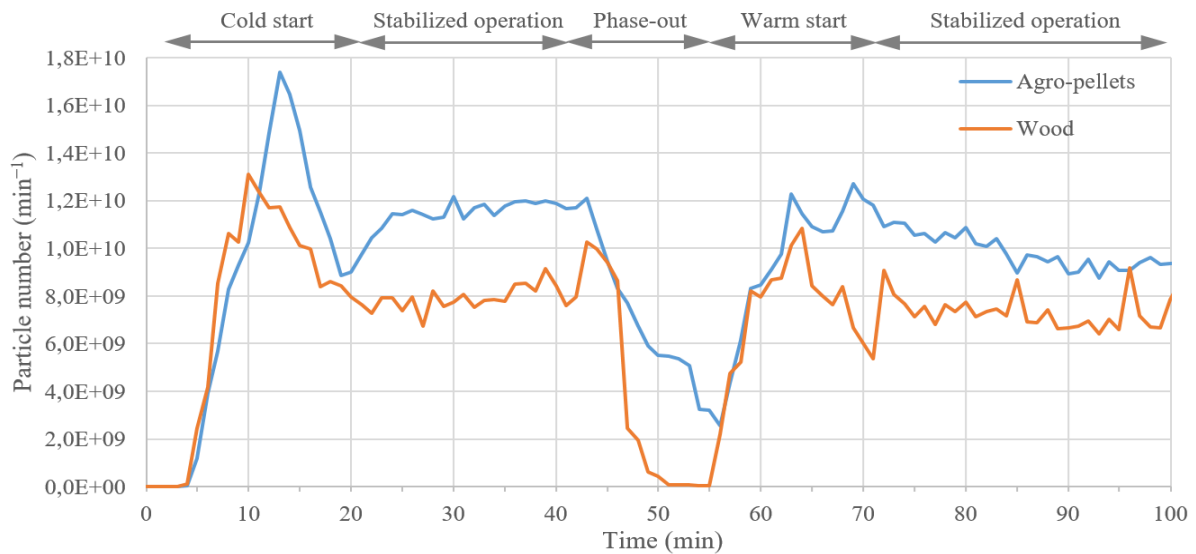
Agro-pelety všeobecne produkujú podstatne väčšie koncentrácie častíc ako spaľovanie smrekových peliet. Väčší počet častíc zároveň vedie k intenzívnejšej koagulácii.

Porovnali sme výsledky experimentov získaných pri spaľovaní oboch typov testovaných palivových peliet. Celkový počet jemných častíc menších ako 550 nm je vyhodnotený na obrázku 56. Ďalej sa porovnával aktívny povrch vytvorených častíc, (obrázok 57). Nakoniec sa porovnala produkcia častíc z hľadiska ich hmotnosti (obrázok 58).

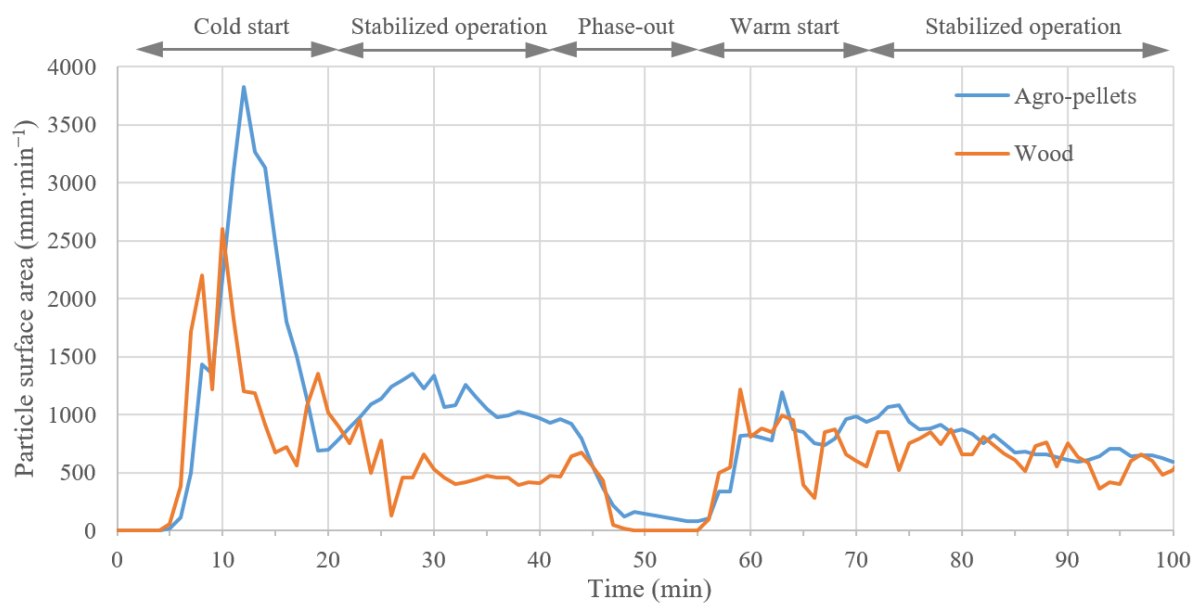
Uvedené závislosti jasne ukazujú, že pri spaľovaní agro-peletiek sa vytvára väčší počet jemných častíc ako pri spaľovaní smrekových peliet za rovnakých prevádzkových podmienok. Tento trend je možné pozorovať pre všetky skúmané prevádzkové podmienky. Pri nízkych teplotách spaľovacej komory sa zistil rozdiel v počte jemných častíc v množstve 45 %. Pri postupnom zahrievaní spaľovacej komory sa rozdiel v počte vyrobených častíc znížil na cca. 22 %.

Obr. 57 ukazuje rozdiel vo veľkosti povrchu častíc produkovaných počas postupnej zmeny prevádzkových teplôt vnútorných plôch kotla pre oba typy testovaného paliva. Výrazne väčší povrch je viditeľný pri časticiach vznikajúcich spaľovaním agro-peletiek, najmä pri studenom štarte. Počas zahrievania spaľovacieho zariadenia bola veľkosť povrchu častíc z agro-peletiek väčšia až o 50 % v porovnaní s časticami zo smrekových peliet. Po zahriatí spaľovacej komory môžeme pozorovať takmer rovnakú veľkosť povrchu jemných častíc generovaných oboma typmi testovaného paliva. Platí to aj pre oblasť teplého štartu. Dokonca, v dôsledku kolísania produkcie častíc je možné pozorovať momenty, kedy spaľovanie smrekových peliet vykazuje väčší povrch častíc, než je tomu u agro-peliet.

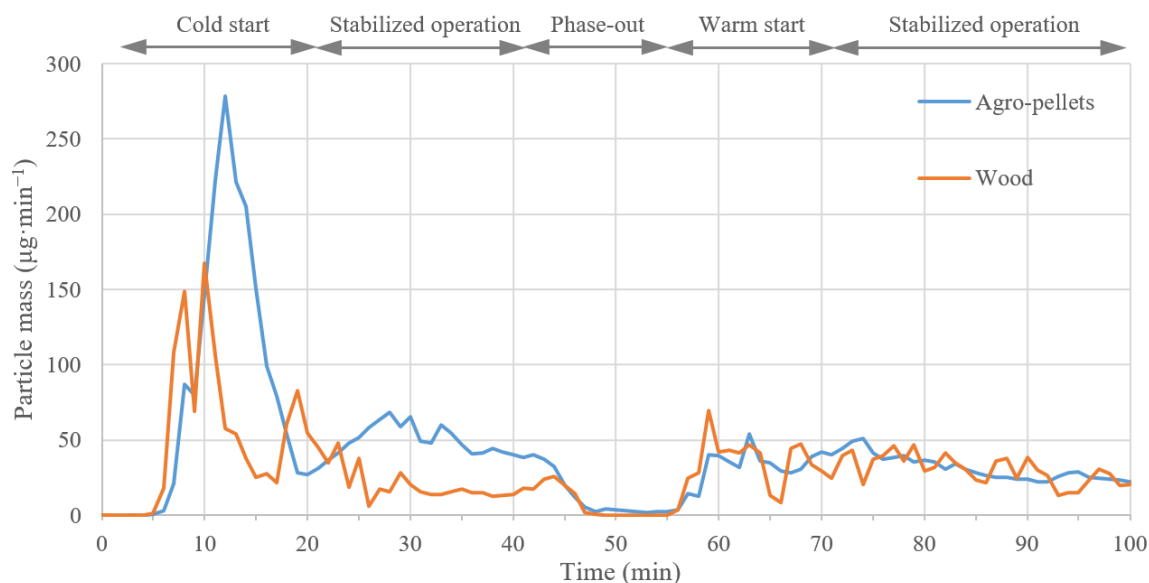
Hmotnostné vyjadrenie častíc produkovaných počas meniacich sa prevádzkových podmienok relatívne dobre koreluje s vývojom povrchovej veľkosti produkovaných častíc (obr. 57). Počas studeného štartu bola zistená maximálna hmotnosť častíc. Agropeliety produkujú až o 48 % väčšiu hmotnosť častíc v porovnaní so smrekovými peletami, a to najvýraznejšie v zahrievacej fáze prevádzky kotla, tesne po studenom štarte. Od teplého štartu je hmotnostná produkcia častíc takmer totožná pre oba typy testovaného paliva. Táto hmotnostná produkcia častíc zostáva takmer konštantná po celú dobu stáleho výkonu horáka v zahriatom kotle.



Obr. 56 Porovnanie celkovej koncentrácie častíc v čase pre agro-pelety (modrá) a smreku (ozn. „Wood“ – oranžová krivka). (Cold start – studený start; Stabilized operation – stabilní hoření; Phase-out – dohořívání; Warm start – teplý start; Particle number – počet častíc; Time – čas)



Obr. 57 Časový vývoj veľkosti povrchu jemných častíc identifikovaných v spalinách počas spaľovania smrekových peliet a agro-peletiek (Cold start – studený start; Stabilized operation – stabilní hoření; Phase-out – dohořívání; Warm start – teplý start; Particle number – počet častíc; Time – čas)



Obr. 58 Časový vývoj celkovej hmotnosti jemných častíc identifikovaných v spalinách počas spaľovania smrekových peliet a agro-pelietiek (Cold start – studený start; Stabilized operation – stabilní hoření; Phase-out – dohořívání; Warm start – teplý start; Particle number – počet častíc; Time – čas)

Ukázalo sa, že agro-pelety produkujú v priemere o 30 % viac častíc počas všetkých testovaných prevádzkových podmienok. Rozdiel je zrejmy najmä v čase studeného štartu, a menej výrazný bol aj počas následnej stabilnej prevádzky horáka. Po zahriatí nechladených povrchov kotla na 200 °C sa znižuje rozdiel medzi spaľovaním smrekových a agro peletiek.



Obr. 59 Spáľované palivo v automatickom kotli Ekoscroll – drevené pelety (vľavo) a agro-pelety (vpravo)

## 7.2 Automatický kotol VERNER A251.1

Teplovodný kotol českého výrobcu Verner je určený na vykurovanie malých priestorov, ako sú napr. rodinné domy. Zásobník paliva má kapacitu až na niekoľko dní prevádzky a môže tak fungovať bez zásahu človeka. Násypka paliva je spojená s kotlom dopravníkom, ktorý dodáva palivo v rôznych intervaloch podľa potreby. Nespáliteľné kusy paliva padajú cez rošt do popolníka. Vzduch, ktorý zaručuje správne spaľovanie, je do spaľovacej komory dodávaný pomocou pretlakového ventilátora.



Obr. 60 Kotel Verner A251.1

Kotel je určený na spaľovanie drevených a rastlinných peliet s priemerom 6 - 14 mm, či prebytkov obilnín, napríklad zrna. Zásobník paliva má objem 240 l. Pohyblivé roštnice umožňujú aj spaľovanie palív s vyššou mierou spekavosti. Popol je následne odvádzaný do 18 litrového popolníka. Primárny i sekundárny vzduch je privádzaný pretlakovým ventilátorom. Spaliny ohrejú vodu určenú na vykurovanie a následne odchádzajú komínom. Chod kotla je automatizovaný mikroprocesorovou jednotkou regulátora, ktorá zaisťuje automatický štart aj odstavenie kotla. Regulátor ovláda elektromotor zaisťujúci chod dopravníka paliva a ventilátor spaľovacieho vzduchu. Tým je ovládaný aj výkon celého kotla, a to na základe teploty vykurovacej vody na výstupe z kotla a teploty spalín pri bežnej prevádzke [88].

Tab. 11 Parametre kotla VERNER A251 [88]

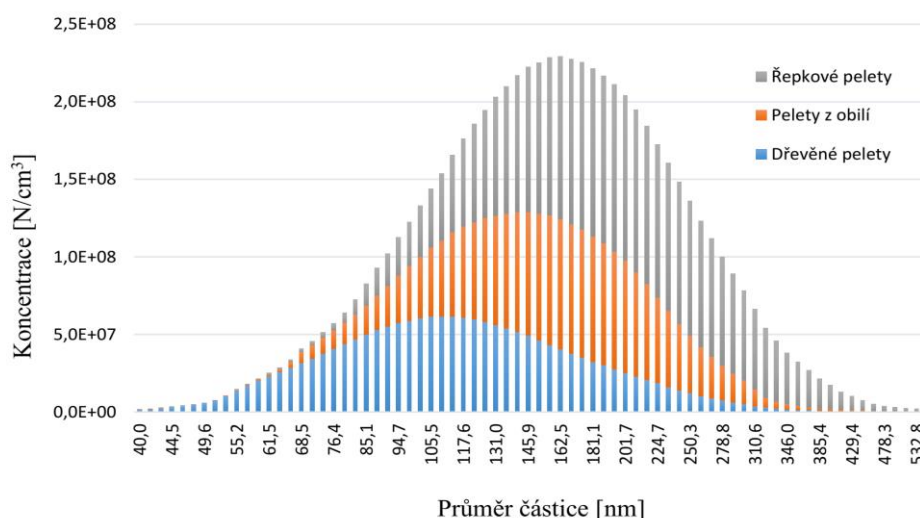
menovitý výkon	25 kW
regulovateľnosť výkonu	7,5 – 28 kW
účinnosť	92 %
spotreba paliva pri menovitom výkone*	5,8 – 6,8 kg·h <sup>-1</sup>
objem vodnej náplne	85 l
objem násypky	240 l
objem popolníku	18 l
teplota spalín na výstupe pri menovitom výkone	160 °C
celková hmotnosť	575 kg
predpísaný prevádzkový ťah komína	15 – 30 Pa
priemerný príkon počas prevádzky	120 W
emisná trieda	3

\* v závislosti na typu paliva

### 7.2.1 Vyhodnotenie vplyvu použitého paliva na tvorbu jemných častíc

Tento kotel bol využitý pre meranie veľkostnej distribúcie jemných častíc v spalinách pre 3 druhy paliva: repkové pelety, drevené pelety a pelety z obilia. Merania pribiehali pri výkone kotla v rozmedzí 28-30 kW a obsahu kyslíka v spalinách okolo 8 %. Po rozhorení kotla a vyhriatí na pracovnú teplotu sme merali každé z palív 22 minút. Horenie prebiehalo pri každom type paliva za rôznej teploty. Meraná bola teplota spalín na výstupe zo spaľovacej komory, z ktorej môžeme predpokladať aj rozdielnu teplotu v spaľovacej komore. V prípade spaľovania drevených peliet to bola najnižšia teplota (228 °C

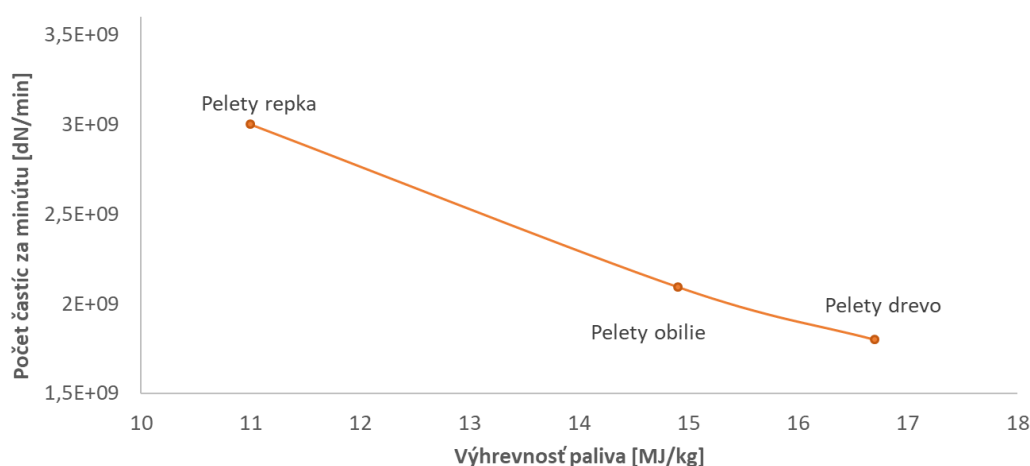
na výstupu z kotla). Zároveň i tvorba částic bola najnižšia. Medzi peletami z obilia a repky bol rozdiel v spaľovacích teplotách iba minimálny.



Obr. 61 Porovnanie priemerných koncentrácií jemných častíc pre rôzne palivá testované na kotle Verner [89]

Obilné pelety, ktoré mali mierne vyššiu spaľovaciu teplotu, mali ďaleko nižšiu koncentráciu častíc ako pelety repkové. Tu sa ukazuje, že počet častíc nebol priamo závislý na teplote spaľovania. Z hľadiska množstva produkovaných častíc hrá v tomto prípade hlavnú rolu materiál paliva. Na obrázku 61 je zobrazené porovnanie priemernej koncentrácie častíc pre uvedené tri druhy spaľovaných peliet.

Pri porovnaní drevených, obilných a repkových peliet z hľadiska koncentrácie teda vyplýva, že spaľovaním repkových peliet vzniká najviac jemných častíc. Naopak, pri peletách z dreva týchto častíc vzniká najmenej a prevažne v menších veľkostiach.

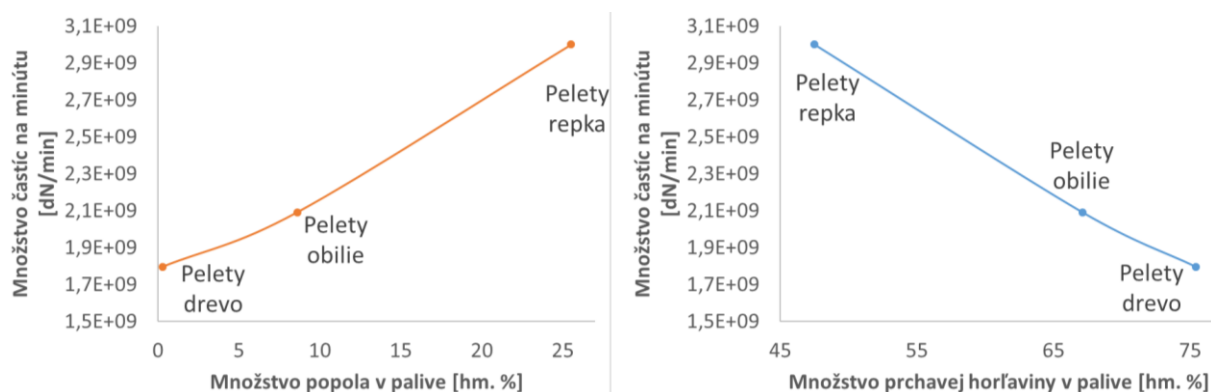


Obr. 62 Závislosť množstva produkovaných častíc za periódu spaľovania na výhrevnosti jednotlivých palív

Ďalším zaujímavým porovnaním je závislosť počtu vyprodukovaných častíc za minútu na výhrevnosti spaľovaného paliva. Počet častíc bol určený ako priemer vzťahnutý na jednu minútu z celkového súčtu detegovaných častíc jedného cyklu (22 minút). Najvyššiu výhrevnosť majú drevené pelety ( $16,7 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) a naopak najnižšiu repkové pelety ( $11 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).



Výhrevnosť teda vypovedá o kvalite paliva, inak povedané o množstve horľaviny v palive. V prípade repkových a obilných peliet sa v palive nachádzajú vo väčšom množstve prvky ako dusík a síra, prípadne ďalšie anorganické látky, o čom svedčí aj množstvo popolniny v palive.



Obr. 63 Závislosť množstva produkovaných častíc na zložkách paliva: popolovina (vľavo) a prchavá horľavina (vpravo)

Z uvedeného vyplýva, že kľúčovým faktorom ovplyvňujúcim množstvo jemných častíc vyprodukovaných pri spaľovaní v automatickom kotle Verner bolo palivo, a jeho vlastnosti, z hľadiska pomeru obsahu popoloviny ku horľavine. Zo skúseností s obsluhou tohto automatického kotla vieme povedať, že pri pohľade do spaľovacej komory dochádza, pri palivách s vyšším obsahom popoloviny, ku „zapekaniu“ na horáku, inak povedané ku zhoršeniu podmienok prúdenia vzduchu a horenia práve z dôvodu nahromadenia väčšieho obsahu popola v blízkosti horáka. Tento faktor, ako aj samotné zloženie paliva, prispieva ku zvyšovaniu produkcie jemných častíc.

### 7.3 Kotel GEMOS 110 kW

Kotel Gemos je spaľovacie zariadenie zložené z teplovodného kotla, doplneného dohorievacou komorou. V ňom je systém štrbín, ktoré umožňujú prívod a distribúciu vzduchu pre splyňovanie. Sekundárny vzduch je privádzaný do trysiek, ktoré sa nachádzajú v otvore pre vývod spalín zo spaľovacej komory. Ten vstupuje do dohorievacej komory. Celý systém je doplnený zásobníkom paliva s automatickým podávačom. Kotel spaľuje prevažne biomasu, konkrétne piliny.

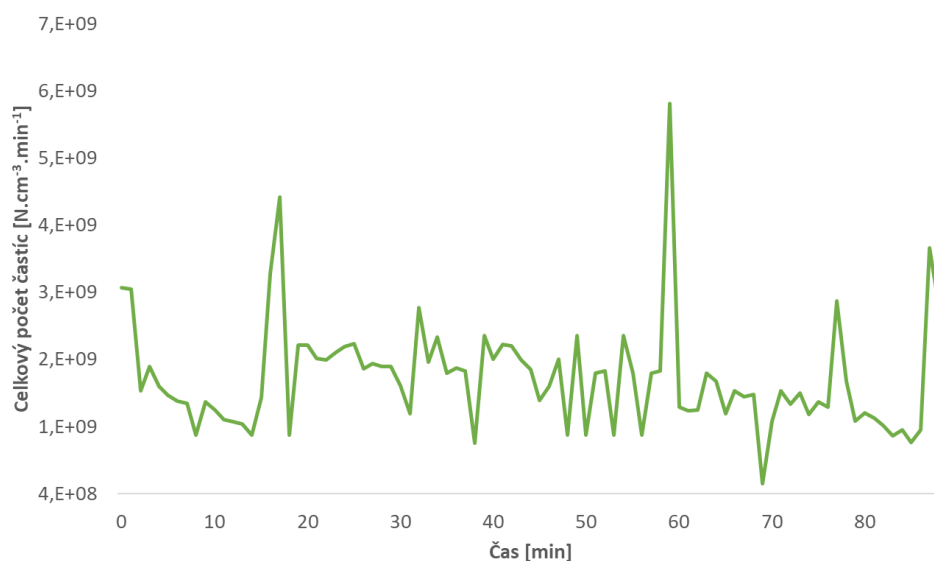
Toto jedinečné spaľovacie zariadenie bolo v prevádzke práve v čase, kedy sme potrebovali zdroj jemných častíc pre doladenie metodiky odberu jemných častíc prístrojom SMPS, a rovnako pre odber častíc na polykarbonátové filtre pre analýzu SEM.

Výkon samotného kotla je 110 kW. Toto spaľovacie zariadenie patrí do 3. emisnej triedy. Splyňovacia komora je tvorená oceľovou konštrukciou sa šamotovým obložením. Vnútro splyňovacej komory je tvorené šikmým schodovitým roštom a vodorovným roštom. Na šikmý rošt je privádzané palivo automaticky zo zásobníka. Vplyvom gravitácie sa palivo posúva smerom nadol, pri vysokej teplote sa vysúša a zároveň horí. Hneď za šikmým roštom sa nachádza vodorovný rošt. Do kotla je privádzaný primárny vzduch pod rošt a sekundárny vzduch do ohniska. Pod roštom je zásobník popola.



Obr. 64 Kotel Gemos s dohorievacou komorou

Pri spaľovaní testovaného paliva, konkrétne drevených pilín (vlhkosť 13,4 %), dochádzalo pri odbere spalín čiastočne ku ich kondenzácii v odberovej trati. Výsledky odobraných vzoriek pre SEM analýzu sú uvedené v kapitole 9.3. SMPS prístroj zaznamenal početnú koncentráciu jemných častíc v spalínach. Počas odberu dochádzalo ku zanášaniam impaktora a trysky umiestnených pred vstupom do zariadenia SMPS. Bolo potrebné ich čistenie v približne 5-minútových intervaloch. Napriek tomu sa nám podarilo zrealizovať viac ako hodinový kontinuálny odber spalín pre analýzu častíc PM<sub>1</sub>.

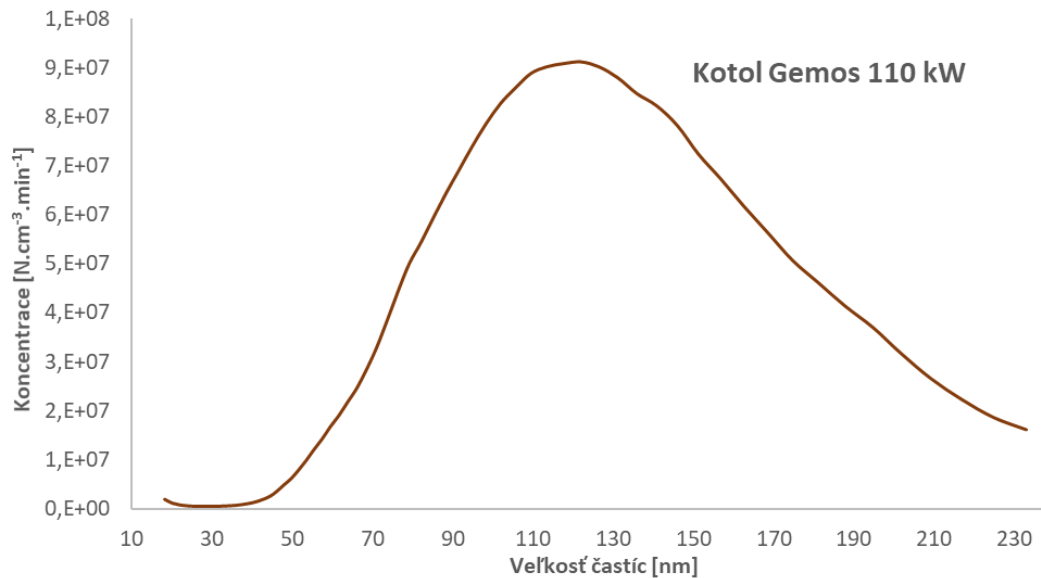


Obr. 65 Koncentrácia jemných častíc v meranom veľkostnom rozsahu zaznamenaná na spaľovacom zariadení Gemos

Na obrázku 65 je zobrazený priebeh celkového počtu nameraných častíc prístrojom SMPS v čase. Priemerná hodnota koncentrácie je  $1,5 \cdot 10^9$  častíc. Pozorujeme mierne fluktuácie počtu zaznamenaných častíc. Spomedzi meraných automatických kotlov sme na tomto spaľovacom zariadení zaznamenali najvyššie hodnoty jemných častíc na cm<sup>3</sup> meraných spalín. Vzhľadom ku vysokému výkonu spomínaného kotla bola však taká hodnota očakávaná.

Sledujeme tiež vyššie hodnoty celkovej produkcie jemných častíc na začiatku merania, čo súvisí so studeným štartom kotla. Tu sme tiež zaznamenali výrazný vrchol pri prepočítaní na hmotnosť častíc. Postupne, s ohrievaním spaľovacej komory sa začína tvoriť väčšie množstvo menších častíc, pričom

v niektorých momentoch bola nameraná hodnota počtu častíc výrazne vyššia, než na začiatku merania pri studenom štarte. Ide však o veľké množstvo malých častíc s veľkosťou do 100 nm.



Obr. 66 Priemerná veľkostná distribúcia počas jednej minúty sledovaná v spalínách kotla Gemos

Krivka veľkostnej distribúcie na obrázku 66 vyjadruje minútovú priemernú nameranú produkciu jemných častíc. Vrchol krivky s hodnotou koncentrácie jemných častíc  $9 \cdot 10^7$  pozorujeme pri veľkosti častíc 120 nm. Veľkostná produkcia jemných častíc súvisí so spôsobom dohárania prchavej horľaviny v kotle Gemos, ako aj s teplotami povrchov vo vnútri spaľovacej komory. Počas merania na tomto kotle boli zachytávané jemné častice na filter s následnou analýzou mikroskopom SEM. Výsledné fotografie, ako aj chemické zloženie zachytených častíc sú uvedené v kapitole 8.3.

## 8 Experimenty na krbe s ručným prikladaním

Väčšina spaľovacích testov, s cieľom experimentálne stanoviť vplyv spaľovacích parametrov na tvorbu jemných častíc, prebiehala na spaľovacom zariadení - krbové kachle s ručným prikladaním paliva, od českého výrobcu ABX, model Grönland, špeciálne upraveného pre experimentálne účely. V tomto zariadení bolo spaľované palivo rôzneho druhu, a zároveň boli menené podmienky spaľovania, ako je ťah komína, množstvo vzduchu, teplota v spaľovacej komore, tvar a množstvo paliva.

V krbe s ručným prikladaním bolo spaľované kusové drevo. Hlavným palivom, na testovanie väčšiny parametrov, bolo bukové a smrekové drevo (tabuľka 12). V rámci spaľovacích skúšok prebehlo okrem monitorovania veľkostnej distribúcie jemných častíc aj sledovanie ďalších parametrov potrebných pre vyhodnotenie spaľovacieho procesu, ako napríklad meranie teploty, analýza zloženia plynov v spalinách a podobne. V tejto kapitole sú zhrnuté výsledky meraní jednotlivých experimentov.

Tab. 12 Vlastnosti rôznych druhov kusového dreva spaľovaného v krbe s ručným prikladaním

Palivo	Obsah vody [%]	Hustota [kg·m <sup>-3</sup> ]	Lignín [%]	Holocelulóza [%]	α-celulóza [%]	Výťažky [%]
drevo bukové	6,1	730	20	78	50	2
drevo smrekové	8,2	460	24	70	45	3

### 8.1 Popis spaľovacieho zariadenia

Toto zariadenie je konštruované primárne pre spaľovanie dreva alebo hnedouhoľných brieket. Krb má dvojplášťovú konštrukciu a možnosť centrálného privádzania externého vzduchu. Spaľovanie prebieha v komore ohraničenej sklom z prednej strany a opláštením doskami z vermikulitu z ostatných strán. Krb tiež disponuje prívodom terciárneho vzduchu zo zadnej strany cez 6 malých otvorov. Základné parametre sú popísané v tabuľke 13.

Tab. 13 Základné parametre krbu ABX Grönland [90]

Účinnosť	84 %
Objem vykurovania	60-160 m <sup>3</sup>
Spotreba paliva	2.00 kg·hod <sup>-1</sup>
Hmotnosť	170.00 Kg
Šírka	503 mm
Výška	1025 mm
Hĺbka	430 mm
Výkon	6.0 kW
Priemer spalinovodu	150 mm
Terciárny vzduch	áno
Šírka spaľovacej komory	380 mm
Teplota spalín na výstupe z ohniska	223 °C

Odvod spalin krbu ABX Grönland zabezpečoval asi 4 metre vysoký spalinovod, ústiaci nad halou C3 areálu FSI, kde má svoje laboratória energetický ústav a kde prebiehali merania. Výška komína má za následok aj pomerne vysoký komínový ťah, preto z dôvodu regulácie ťahu komína bola v hornej časti nainštalovaná komínová klapka. Tá zabezpečuje reguláciu ťahu. V normálnych podmienkach spaľovania je pre krb ideálny ťah okolo 12 Pa. Práve hodnotu 12 Pa uvádza aj norma pre spaľovacie zariadenia tejto výkonnostnej kategórie [64]. Ťah bol meraný pomocou kvapalinového ťahomeru KIMO TX 25. Zároveň elektronicky, pomocou senzoru diferenciálneho tlaku Sensirion SDP610-500Pa. Senzor má rozsah 500 Pa a citlivosť 0,1 Pa [91]. Tento senzor nám umožňoval kontinuálne zaznamenávať tlak v komíne pomocou pripojeného notebooku, čo sme mohli využiť pri následnom spracovaní výsledkov.



Obr. 67 Krb ABX Grönland a odbery vzorky spalin pre SMPS prístroj a analýzu plynov

V prúde spalin bolo nainštalovaných niekoľko otvorov pre teplotné čidlá a odbery vzorky spalin. Priamo nad ústím z krbu boli v spalinovode 3 otvory, z toho jeden bol využitý pre zavedenie dvoch termočlánkov sledujúcich teplotu v hornej časti krbu. Meter nad krbom bola v spalinovode vyhotovená príruha s ďalšími odberovými otvormi. Vychádzali sme z normy ČSN EN 13229 „Vestavné spotřebiče k vytápění a krbové vložky na pevná paliva - Požadavky a zkušební metody“.

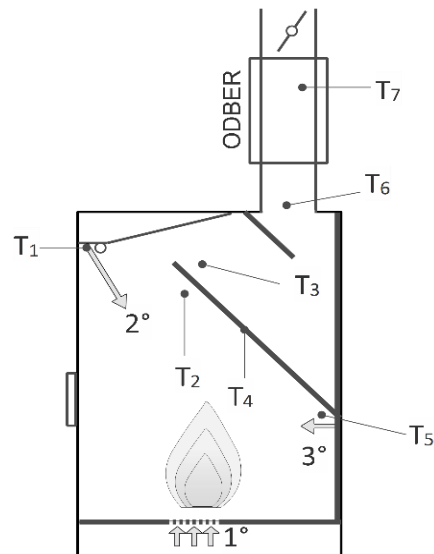
### 8.1.1 Meranie teploty v ohnisku a v spalinovode

Spaľovacie zariadenie bolo doplnené termočlánkami v spaľovacej komore, na plášti a v prúde spalin pre sledovanie teplôt. Kvôli dosahovaným teplotám až okolo 1000 ° C, boli použité vysoko odolné Super OMEGACLAD™ XL termočlánky typu K, ktoré merajú do teploty 1335 ° C [92].

Termočlánky boli umiestnené v spaľovacom zariadení na významných miestach, ako je znázornené na obrázku 69. Meraná bola teplota sekundárneho vzduchu ( $T_1$ ), ktorý je privádzaný z hornej a dolnej prednej časti a slúži aj na oplach skla počas spaľovania. Ďalej teplota v ohnisku pod vermikulitovou doskou ( $T_2$ ) a nad touto doskou ( $T_3$ ), rovnako ako uprostred dosky ( $T_4$ ). Sledovali sme

aj teplotu terciárneho vzduchu ( $T_5$ ). Ďalej bola pre nás kľúčová teplota na výstupe z krbu ( $T_6$ ) a teplota v mieste odberu spalín ( $T_7$ ). Celkovo bolo spaľovacie zariadenie osadené 16 termočlánkami.

Termočlánky boli zavedené do meracej ústredne National Instruments, ktorá bola prepojená s počítačom ethernet káblom. V počítači bežala naprogramovaná aplikácia v prostredí LabVIEW vizualizujúca online meranie teplôt.



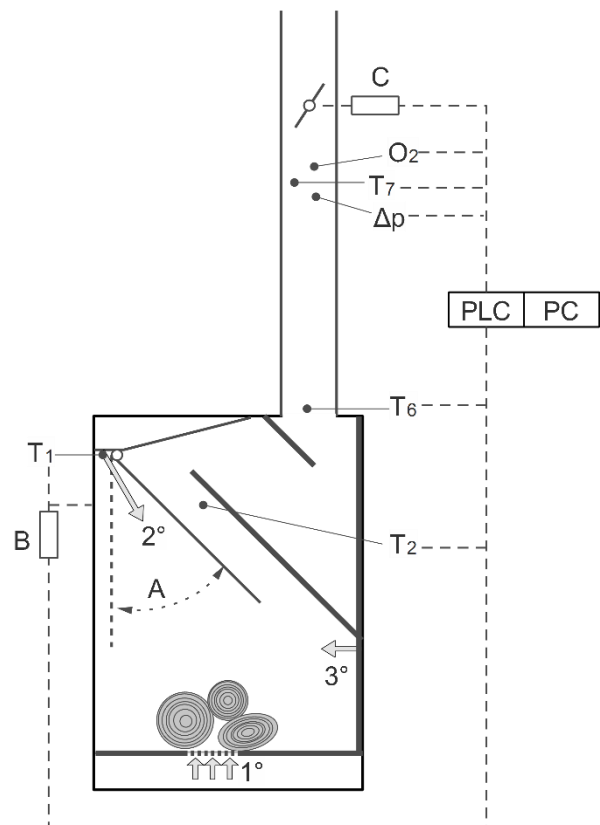
Obr. 68 Umiestnenie termočlánkov v kotle Grönland. Pohľad z boku.

### 8.1.2 Regulačné prvky pre ovládanie spaľovacieho procesu

V rámci projektu TAČR Zéta TA ČR TJ01000331 s názvom „Redukce koncentrace jemných částic ve spalinách malých zdrojů s využitím aktivní teplotní stabilizace“, ktorý prebiehal v rokoch 2018 a 2019, prebiehali na krbe spaľovacie skúšky s cieľom vytvoriť funkčný vzor zabezpečujúci spaľovaciemu procesu aktívnu teplotnú stabilizáciu pre minimalizáciu tvorby jemných častíc v spalinách. Súčasťou riešenia projektu bolo pridanie niekoľkých regulačných prvkov, pomocou ktorých sme ovládali množstvo spaľovacieho vzduchu, ťah komína a prúdenie v spaľovacej komore. Ako je znázornené na schéme (obr. 70), krb bol osadené nasledujúcimi regulačnými prvkami:

#### A) Vstavaná doska pre reguláciu prúdenia v ohnisku:

Ide o vnútorný doplnok ovplyvňujúci sálavý tok tepelnej energie čelnou presklenou plochou a ovplyvňujúci prúdenie spalín v spaľovacej komore. Je zhotovený z oceľového plechu a umožňuje nastavenie do dvoch krajných polôh. Ovládanie je realizované na základe meraných teplôt v spalinách. Vyhodnotením priebehu teplôt, umožňuje identifikovať fázy horenia, ktorým je poloha vstavaného plechu prispôsobená. Na začiatku prvej fázy, zvislá poloha zabudovania prispieva k rýchlejšiemu prehriatiu spaľovacej komory. Následne po dosiahnutí požadovanej teploty spalín je



Obr. 69 Schéma regulačných prvkov na experimentálnom spaľovacom zariadení: A – vstavaná regulovateľná doska; B – ovládanie prívodu sekundárneho vzduchu; C – ovládanie komínovej klapky.

tento doplnok nastavený do šikmej polohy, čím dochádza k predĺženiu trajektórie spalín opúšťajúcich spaľovaciu komoru. Spaliny prechádzajú kanálom vytvoreným pri stropе spaľovacej komory, kde vstavba predstavuje stenu emitujúcu významný tepelný tok, a tým zaisťuje vysokú teplotu v kanáli na dohorenie spalín. Geometria kanála je volená tak, aby dochádzalo k významne turbulentnému prúdeniu a premiešaniu horľavej frakcie so vzduchom distribuovaným otvormi sekundárneho a terciárneho vzduchu.

### B) Ovládanie prívodu sekundárneho vzduchu:



Obr. 70 Lineárny motor pre ovládanie množstva privádzaného sekundárneho vzduchu

Ďalším prvkom je riadenie množstva privedeného sekundárneho vzduchu pomocou lineárneho servomotora na základe teploty  $T_2$  a  $T_6$  (obr 71) a identifikovanej fázy horenia. V algoritme riadenia je preferované použitie terciárneho vzduchu. Sekundárny vzduch je distribuovaný v prípade potreby podporenia spaľovacieho procesu a zvýšenia teploty v priestore spaľovacej komory. Sekundárny vzduch je predhriaty na 300 až 400 °C (v závislosti na fáze spaľovacieho cyklu) vďaka tomu, že vstupuje do ohniska z intenzívne vyhrievaného priestoru nad spaľovacou komorou.

### C) Ovládanie komínovej klapky

Komínová klapka je ovládaná servomotorom na základe veľkosti podtlaku v komíne ( $\Delta p$ ) a množstva kyslíka v spalínach ( $O_2$ ). V prípade identifikácie zníženia koncentrácie kyslíka v spalínach pod požadovanú hranicu dochádza k otváraní komínovej klapky. Tým sa zvyšuje množstvo sekundárneho a terciárneho spaľovacieho vzduchu vstupujúceho do ohniska. V prípade nárastu koncentrácie kyslíka v spalínach nad požadovanú hranicu, je komínová klapka privretá.

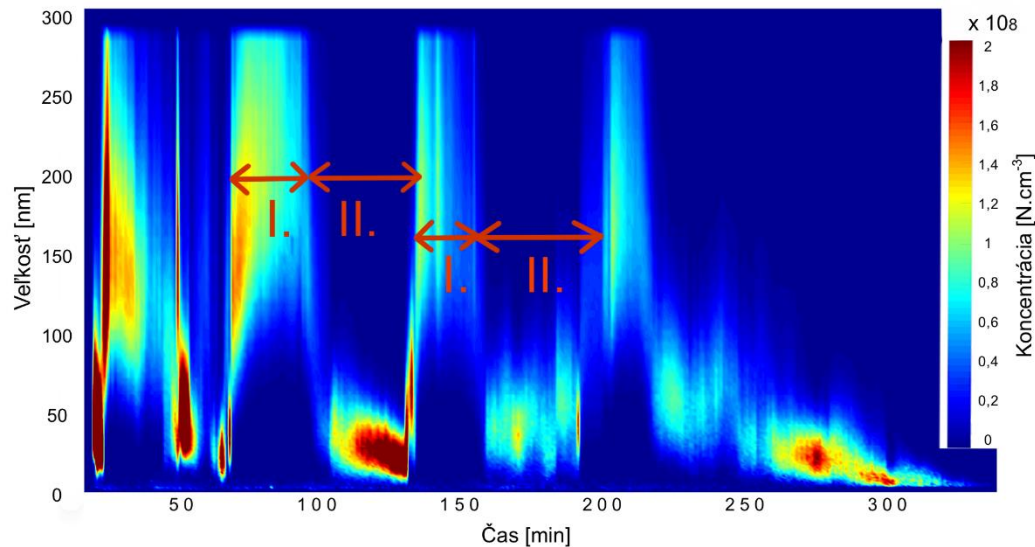
## 8.2 Fázy horenia a spaľovacie cykly

Spaľovanie v krbe prebiehalo po nastavení meracej aparatúry, vyčistení spaľovacej komory a kontrole funkčnosti celej meracej trate. Pre zápal bolo priložené 2,5 kg menších kusov dreva a pre urýchlenie iniciácie horenia bol približne po dobu 2 minút využitý plynový horák s fľašou propán-butánu.

Po zápale a vyhorení prvej dávky paliva sme priložili približne 2 kg dreva. To slúžilo pre vyhriatie spaľovacej komory na pracovnú teplotu. V prípade, že sme testovali studený štart a vplyv teploty spaľovacej komory na produkciu častíc, zaujímali nás údaje aj zo zápalu a následného priloženia. V ostatných prípadoch bolo cieľom vyhriať krb na prevádzkovú teplotu, aby sa mohli testovať ďalšie parametre spaľovacieho procesu ideálne pri rovnakých podmienkach.

Každé priloženie paliva, až po jeho dohorenie viditeľným plameňom nazývame cyklus horenia. Začiatok nového cyklu je ovplyvnený predchádzajúcim cyklom tým, že priložené drevo sa rozhorí vďaka tlejúcim uhlíkom z predchádzajúceho cyklu. Príkladanie je teda dosiahnuté spôsobom, ako je tomu

v běžnej praxi. Tieto samotné uhlíky (pahreba) produkujú jemné častice v približne o dva až tri rády nižších koncentráciách, ako je produkcia pri horení viditeľným plameňom. Preto považujeme ovplyvnenie merania častíc predchádzajúcim cyklom za zanedbateľné. Zároveň teplo a pahreba predchádzajúceho cyklu slúži na plynulé zapálenie priloženého dreva.

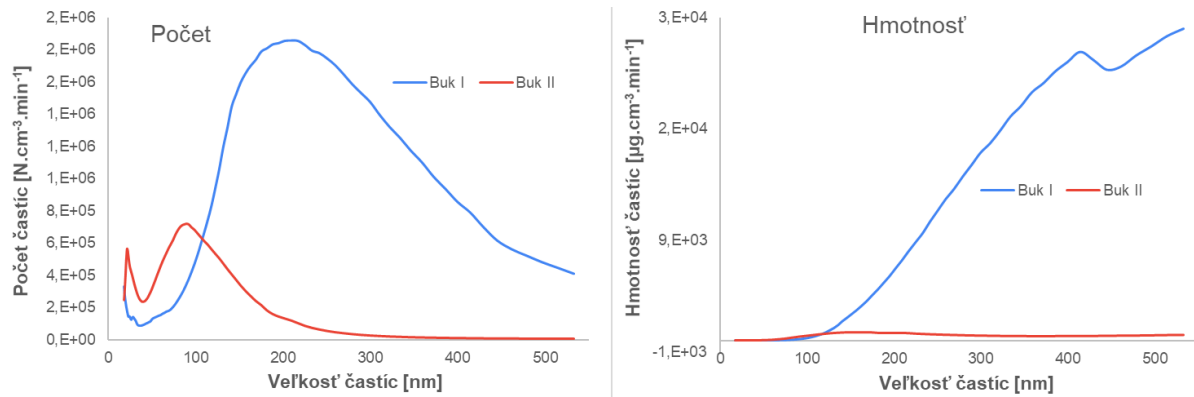


Obr. 71 Koncentračná mapa pri bežnom spaľovaní. I. – prvá fáza spaľovacieho cyklu; II. – druhá fáza spaľovacieho cyklu

Z hľadiska produkcie jemných častíc, horenie dávky paliva počas jedného cyklu prebiehalo v dvoch významných fázach. Na obrázku 71 je koncentračná mapa s priebehom produkcie jemných častíc. Zľava doprava pozorujeme na začiatku zápal spolu s prvým priložením paliva, určeným pre zahriatie krbu na pracovnú teplotu. Môžeme sledovať zvýšenú produkciu jemných častíc, ovplyvnenú chladnými stenami spaľovacieho zariadenia. Ďalej nasledujú dva celé cykly, v ktorých je v každom označená prvá a druhá fáza I. a II. V prvej fáze dochádza ku intenzívnemu uvoľňovaniu prchavej horľaviny, ktorá ale nestíha dohárať. Nedohorené frakcie sú práve skondenzované uhľovodíkové látky, tvoriace veľké množstvo jemných častíc s veľkosťou >150 nm.

Druhá fáza nastáva v momente, kedy sa uvoľnila väčšina prchavej horľaviny, a dochádza ku horeniu tuhého zvyšku. V tejto fáze horí uhlík viazaný v palive, ktorý nebol uvoľnený vo forme prchavej horľaviny. Ako sme už spomenuli v rešeršnej časti [62], viacerí autori označujú prvú fázu aj ako dymiacu fázu, pretože je to časový interval cyklu, v ktorom dochádza ku produkcii viditeľného dymu. Druhá fáza sa označuje ako tlejúca fáza. Prechod z prvej fázy do druhej je pre väčšinu nami spaľovaných palív takmer skokový. V priebehu dvoch minút pozorujeme inú veľkostnú distribúciu častíc o značne nižšej koncentrácii. Na obrázku 72 je zobrazená veľkostná distribúcia pre počet i hmotnosť prvej i druhej fázy horenia.

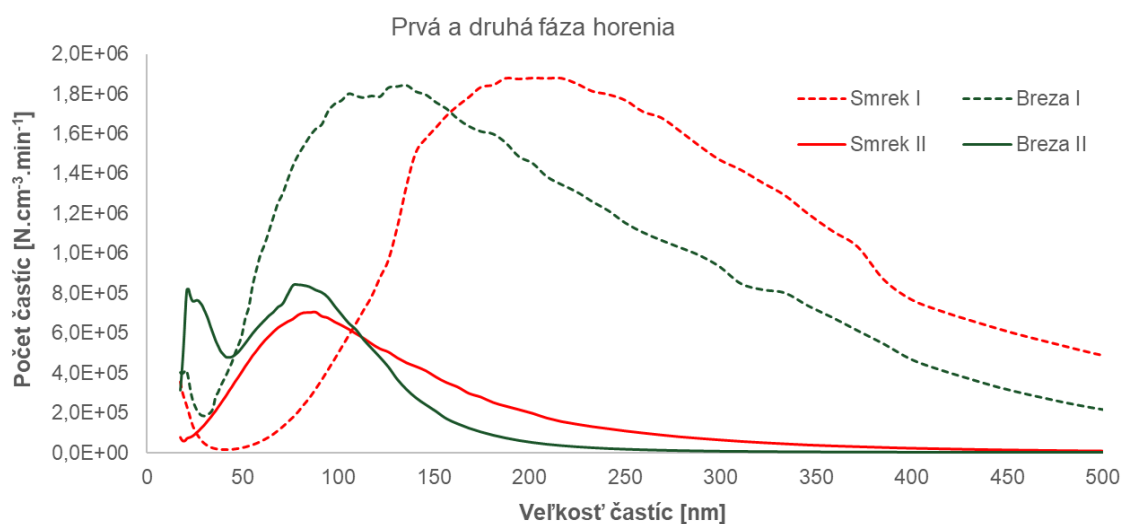




Obr. 72 Porovnanie priemernej koncentrácie a hmotnosti jemných částic za minútu v priebehu prvej a druhej fázy pre bukové drevo

Z týchto diagramov vyplýva, že prvá fáza je charakteristická tvorbou částic väčších veľkostí, zatiaľ čo v druhej fáze sa tvoria takmer výhradne částice s veľkosťou do 200 nm. Keď porovnáme veľkostnú distribúciu jemných částic prvej a druhej fázy z pohľadu ich hmotnosti, vidíme, že celková hmotnosť jemných částic vzniknutých počas druhej fázy spalovacieho cyklu je takmer zanedbateľná v porovnaní s hmotnosťou částic prvého cyklu. Počas prvej fázy dochádza ku intenzívnej koagulácii jemných částic, a to z dôvodu prítomnosti väčšieho množstva nedohorenej prchavej horľaviny a prítomných uhľovodíkových látok, ktoré po prechode do chladnejších částí spalínovodu kondenzujú.

Na obrázku 73 porovnáme veľkostnú distribúciu částic počas horenia smrekového a brezového dreva. Pozorujeme, že veľkostné spektrum meraných částic sa odlišuje hlavne v prvej fáze, a to na základe vlastností paliva. Rozdelenie spalovacieho cyklu na prvú a druhú fázu prináša lepšie pochopenie dejov odohrávajúcich sa počas spaľovania biomasy v kotle s ručným prikladaním, na základe ktorých môžeme následne určiť potrebu ovplyvňovať kvalitu horenia s cieľom zabezpečiť čo najnižšie množstvo vyprodukovaných částic.



Obr. 73 Porovnanie koncentrácie částic v priebehu prvej a druhej fázy horenia pre smrek a brezu

### 8.3 Vplyv ťahu a nastavenia komínovej klapky

Pokiaľ nie je používaný pre odvod spalin spalínový ventilátor, ale využívame prirodzený ťah v komíne, využíva sa pre nastavenie hodnoty ťahu komínová klapka. Tá ovplyvňuje podtlak v komíne. Ťah komína je pre nás kľúčový z hľadiska nastavovania rovnakých podmienok spaľovania pri rôznych meteorologických podmienkach (hlavne pri meniacej sa vonkajšej teplote), aby sme boli schopní dosiahnuť opakovateľnosť meraní. Ťah vplýva na rýchlosť prúdenia a množstvo vzduchu vstupujúceho do spaľovacieho zariadenia.

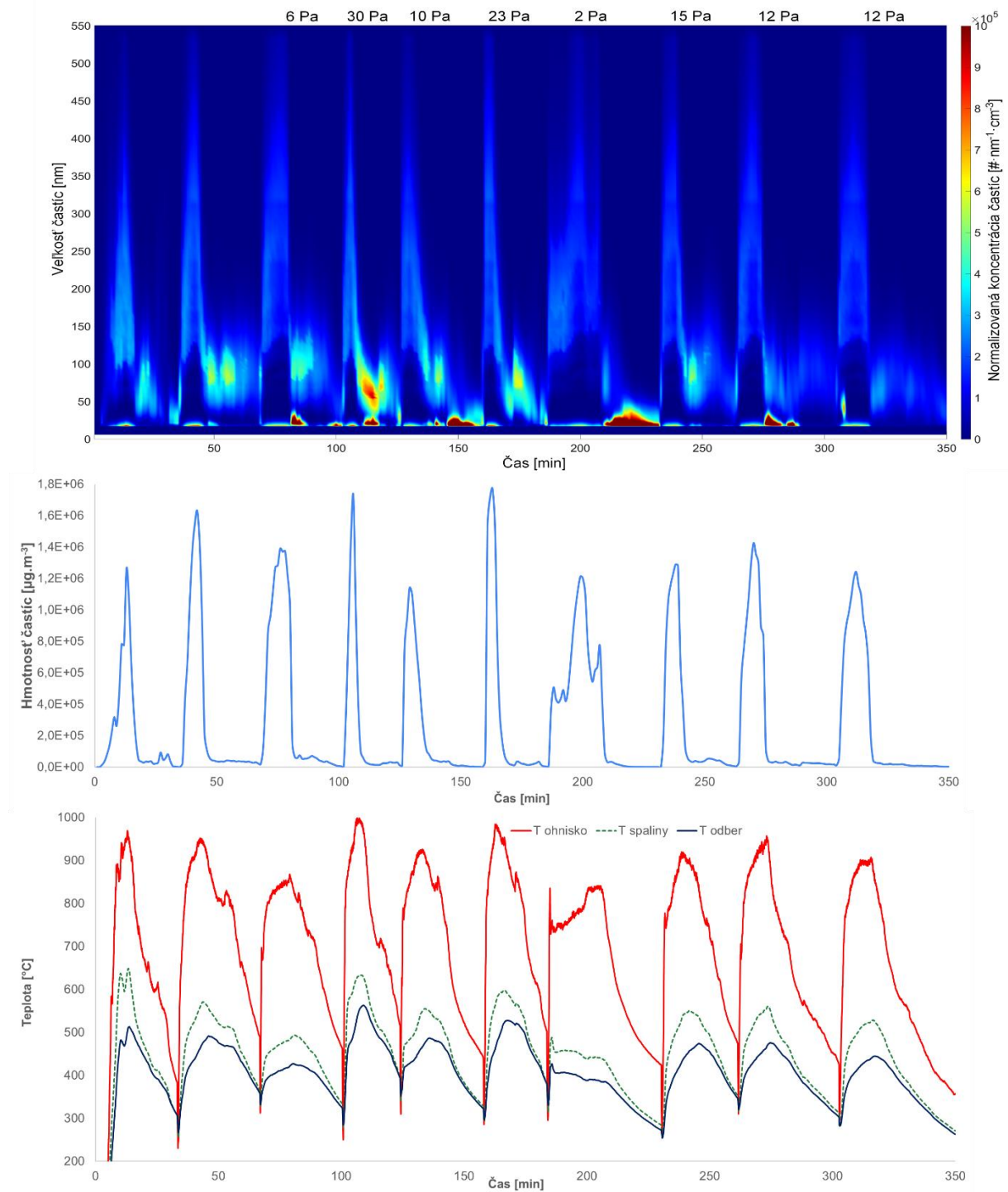
V prípade krbu s ručným prikladáním sme využívali práve komínovú klapku umiestnenú v hornej časti spalinovodu (obr. 75). Ovládanie bolo zabezpečené zdola vďaka pripevnenej retiazke. Aktuálna hodnota podtlaku bola zobrazená kvapalinovým manometrom, ako aj elektronickým čidlom s počítačovým záznamom.

Horenie paliva v spaľovacom zariadení je intenzívnejšie pri vyšších hodnotách ťahu, pretože väčšie množstvo kyslíka v nasávanom vzduchu prispieva ku exotermickým reakciám. Naším zámerom ale bolo overiť, ako rôzne hodnoty ťahu ovplyvňujú koncentráciu jemných častíc v spalinách, ich veľkostnú distribúciu a hmotnosť.

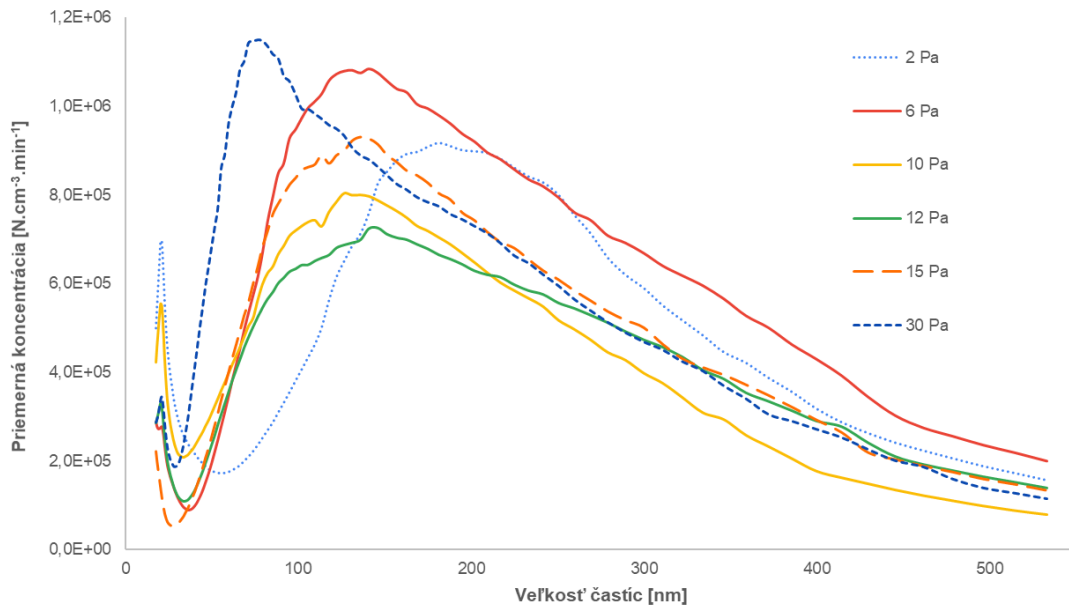
Pre tento experiment sme prikladali vždy rovnaké množstvo paliva (bukové drevo). Akonáhle stúpila hodnota kyslíka v spalinách na 17%, nasledoval ďalší cyklus. Prívod primárneho a sekundárneho vzduchu bol nastavený na odporúčané hodnoty pre bežné spaľovania a nebol menený počas celej doby experimentu. Bezprostredne po priložení paliva na začiatku spaľovacieho cyklu sme komínovú klapku otvorili približne na 1 minútu na maximum, aby došlo ku rozhoreniu paliva. Keď sa tak stalo, komínová klapka bola nastavená na meranú hodnotu podtlaku. Namerané výsledky produkcie jemných častíc v závislosti na veľkosti komínového ťahu sú uvedené na obrázkoch 75 až 78.



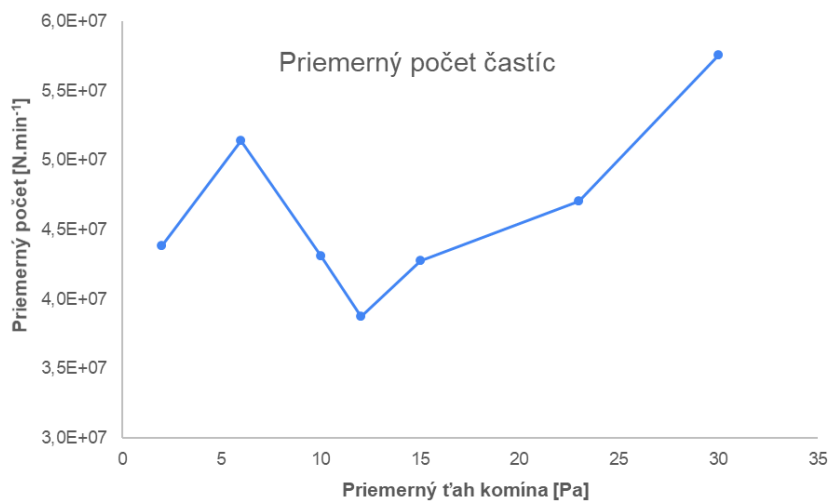
Obr. 74 Komínová klapka



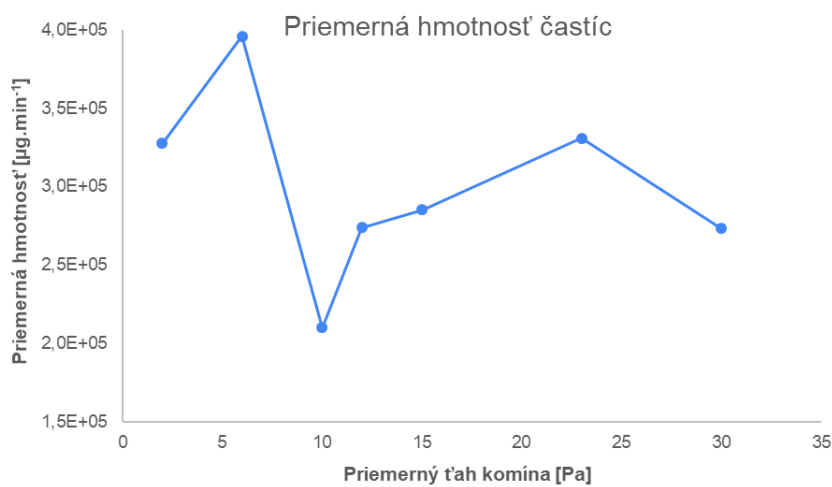
Obr. 75 Časový priebeh koncentrácie jemných častíc (hore), celkovej hmotnosti častíc zaznamenaných prístrojom SMPS (uprostred) a teplôt na vybraných miestach krbu (dolu).



Obr. 76 Priemerná minútová veľkostná distribúcia jemných častíc pre spaľovacie s rôznymi hodnotami komínového ťahu



Obr. 77 Priemerný minútový počet nameraných jemných častíc v závislosti na ťahu komína



Obr. 78 Priemerná minútová hmotnosť nameraných jemných častíc v závislosti na ťahu komína

Obrázok 75 zobrazuje koncentračnú mapu a časový priebeh veľkostnej distribúcie jemných častíc pre rôzne hodnoty ťahu komína počas série cyklov spaľovania. Zároveň je tu vykreslený priebeh celkovej hmotnosti nameraných jemných častíc a teploty v ohnisku, v mieste výstupu spalín z krbu do spalínovodu a v mieste odberu spalín. Na základe týchto priebehov v čase môžeme jasne rozlíšiť jednotlivé spaľovacie cykly, ako aj prvú a druhú fázu horenia. Znížením ťahu v komíne sa predlžuje čas horenia priloženého paliva a vyšším ťahom sa, naopak, doba horenia rovnakej hmotnosti paliva skraca. Pri normálnom ťahu 12 Pa, ktorý je pre spaľovacie zariadenia tejto výkonnostnej kategórie daný normou, je teplota v mieste odberu spalín maximálne 470 °C.

V prípade vyššieho ťahu (30 a 23 Pa) pozorujeme, že celková hmotnosť častíc sa počas prvej fázy takmer skokovo zvyšuje na maximálne hodnoty, a po krátkom čase takmer rovnako skokovo klesá. Značí to, že veľký ťah komína urýchľuje priebeh horenia najmä v prvej fáze. Pri nižších hodnotách ťahu (2 a 6 Pa) zas sledujeme značne dlhšiu dobu, počas ktorej sú uvoľňované veľké častice.

Priebeh teplôt naznačuje zvýšenie teploty horenia pri vyššom ťahu na 950 až 1000 °C. V mieste odberu spalín sme zaznamenali teplotu 530 – 550 °C, čo znamená, že komínová strata tepla bola vysoká. Po dohorení prchavej horľaviny teplota v krbe klesá. Horenie prchavej horľaviny pri nižšom podtlaku v spalínovode prebieha pri teplotách 800 – 850 °C. V mieste odberu spalín sme sa dostali max. na hodnotu 400 °C.

Na obrázku 76 sledujeme veľkostnú distribúciu jemných častíc pre rôzne hodnoty podtlaku v komíne. Ukazuje sa, že so zvyšujúcim ťahom sa zmenšuje priemerná veľkosť jemných častíc v sledovanom rozsahu od 18 do 550 nm. Väčšie častice vznikajú hlavne pri nedostatku kyslíka pre dohorenie prchavej horľaviny, čo sa ukazuje napríklad v prípade podtlaku s hodnotou 2 Pa. Nedohorené frakcie majú väčšiu tendenciu kondenzovať, čiže dochádza ku formovaniu častíc o väčších veľkostiach. V prípade ťahu s hodnotou podtlaku 20 Pa predpokladáme, že v spaľovacej komore sa nachádzal vysoký prebytok kyslíka, vďaka čomu väčšina prchavej horľaviny dohorela. V prípade menších častíc nedochádza ku tak intenzívnej koagulácii, čomu nasvedčuje aj nižšia celková hmotnosť týchto častíc. Zároveň však palivo dohorelo najrýchlejšie.

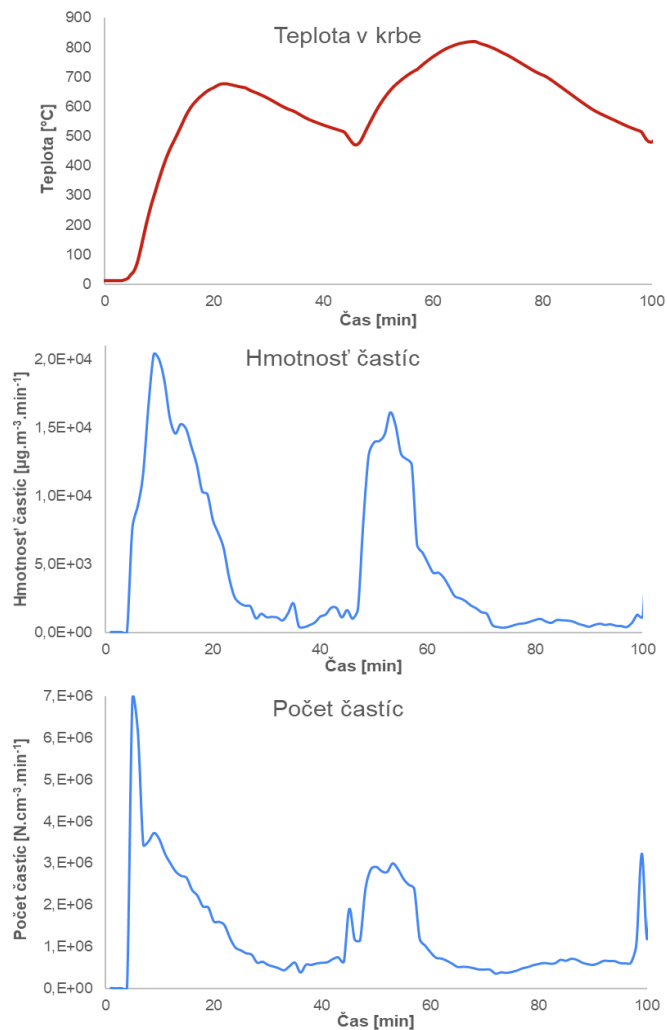
Ďalej vyhodnocujeme závislosť priemerného minútového počtu a hmotnosti jemných častíc daného cyklu, v závislosti na priemernom podtlaku v komíne. Z hľadiska počtu častíc je minimum práve na hodnote 12 Pa komínového ťahu. So zvyšujúcim sa ťahom priemerná hodnota počtu nameraných častíc stúpa, pričom maximálna je pri ťahu 30 Pa. Priemerná hmotnosť častíc je minimálna pri ťahu 10 Pa. Maximálnu hodnotu priemernej hmotnosti častíc zaznamenávame pri ťahu 5 Pa.

Z hľadiska tvorby jemných častíc z výsledkov vyplýva, že práve normou odporúčaná priemerná hodnota podtlaku 12 Pa je opodstatnená. Javí sa výhodné, aby počas horenia paliva v prvej fáze spaľovacieho cyklu bol ťah nastavený na mierne vyšší podtlak v komíne (15 Pa). To ale vedie ku zvýšeniu komínovej straty tepla. Počas druhej fázy je z hľadiska tvorby jemných častíc výhodnejší nižší podtlak (10 Pa).

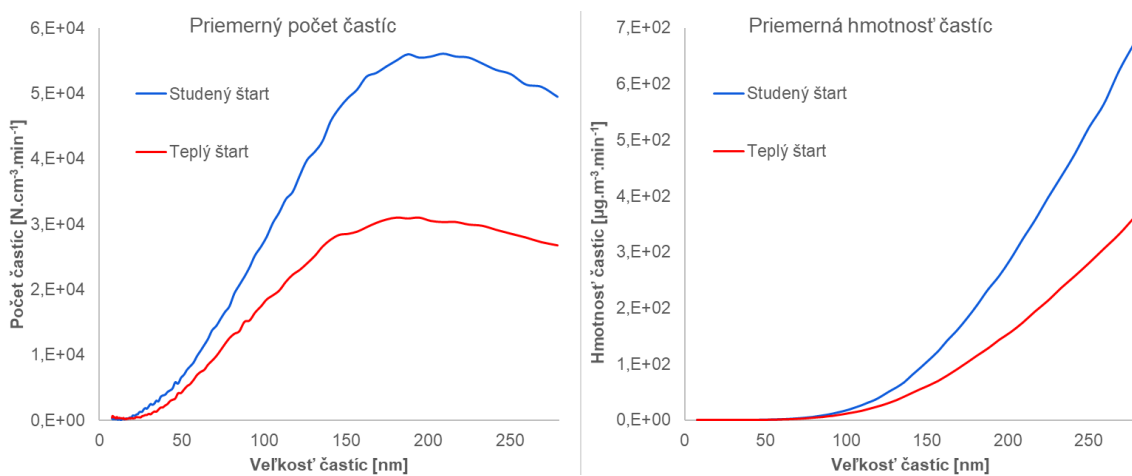
## 8.4 Vplyv teploty v spaľovacej komore

Na základe meraní produkcie jemných častíc pri zapaľovaní krbu zo studeného stavu, a pri priložení paliva do vyhriatej spaľovacej komory, vieme, podobne ako v prípade automatických kotlov, potvrdiť vplyv teploty vnútorných plôch spaľovacieho zariadenia s ručným prikladaním na tvorbu jemných častíc. V prípade tohoto experimentu sme prvý zápal paliva previedli za studeného stavu krbu. Pred druhým zápalom za teplého stavu nedošlo ku úplnému vyhoreniu paliva z predchádzajúceho

cyklu, keďže sa tu ešte nachádzali žeravé uhlíky. Na tie bolo položené rovnaké množstvo bukového paliva a došlo ku zápalu. Jednotlivé cykly sme podľa teploty v spaľovacej komore nazvali studený a teplý štart.



Obr. 79 Priebeh teploty v spaľovacej komore, hmotnosť a počet jemných častíc v závislosti na čase počas studeného a teplého zápalu v krbe. Teplý štart prebiehal od 44. minúty.



Obr. 80 Priemerná početná a hmotnostná veľkostná distribúcia jemných častíc v priebehu studeného a teplého štartu krbu.

Teplota v krbe bola meraná uprostred dosky z vermikulitu, nachádzajúcej sa v hornej časti ohniska. Pribeh teploty spoločne s hmotnostnou a početnou distribúciou jemných častíc je zobrazený v diagramoch na obrázku 79. Teplý štart krbu začal v 44. minúte. Z hľadiska produkcie jemných častíc sledujeme, že tesne po studenom zápale krbu došlo ku produkcii vysokého počtu jemných častíc. Zo začiatku sa tvorili najmä častice menších veľkostí. V priebehu 5 minút došlo ku významnému nárastu celkovej hmotnosti produkovaných častíc a zároveň poklesu celkového počtu, čo znamená väčšie veľkosti častíc. S nárastom teploty produkcia jemných častíc klesá. Podobný scenár sa opakuje pri teplom štarte, no s vyššou teplotou nameranou v krbe. Počet nameraných jemných častíc bol o 41 % nižší a ich celková hmotnosť o 45 % nižšia v porovnaní so studeným štartom.

Na obrázku 80 je vyobrazená priemerná početná a hmotnostná veľkostná distribúcia pri studenom a teplom štarte krbu. Keďže sme počas tohto experimentu používali rotačnú riedičku, ktorá vyžaduje vyššie prietoky, prístroj SMPS bol v tomto režime schopný merať veľkostnú distribúciu iba do veľkosti častíc 279 nm. Počet jemných častíc, rovnako ako aj ich hmotnosť pri studenom štarte sú v porovnaní s teplým štartom vyššie v celom meranom veľkostnom spektre.

Potvrďuje sa, že teplota krbu výrazne ovplyvňuje celkovú produkciu jemných častíc. Na studených plochách ohniska dochádza ku rýchlejšiemu zhasínaniu koncov plameňov, horľavé frakcie nedostatočne dohárajú, pri nižších teplotách kondenzujú a vytvárajú častice. Zvýšenie teploty vnútorného prostredia ohniska pomáha tejto horľavine efektívnejšie dohorieť a celkové množstvo jemných častíc uvoľnených do okolitého prostredia spalinovodom je nižšie.

#### 8.4.1 Vplyv teploty terciárneho vzduchu

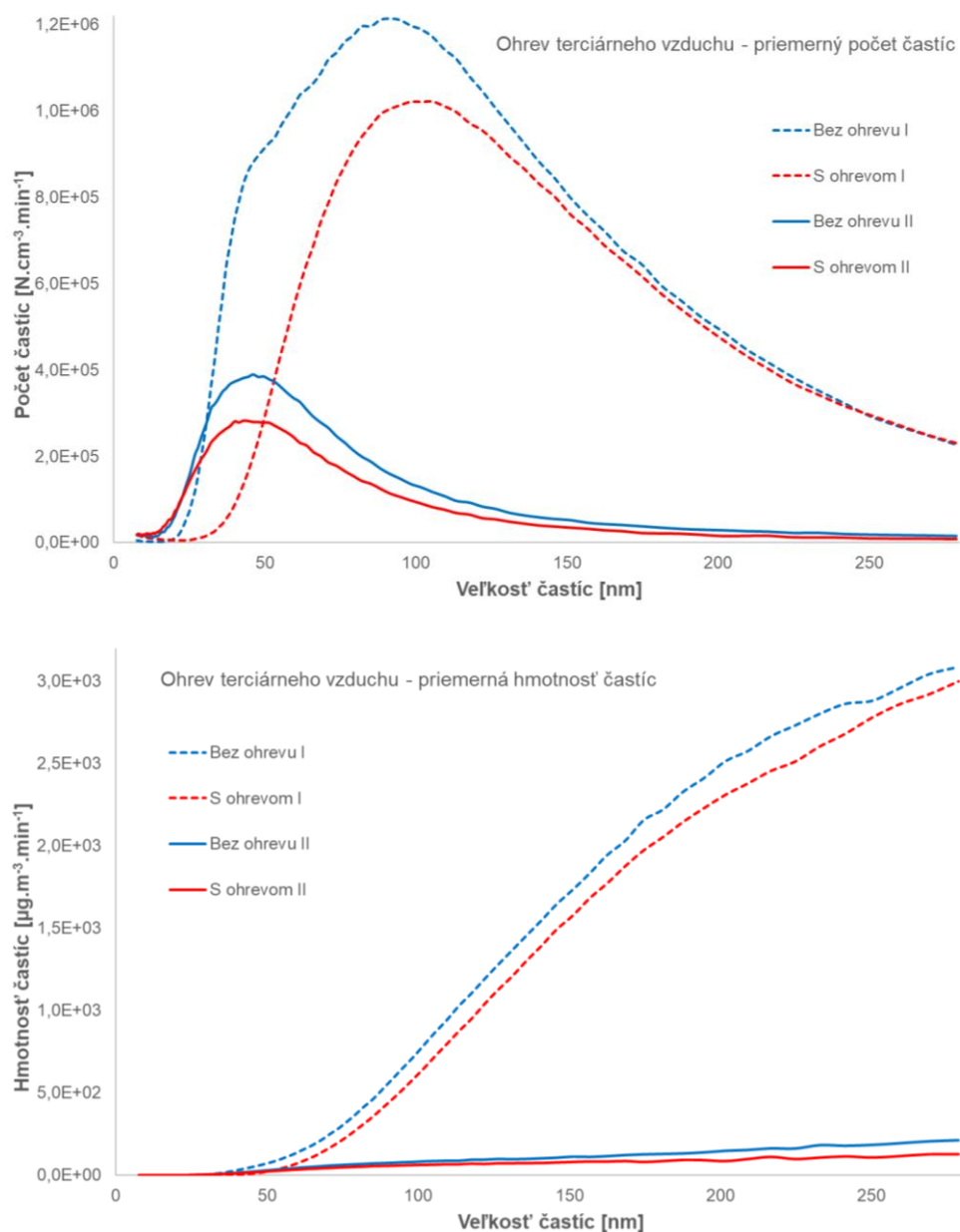
Úlohou privedeného terciárneho vzduchu je podporiť horenie v hornej časti spaľovacej komory, predovšetkým v prvej fáze horenia, kedy primárny a sekundárny vzduch nie je dostatočný pre efektívne dohorenie prchavej horľaviny. V použitom experimentálnom krbe je terciárny vzduch privádzaný zo zadnej časti spaľovacej komory celkovo 8 otvormi (obrázok 81 vľavo) a nie je regulovateľný. Predhrieva sa v zadnom plášti krbu v dutinovom rebrovaní. Keď pozorujeme v ohnisku malé plamienky nad hlavným plameňom, je zrejmé, že plní svoju úlohu a podporuje sekundárne spaľovanie prchavej horľaviny. Táto fáza je zachytená na obrázku 81 vpravo.



Obr. 81 Otvory pre prívod terciárneho vzduchu do ohniska (vľavo) a horenie paliva s prívodom terciárneho vzduchu (vpravo)

Na rozdiel od sekundárneho vzduchu, ktorý je privádzaný štrbinami z priestoru popred sklom, má terciárny vzduch v mieste prívodu do ohniska nižšiu teplotu. Sekundárny vzduch je predhrievaný vo vrchnej časti ohniska priamo nad plameňom, zatiaľ čo terciárny vzduch sa ohrieva na vonkajšom opláštení krbu. Teplota sekundárneho vzduchu dosahuje počas najintenzívnejšej fázy horenia v mieste prívodu teplotu až 420 °C. Teplota terciárneho vzduchu predhriateho opláštením krbu je 180 – 200 °C. Predpokladáme, že čím je vyššia teplota privádzaného terciárneho vzduchu, tým bude celkový proces spaľovania efektívnejší.

Rozhodli sme sa predhrievať terciárny vzduch pomocou horákov so zemným plynom. Nahrievali sme duté profily privarené zvonku na plášť krbu, ktorými prúdi terciárny vzduch. Ich teplota z vonkajšej strany bola po nahriatí okolo 850 °C. Týmto spôsobom nahrievania sa nám podarilo zvýšiť teplotu vstupujúceho terciárneho vzduchu do spaľovacej komory o 100 °C. Sledovali sme vplyv nahrievania terciárneho vzduchu na produkciu jemných částic a to v prvej i druhej fáze horenia bukového dreva.



Obr. 82 Početná a hmotnostná produkcia jemných částic bez a s ohrevom terciárneho vzduchu



Výsledky sú priemerom 5-minútového meraného intervalu pred ohrevom a následne počas ohrevu privádzaného terciárneho vzduchu. Celková produkcia jemných častíc prirodzene v čase klesá postupným vyhorevaním paliva v závislosti od fázy horenia i v prípade bez ohrevu terciárneho vzduchu. Aby neboli namerané výsledky ovplyvnená týmto prirodzeným poklesom množstva častíc v čase, z iných meraní sme určili, ako sa mení produkcia častíc v spaľovacích cykloch bez zásahu do teploty ohniska. Pre nami zvolený časový interval predpokladáme priemerný prirodzený pokles v prvej fáze horenia o 15 % v počte meraných častíc a o 10 % v ich hmotnosti. V druhej fáze je tento prirodzený pokles v meranom časovom intervale o 12% početne a o 17% hmotnostne. Tento rozdiel je v celkových výsledkoch zohľadnený, a uvádzame výsledné hodnoty po započítaní tolerancie. V diagramoch na obrázku 82 je znázornený výsledný vplyv ohrevu terciárneho vzduchu o 100 °C počas prvej i druhej fázy horenia.

Pokles produkcie jemných častíc zvýšením teploty vstupujúceho terciárneho vzduchu do spaľovacej komory je zrejmý. Počet jemných častíc sa ohrevom znížil v prvej fáze horenia až o 26 %. Hmotnosť nameraných jemných častíc klesla o 8 %. V druhej fáze došlo ohrevom ku početnému zníženiu jemných častíc o 19 % a hmotnostne až o 25 % v porovnaní s produkovanými časticami bez ohrevu terciárneho vzduchu.

Ohrevom terciárneho vzduchu celková tvorba jemných častíc v emisiách biomasového kotla s ručným prikladaním klesá. Otázkou je však spôsob ohrevu. Naša metóda ohrevu pomocou plynových horákov, aj keď je z hľadiska tvorby jemných častíc účinná, je pri pohľade na spotrebu energie neefektívna. Pokiaľ by výrobcovia spaľovacích zariadení našli vhodný spôsob, ako účinne využiť na ohrev terciárneho vzduchu teplo krbu, môže ohrev terciárneho vzduchu výrazne znížiť celkové emisie jemných častíc.

#### 8.4.2 Vplyv teploty sekundárneho vzduchu a prúdenia v krbe

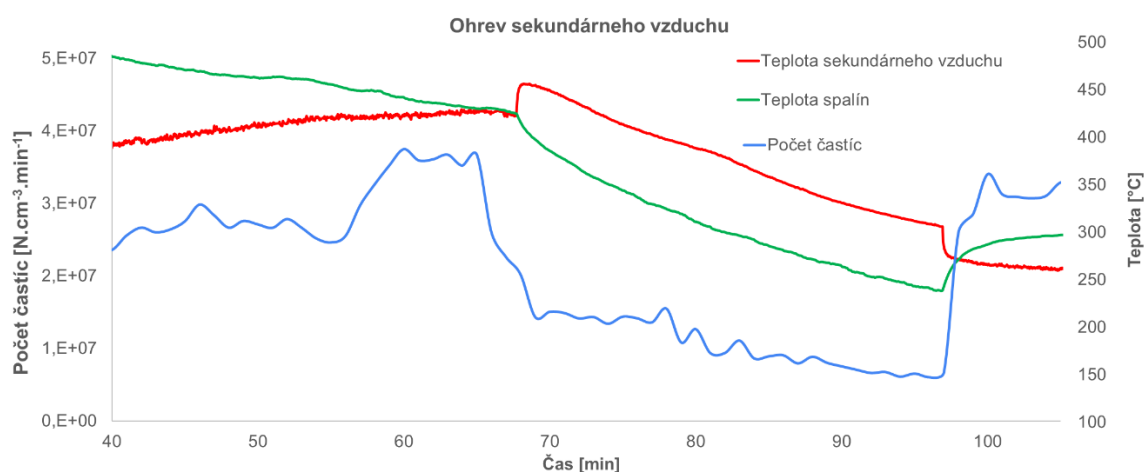
V ďalšom kroku sme otestovali vplyv teploty sekundárneho vzduchu privádzaného do ohniska. Ako sme spomenuli vyššie, vzduch je ohrievaný na hornej klenbe spaľovacej komory, kde teploty dosahujú vysoké hodnoty, až okolo 500 °C. Rozhodli sme sa pre zvýšenie teploty sekundárneho vzduchu bez konštrukčného zásahu do krbu a bez použitia externého zdroja tepla. Znížením prietoku vzduchu pomocou regulačného prvku pre ovládanie množstva sekundárneho vzduchu sme znížili jeho množstvo približne na polovicu. Vzduch má viac času zotrvať v priestore nad hornou klenbou ohniska, čím sa zvyšuje jeho teplota na vstupe. Zároveň sme použili vstavanú dosku pre reguláciu prúdenia v ohnisku, ako je uvedené v kapitole 8.1.2. Dosku sme umiestnili do zvislej polohy, čím sa znížil tepelný prestup cez predné sklo v dvierkach krbu, a zvýšila sa teplota v ohnisku. V tomto experimente sme teda zvýšili celkovú teplotu v krbe a zároveň mierne modifikovali spôsob prúdenia sekundárneho vzduchu do spaľovacej komory. Tento experiment prebiehal v druhej polovici prvej fázy horenia.

Výsledný priebeh teploty sekundárneho vzduchu a celkového počtu nameraných jemných častíc je uvedený na obrázku 83. Teplota sekundárneho vzduchu po znížení jeho privádzaného množstva stúpala (68. – 97. minúta). Zároveň klesla teplota v mieste výstupu spalín do spalínovodu. Je to následok zníženého množstva privádzaného vzduchu do krbu. Znížil sa celkový prietok vzduchu v krbe, prchavá horľavina sa zdržala dlhšiu dobu v ohnisku a mala možnosť efektívnejšie dohorieť, ako aj odovzdať teplo okolitým stenám. Sekundárny vzduch po vstupe do ohniska neprechádza popred sklo, ale vďaka vstavanej doske vo zvislej polohe ide priamo do ohniska.

Teplota má celkovo klesajúci trend, čo je dané postupným znižovaním podielu prchavej horľaviny v palive. Podstatné je, že sledujeme jasný trend poklesu celkového množstva produkovaných jemných častíc práve v dobe zvýšenia teploty sekundárneho vzduchu a modifikácie prúdenia v krbe. Po

vrátení týchto parametrov na pôvodné hodnoty (97. minúta) množstvo zachytených častíc prístrojom SMPS opäť stúpa na hodnoty podobné pôvodným.

Aj keď z tohto experimentu nevieme jasne určiť aký podiel zohráva zvýšenie teploty sekundárneho vzduchu a aký podiel má modifikácia prúdenia vstavanou doskou, je zrejmé, že kombináciou oboch týchto faktorov dochádza ku zníženiu produkcie jemných častíc. Je dôležité poznamenať, že znížiť množstvo privádzaného vzduchu si môžeme dovoliť iba do tej miery, kým nedochádza ku zníženiu kvality spaľovania nedostatkom prítomnosti kyslíka.



Obr. 83 Vplyv teploty sekundárneho vzduchu na tvorbu jemných častíc

## 8.5 Vplyv orientácie paliva

Prikladanie paliva do krbu a spôsob uloženia jednotlivých kusov dreva je vždy záležitosť užívateľa. Práve on najviac ovplyvňuje kvalitu spaľovacieho procesu nielen tým, aké palivo spaľuje, ale aj samotným spôsobom usporiadaním priložených kusov do spaľovacieho zariadenia z ručným prikladáním. Výrobcovia môžu ponúkať zariadenia vysokých emisných tried, no rozhodujúce z hľadiska emisií je, ako pristupuje k obsluhu koncový užívateľ. V tomto kroku sme spaľovali rovnakú hmotnosť paliva, no s rôznym počtom kusov a pri rôznej orientácii. Drevo sme kládli do hrbu horizontálne i vertikálne. V prípade horizontálneho prikladania sme porovnávali orientáciu kusov bukového dreva rovnobežnú a kolmú s bočnými stenami krbu. Na obrázku 85 sú fotografie pri rôznej orientácii spaľovaných kusov paliva.



Obr. 84 Orientácia priložených kusov paliva – kolmo na bočné steny krbu (vľavo); rovnobežne s bočnými stenami (uprostred) a vertikálne.

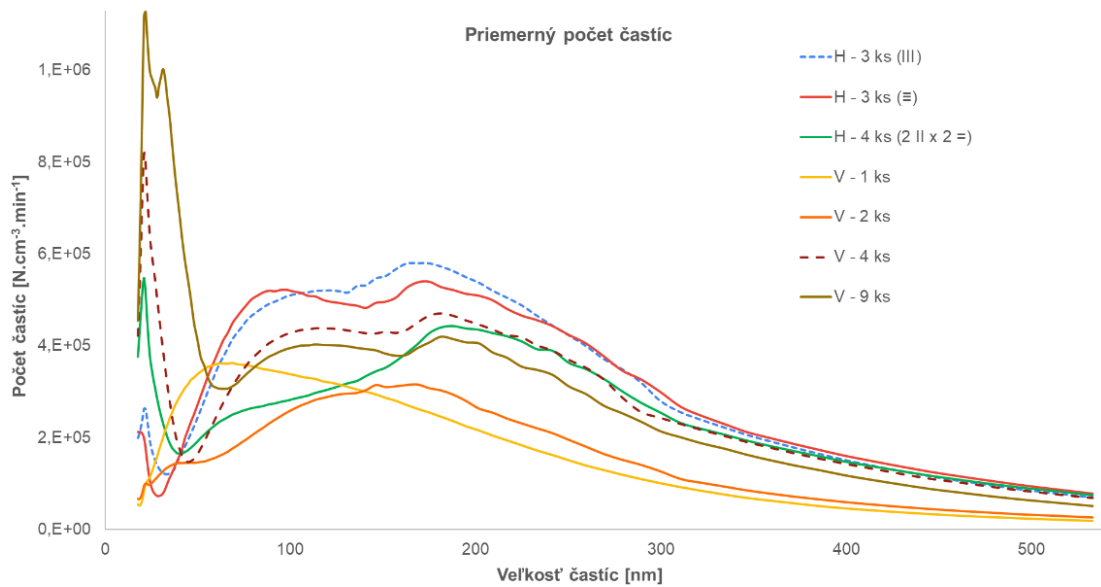
Každým cykлом v rámci tohto experimentu bolo menené usporiadanie priloženého paliva, pričom rovnaké usporiadanie sa opakovalo dvakrát. Výsledky produkcie jemných častíc sme získali vždy ako priemer týchto dvoch cyklov. Spaľovali sme bukové drevo. Hmotnosť paliva v každom cykle bola 2 kg bez ohľadu na počet kusov dreva. Čas jedného cyklu sme určili od momentu priloženia paliva, až po moment, kedy množstvo kyslíka v spalínách stúplo na hodnotu 17%. Horizontálne sme spaľovali 3 kusy dreva umiestnené vedľa seba rovnobežne s bočnými stenami, označené ako „H - 3 ks (III)“. Ďalej rovnako 3 kusy horizontálne vedľa seba kolmo na bočné steny – „H - 3 ks (≡)“. Tiež sme testovali palivo s počtom 4 kusy, uložené kombinovane 2 kusy rovnobežne s bočnými stenami, na ktorých boli kolmo položené ďalšie 2 kusy, označené ako „H - 4 ks (2 II x 2 =)“. Vertikálne sme spaľovali jeden kus, označený ako „V - 1 ks“. Podobne sme označili aj 2, 4 a 9 kusov, ktorých produkciu jemných častíc spaľovaním sme sledovali.

Nastavenie primárneho a sekundárneho vzduchu, ako aj komínová klapka sa po celú dobu experimentov nemenili. Očakávali sme, že rýchlosť zápalu vertikálne umiestnených kusov dreva bude trvať dlhšiu dobu, z dôvodu menšej kontaktnej plochy s pahrebou, no palivo sa rozhorelo takmer rovnako rýchlo ako horizontálne uložené kusy dreva. Výsledky spaľovacích skúšok uvádzame v diagramoch na obrázkoch 85 – 87.

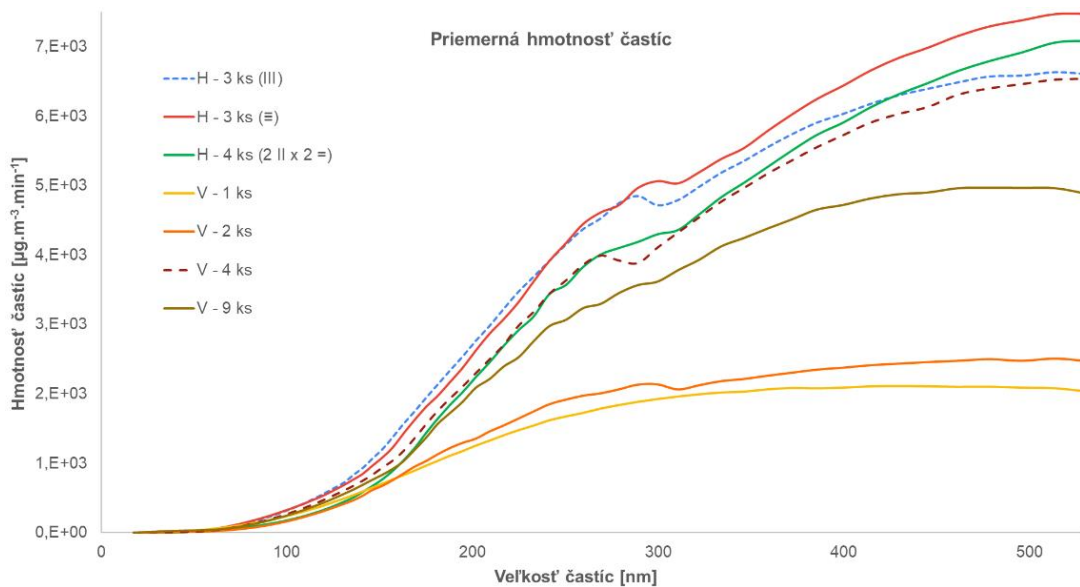
Z uvedených výsledkov môžeme pozorovať jasný trend, z ktorého vyplýva, že menší počet kusov spaľovaného paliva a ich orientácia vo vertikálnom smere je z pohľadu tvorby jemných častíc výhodnejšia, než horizontálne uložené palivo na rošte. V prípade horizontálnej polohy 4 kusov paliva navzájom kolmo prekrížených vo dvoch úrovniach vidíme tiež mierny pokles produkcie jemných častíc v porovnaní s tromi kusmi rovnobežne či kolmo s bočnými stenami krbu.

Ukazuje sa, že pokiaľ sa palivo nachádza vo vyšších častiach spaľovacej komory, či už je to z dôvodu vertikálneho umiestnenia, alebo väčšieho množstva na seba uložených horizontálnych „poschodí“, tvorba jemných častíc nameraných v spalínach je nižšia. Tento jav je možné vysvetliť tým, že prchavá horľavina paliva, z dolných častí spaľovacej komory, prechádza pri ceste nahor do spalínovodu priestorom s prítomným plameňom a zároveň oblasťou s vyššími teplotami. To znamená, že je väčšia pravdepodobnosť, že tieto frakcie prchavej horľaviny efektívne dohoria, ako je tomu v prípade horizontálneho „nízkeho“ priloženia paliva. Vtedy palivo horí na väčšej ploche, no prchavá horľavina pri ceste do horných častí spaľovacej komory sa rýchlejšie ochladí, čím nestihne dohoriť.

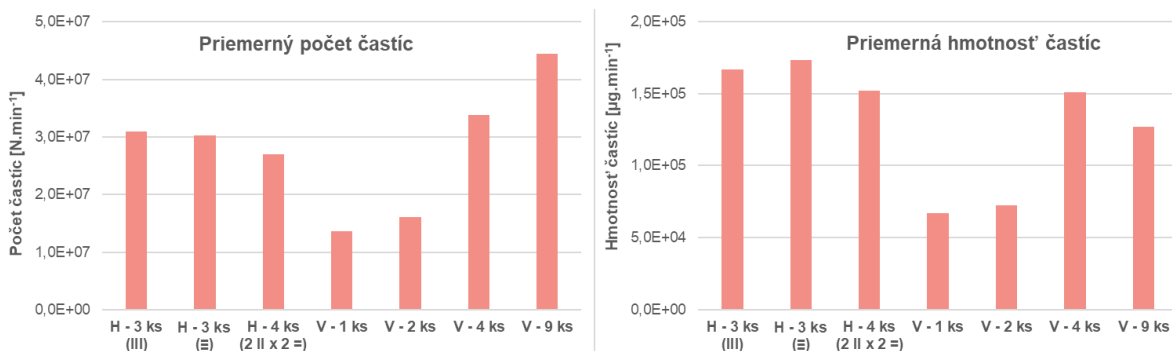
Najčastejšie sa palivo prikladá do spaľovacej komory horizontálne, čiže sa ukladá tak, aby svojou dĺžkou ležalo na rošte. Vzduch prúdi z pod roštu (primárny vzduch), z prednej časti z otvorov pod a nad sklom (sekundárny vzduch) a zo zadnej steny (terciárny vzduch). Prúdenie je turbulentné a prevláda smer prúdenia rovnobežný s bočnými stenami krbu. Keď porovnáme rovnobežne a kolmo položené kusy paliva (prvý a druhý prípad na diagrame – obrázok 87), palivo uložené kolmo na bočné steny krbu vykazuje o niečo nižšiu početnú produkciu jemných častíc, no hmotnostne je toto množstvo častíc vyššie. Predpokladáme, že usporiadaním kusov dreva rovnobežne so stenami krbu dochádza ku intenzívnejšiemu prúdeniu a turbulenciám vzduchu povrchom paliva. Vďaka tomu palivo rýchlejšie vyhorí. Dĺžka cyklu v prípade kolmého uloženia bola 38 minút. Pri rovnobežnom usporiadaní trval cyklus o 5 minút menej. Efektívnejšie prúdenie vzduchu medzi jednotlivými kusmi dreva spôsobuje, že prchavá horľavina je počas horenia intenzívnejšie premiešavaná so vzduchom, čo môže byť príčinou nižšej hmotnostnej produkcie jemných častíc.



Obr. 85 Přemerná početná veľkostná distribúcia jemných částic za minútu spaľovacieho cyklu pre jednotlivé usporiadania kusov paliva



Obr. 86 Přemerná hmotnostná veľkostná distribúcia jemných částic za minútu spaľovacieho cyklu pre jednotlivé usporiadania kusov paliva



Obr. 87 Porovnanie priemerného počtu a hmotnosti jemných částic nameraných počas spaľovania rôzneho usporiadania kusov paliva v krbe

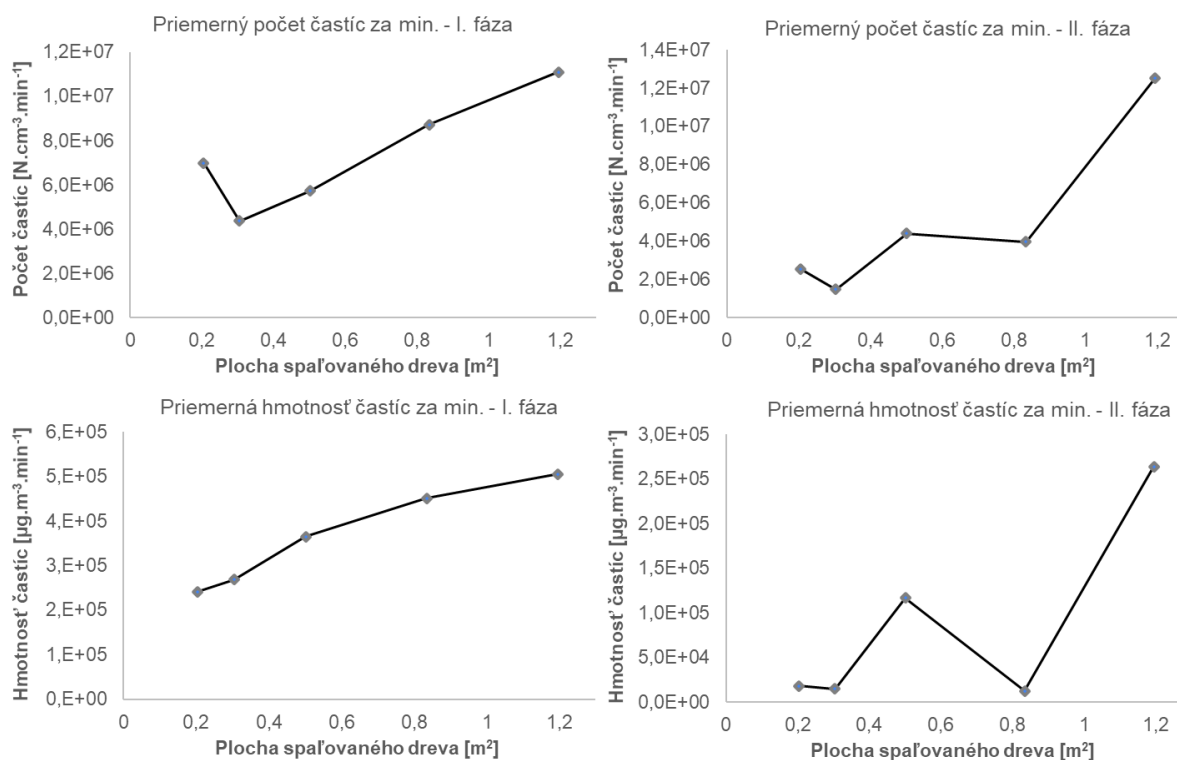
## 8.6 Vplyv geometrie paliva

V rámci riešenia dizertačnej práce bola skúmaná závislosť geometrického tvaru paliva na produkciu jemných častíc. Najbežnejšou praxou spaľovania vo väčšine krbov určených pre domácnosti je prikladať 2 až 4 kúsky narezaného dreva rôzneho tvaru a celkovej hmotnosti 2-3 kg s dĺžkou približne 33 cm. Naším cieľom bolo skúmať, ako vplýva rôzne množstvo priložených kusov paliva s rovnakou hmotnosťou na tvorbu jemných častíc. Vyšší počet kusov dreva, pri rovnakej celkovej hmotnosti, znamená, že celková plocha ovplyvnená spaľovacím procesom je väčšia. Spaľovalo sa bukové drevo vždy s podobnou hmotnosťou za cyklus (2,0 – 2,2 kg), narezané v rôznom počte kusov pre každý cyklus.

Tab. 14 Popis jednotlivých cyklov nasledujúcich po sebe a celkového povrchu spaľovaného dreva

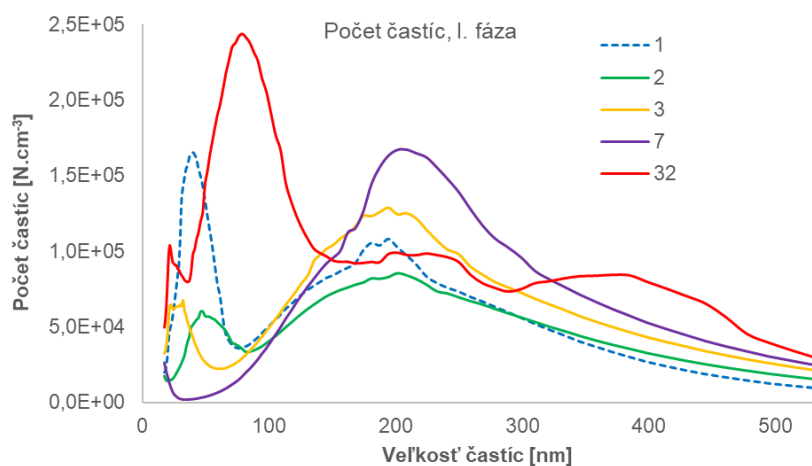
Počet kusov:	Povrch dreva [cm <sup>2</sup> ]:	Hmotnosť [kg]:	Dĺžka cyklu [min]:
1	2041	2,2	57
2	3041	2,2	49
3	5011	2	41
7	8200	2,1	41
7	8341	2,2	41
25	9800	2,2	22
32	11951	2,1	26

V tabuľke 14 sú uvedené jednotlivé cykly spaľovania. Vždy, keď množstvo kyslíka prítomného v spalinách stúplo na 17%, priložili sme palivo pre ďalší cyklus. Vidíme, že dĺžka jednotlivých cyklov je variabilná, a nie je priamo závislá na povrchu spaľovaného dreva.

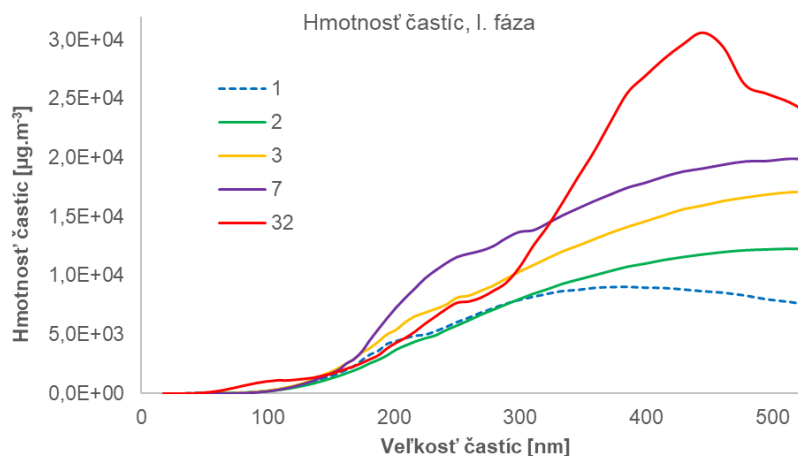


Obr. 88 Porovnanie priemernej hmotnosti a počtu častíc v jednotlivých fázach za minútu v závislosti na ploche dreva

Ako všetky ostatné spaľovacie skúšky, aj táto bola špecifická množstvom javov, kedy nebolo v našich možnostiach ovplyvniť spôsob horenia. Napríklad, aj keď prikladanie prebiehalo vždy rovnakým spôsobom a pri tých istých podmienkach, palivo začalo horieť vždy po istom čase, ktorý sa v jednotlivých cykloch odlišoval desiatkami sekúnd. V prípade prikladania viac ako troch kusov paliva sa jednotlivé kusy cez seba navzájom prekryvali, čo malo tiež vplyv na spôsob horenia a do určitej miery sa tým „zmenšila“ plocha, intenzita obtekania privádzaného vzduchu a kontakt s plameňom počas procesu horenia. Zo zaznamenaných dát sme na základe náhleho poklesu hmotnosti častíc určili, kedy došlo ku prechodu z prvej do druhej fázy horenia. Jednotlivé fázy sme medzi sebou navzájom porovnali, a vyhodnotili počet a hmotnosť častíc, ako je zobrazené v diagramoch na obrázku 89.



Obr. 89 Priemerná početná veľkostná distribúcia jemných častíc za minútu spaľovacieho cyklu v prvej fáze horenia, pre rôzny počet kusov spaľovaného paliva



Obr. 90 Priemerná hmotnostná veľkostná distribúcia jemných častíc za minútu spaľovacieho cyklu v prvej fáze horenia, pre rôzny počet kusov spaľovaného paliva

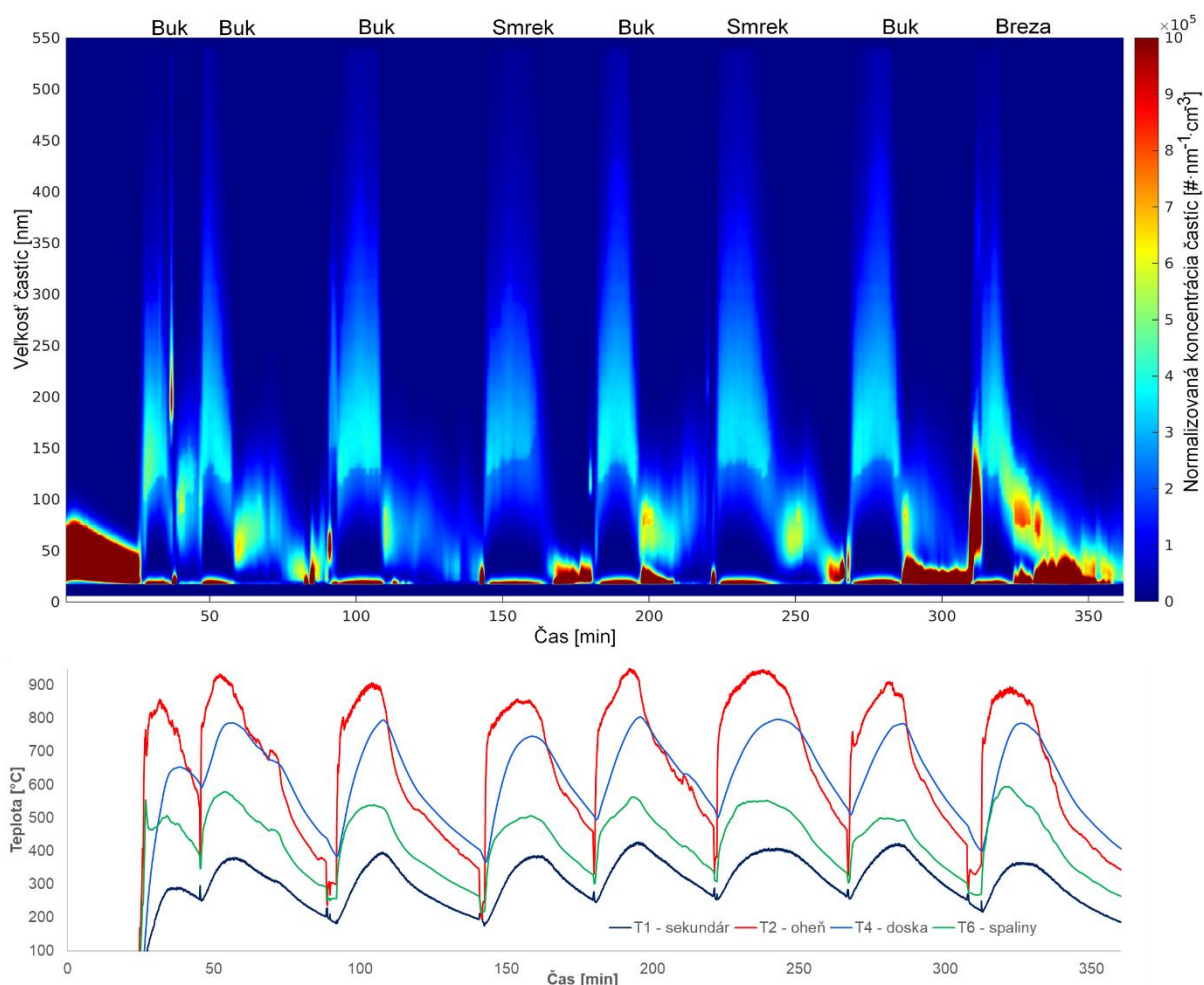
Záverom porovnania povrchu spaľovaného paliva pri rovnakej celkovej hmotnosti je, že s rastúcim povrchom stúpa aj priemerné množstvo vyprodukovaných častíc za minútu. Optimálnym počtom priložených kusov sú práve dva, kedy je v porovnaní s ostatnými minimálny celkový počet vyprodukovaných častíc. Hmotnostne sa javí ako najvýhodnejšie priloženie jedného kusu paliva. Treba ale poznamenať, že jeden kus v porovnaní s počtom kusov 32 horel viac než dvojnásobne dlhšie a pri nižšej teplote. Pri jednom kuse zároveň vznikalo vysoké množstvo častíc menších veľkostí už v prvej fáze horenia, čo je dané postupným uvoľňovaním prchavej horľaviny. V prípadoch s vyšším počtom spaľovaných kusov bola táto frakcia uvoľňovaná omnoho rýchlejšie s vyššou koncentráciou. Procesom

kondenzácie a koagulácie sa tvorili častice väčších veľkostí, čo môžeme sledovať na ich celkovej hmotnosti.

## 8.7 Vplyv použitého druhu paliva

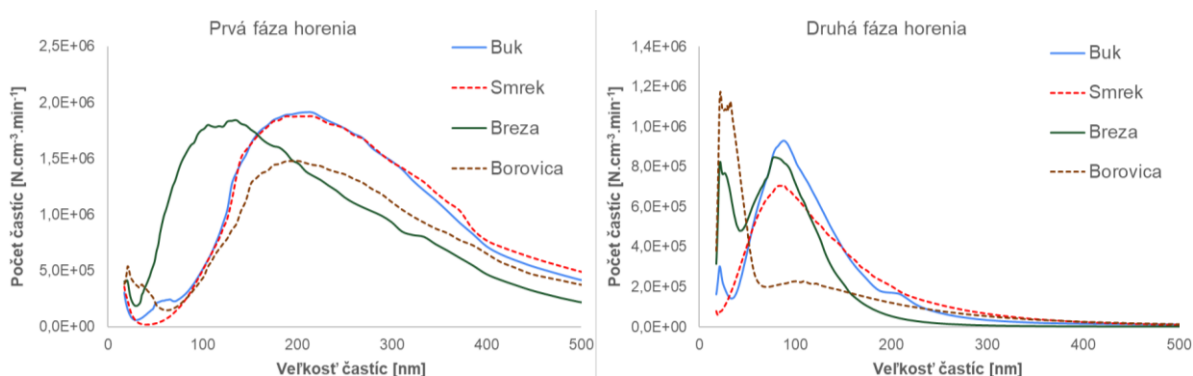
Ďalším experimentom bolo overenie vplyvu použitého druhu paliva na veľkostnú distribúciu a koncentráciu jemných častíc. K dispozícii sme mali okrem bukoveho dreva smrekové, borovicové a brezové drevo. Ťah komína bol nastavený počas celej doby spaľovania v rozmedzí 10 až 13 Pa. Regulačné ovládanie primárneho vzduchu prichádzajúceho pod rošt bolo otvorené na 30% z maximálnej hodnoty. Sekundárny vzduch na ofukovanie skla bol otvorený na maximum. Palivo bolo pridávané do kotla s hmotnosťou 2 kilogramy v intervaloch 40 až 50 minút, vždy, keď množstvo kyslíka v spalínach stúplo na 17%.

Na obrázku 91 je zobrazená koncentračná mapa, jedného z meraní, niekoľkých za sebou idúcich cyklov, s označením druhu paliva, ktoré sa spaľovalo. Spracované výsledky sú až od 88. minúty, čo je tretie priloženie bukoveho dreva. V jednotlivých cykloch, najmä pri horení bukoveho a smrekoveho dreva, je možné jasne rozoznať prvú a druhú fázu horenia. V prípade spaľovania brezoveho dreva (posledný cyklus) pozorujeme, že prechod do druhej fázy je plynulý. Pri pohľade na koncentračnú mapu nie je jasne viditeľná hranica, kedy došlo ku prechodu do druhej fázy. Na základe vyhodnoteného počtu a hmotnosti produkovaných častíc sme zistili, že to bolo práve v 324. minúte.

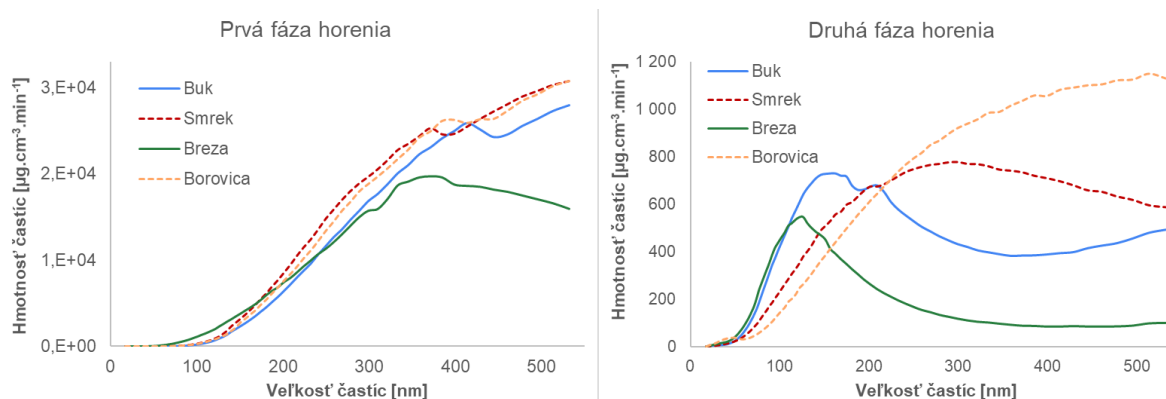


Obr. 91 Koncentračná mapa spaľovacích cyklov pri porovnávaní jednotlivých palív spoločne s priebehom vybraných teplôt meraných na krbe.

Ako je poznamenané v úvodnej časti tejto práce, teplota spaľovacieho procesu a plôch, ktorými spaliny prechádzajú, do značnej miery ovplyvňuje účinnosť horenia prchavých látok. To nepriamo vplýva aj na produkciu jemných častíc nameraných v prúde spalín. Hľadali sme koreláciu priebehu teploty s koncentraciou jemných častíc v spalínách, ktorá by nám pomohla objasniť priebeh horenia z pohľadu exotermických dejov v spaľovacej komore. Na obrázku 91 dolu je zobrazený priebeh teplôt vybraných oblastí spaľovacieho zariadenia. Keď porovnáme teplotu plameňa ( $T_2$  - oheň) smreku a buku, vidíme, že horenie bukového dreva vykresľuje o niečo strmší nárast teploty v čase. V prípade smreku sú teploty plameňa o niečo nižšie ( $850 - 900\text{ }^\circ\text{C}$ ), no v porovnaní s bukom majú dlhšiu výdrž na vysokej teplote. Tento jav však môže byť spôsobený aj faktom, že tieto dva druhy biomasy majú rozdielnú hustotu dreva. Smrekové drevo s rovnakou hmotnosťou zabralo v spaľovacej komore o poznanie väčší objem než bukové. Horenie prebiehalo vo väčšej blízkosti ku termočlánkom umiestneným v ohnisku. Tiež sme pozorovali o niečo dlhšie plamene v prípade horenia smrekového dreva.



Obr. 92 Porovnanie priemerného množstva vyprodukovaných častíc za minútu v jednotlivých fázach horenia pre rôzne druhy dreva



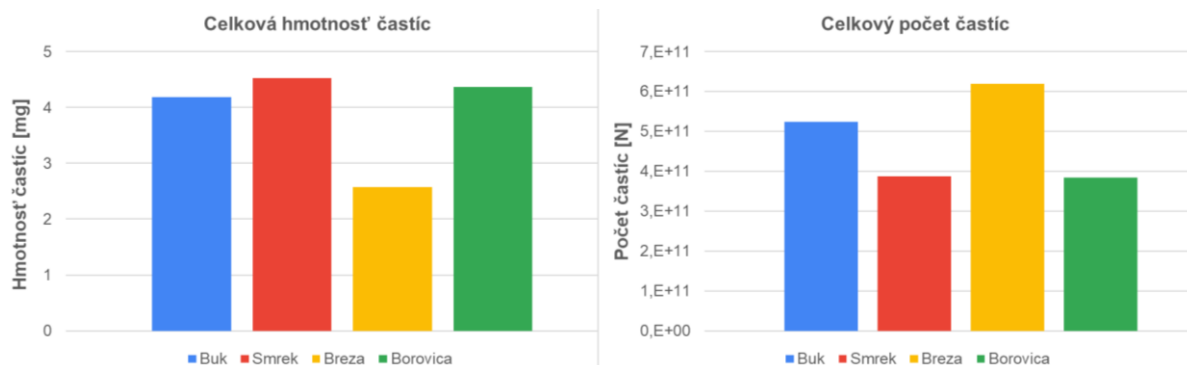
Obr. 93 Porovnanie priebehu hmotností vyprodukovaných častíc za minútu v jednotlivých fázach horenia pre rôzne druhy dreva

Pre každý druh paliva (buk, borovica, smrek a breza) sme spočítali priemernú produkciu jemných častíc v prvej i druhej fáze. Výsledky sú zobrazené na obrázku 92. V prvej fáze sa ukazuje, že buk i smrek produkujú takmer totožnú veľkostnú distribúciu v podobnom koncentračnom rozsahu. Najvyššie koncentrácie sa objavujú pri veľkosti okolo 200 nm. Brezové drevo produkovalo v prvej fáze početne približne rovnaké koncentrácie, no s omnoho menšími časticami - s vrcholom približne 130 nm. Borovicové drevo pri horení uvoľňovalo v prvej fáze najnižšie koncentrácie v porovnaní s inými palivami.



Prechodom do druhej fázy sa znateľne mení veľkostná distribúcia v prípade všetkých štyroch použitých palív (obrázok 93, vpravo). Hlavným špecifikom je vysoký počet malých častíc s veľkosťou pod 100 nm. Bukové drevo sa vrcholom krivky veľkostnej distribúcie blíži práve ku 100 nm. Borovica má vysoké koncentrácie vo veľkostnom rozsahu do 50 nm. Podobne aj breza, ktorá má navyše ešte jeden vrchol vo veľkostnom spektre 100 nm.

Mierne odlišný priebeh je viditeľný pri prepočte na hmotnosť častíc. V prvej fáze sú krivky takmer totožné, s výnimkou brezového dreva (obrázok 93, vľavo). V druhej fáze každý materiál vykazuje individuálny priebeh. Je však potrebné poznamenať, že celkové hmotnostné koncentrácie sú o viac než jeden rád nižšie, čo je dané minimálnym počtom častíc väčších veľkostí.



Obr. 94 Porovnanie celkovej hmotnosti a počtu vyprodukovaných častíc, ktoré prešli prístrojom SMPS za jeden cyklus pri spaľovaní jednotlivých druhov paliva o hmotnosti 2 kg

Nakoniec sme porovnali celkové množstvo vyprodukovaných častíc (prvá + druhá fáza horenia), a to ich celkovú hmotnosť i celkový počet. Sú to častice, ktoré vznikli za jeden cyklus horenia daného druhu paliva, a prešli prístrojom SMPS, vynásobené objemovým prietokom prístroja. Výsledné hodnoty sú zobrazené v diagramoch na obrázku 94.

Uvedené porovnanie jasne ukazuje, že neexistuje priama úmera medzi množstvom vyprodukovaných častíc a ich hmotnosťou. Dokonca, v prípade smrekového, brezového a borovicového dreva sledujeme, že dreviny s väčšou hmotnosťou jemných častíc, vykazujú v bilancií počtu častíc najnižšie hodnoty a naopak.

## 9 Ďalšie merania súvisiace s analýzou jemných častíc

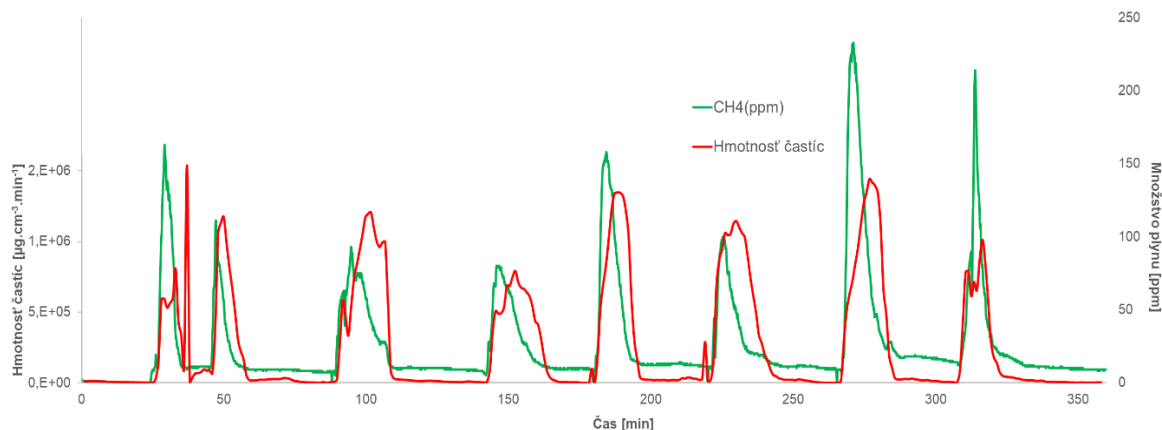
Popri jednotlivých experimentálnych spaľovaniach a meraniach jemných častíc prístrojom SMPS prebehli aj ďalšie doplňujúce merania podporujúce výskum problematiky tvorby jemných častíc spaľovaním biomasy. V nasledujúcich podkapitolách sú uvedené niektoré výsledky analýzy plynov v spalinách v súvislosti s tvorbou častíc, odber častíc pomocou impaktora DEKATI a výsledky analýzy elektrónovým mikroskopom SEM.

### 9.1 Analýza plynov

Počas meraní prebiehal odber vzorky spalín pre následnú analýzu prítomných plynných látok. Online meranie s okamžitou informáciou o množstve prítomného kyslíka nám pomohlo začať vždy nový cyklus spaľovania pri rovnakom množstve prítomného kyslíka v spalinách (spravidla 17 %).

Hľadali sme koreláciu prítomných plynov s produkciou jemných častíc. Práve množstvo oxidu uhľnatého a metánu v spalinách pomerne presne koreluje s celkovou hmotnosťou produkovaných

jemných částic v čase. Na obrázku 95 je vykreslená hmotnostná produkcia jemných částic v čase, spoločne s množstvom prítomného metánu v spalínách. Metán je jednou so zložiek prchavej horľaviny, ktorá sa uvoľňuje z paliva prevažne v prvej fáze horenia. Práve množstvo prchavej horľaviny, ako vieme, ovplyvňuje koncentráciu jemných částic v spalínách.



Obr. 95 Prítomnosť metánu v spalínách a celková hmotnosť zachytených jemných částic v čase

Z časového priebehu množstva prítomného metánu v spalínách v porovnaní s celkovou hmotnosťou nameraných jemných částic vidíme jasnú vzájomnú koreláciu. V prvej fáze každého cyklu rozoznávame prítomnosť metánu s maximálnou koncentráciou 1 – 2 %. Prechodom do druhej fázy prítomnosť metánu prudko klesá a v druhej fáze horenia sa ho objavuje iba stopové množstvo. Samotné častice nie je v bežných podmienkach domáceho spaľovania jednoduché merať. Cenovo dostupné čidlo metánu by však mohlo v prípade potreby detektor jemných částic aspoň čiastočne nahradiť.

## 9.2 Odber částic impaktorom DEKATI

Pre overenie priebehu veľkostí produkovaných jemných částic sme využili impaktor DEKATI. Ten využíva inú metódu zachytávania jemných částic, než je tomu v prípade SMPS. Meranie však neprebíha kontinuálne, ako to umožňuje prístroj SMPS, ale i z jedného merania dostávame zaujímavé výsledky. Môžeme tak navzájom porovnať výsledky týchto dvoch prístrojov.

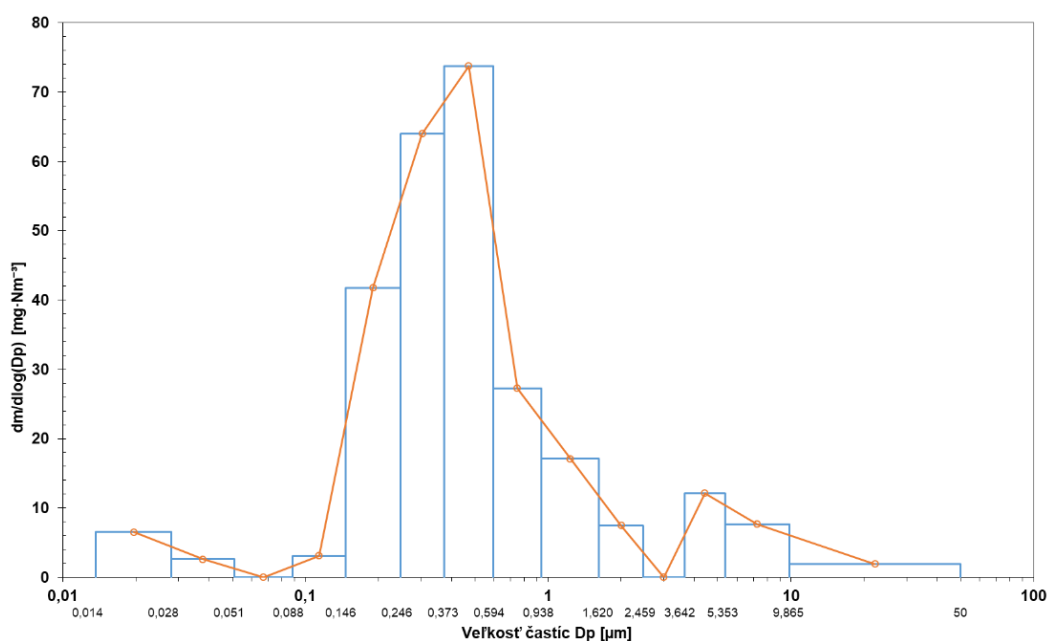


Obr. 96 Zachytené vzorky jemných částic na jednotlivých stupňoch impaktoru.

Na impakčné plochy sa naniesla vrstva vazelíny, aby sa zabránilo odrazu zachytených částic. Meranie prebiehalo s pripojenou ejektorovou riedičkou, riediacou spaliny s čistým vzduchom

v pomere 1 : 8,44. Odber prebiehal počas prvej fázy horenia bukového dreva po dobu 12 minút. Táto doba bola vhodná na to, aby sa na jednotlivé plochy impaktora zachytilo dostatočné množstvo vzorky. Ak by sa zachytilo menej, výsledky váženia by znížili presnosť, v prípade väčšieho množstva by sa zasa výsledky skreslili tým, že rýchlosť prúdenia v tryskách impaktora by sa menila, čím by sa menila i veľkosť zachytená na jednotlivých poschodiach. Na obrázku 96 je vidieť zachytené zhluky častíc odobraté na impaktor.

Na obrázku 97 je výsledná veľkostná distribúcia jedného z odberov na impaktor. Jednotlivé stĺpce reprezentujú hmotnosť častíc zachytených na jedno poschodie. Na každom z poschodí sme namerali istú hmotnosť, s výnimkou 0,06  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$ . Vidíme, že vrchol hmotnostnej veľkostnej distribúcie je približne pri veľkosti častíc 0,5  $\mu\text{m}$ . Tento priebeh odpovedá výsledkom nameraným prístrojom SMPS.



Obr. 97 Výsledky odberu jemných častíc impaktorom DEKATI

### 9.3 Častice zachytené mikroskopom a ich prvková analýza

Počas spaľovania v reálnych spaľovacích jednotkách boli vykonané odbery vzoriek na filtre s ich následnou analýzou pomocou skenovacieho elektrónového mikroskopu (SEM). Výsledky nám pomáhajú vizualizovať tvar zachytených častíc, ako aj ich chemické zloženie. Morfológia častíc nám pomáha lepšie pochopiť procesy vzniku a rastu častíc. Zachytáva zhluky častíc vzniknuté koaguláciou. Viaceré výsledky potvrdili rozdiely v sledovanom vývoji veľkostnej distribúcie častíc, najmä vo fázach rozdielných parametrov spaľovacieho procesu.

Na obrázkoch nižšie sú zobrazené snímky jednotlivých častíc (často zhlukov častíc) z odobratých vzoriek na polykarbonátové filtre pre jednotlivé spaľovacie jednotky. Na snímkach sú jasne viditeľné póry filtra spoločne so zachytenými časticami. Vykonaná bola aj analýza chemického zloženia na vybraných časticach metódou ICP OES (optickej emisnej spektrometrie s indukčne viazanou plazmou; *Inductively coupled plasma optical emission spectrometry*), ktorej výsledky sú zobrazené pomocou RTG spektra. Vybrané častice zachytené na filtri pomocou SEM sú označené ako „Spectrum xy“, kde „xy“ je číslo pod ktorým nájdeme prvkovú analýzu vybranej častice. Výsledky prvkovej analýzy sú zobrazené

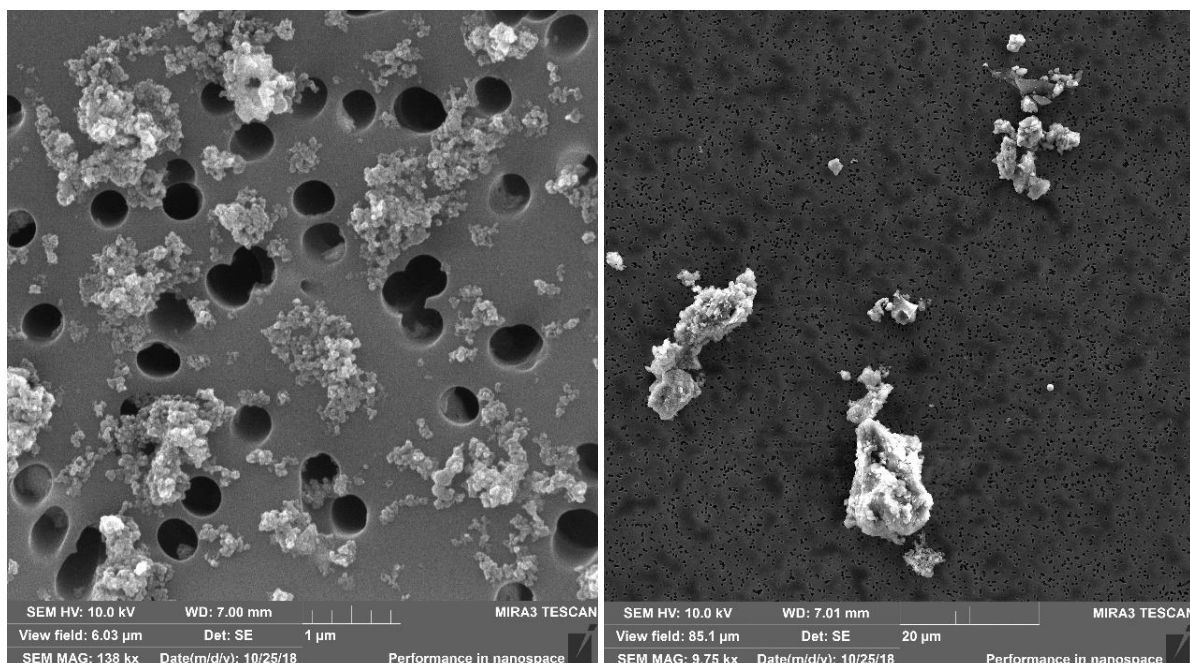
na obrázkoch 101 – 102. Príslušné číslo analyzovaného prvku je vpravo hore na každej snímke zobrazujúcej prvkový rozbor častice.

Pri analýze vzoriek metódou SEM (MIRA3, TESCAN Ltd.) je dôležité si zároveň uvedomiť obmedzenia sledovania morfológie častíc, pretože zobrazenie je dvojdimenzionálne. V súčasnej dobe však nemáme možnosť využiť metódu zobrazenia vzoriek v tretej dimenzii. Na prvkovú analýzu je tiež potrebná dostatočná veľkosť zachytenej častice. Napríklad, na zachytenom spektre 14 a 15 (obrázok 99 vľavo) boli už príliš malé častice pre prvkovú analýzu, a keďže bol signál zbieraný z filtra, nebolo možné vyhodnotiť výsledok.

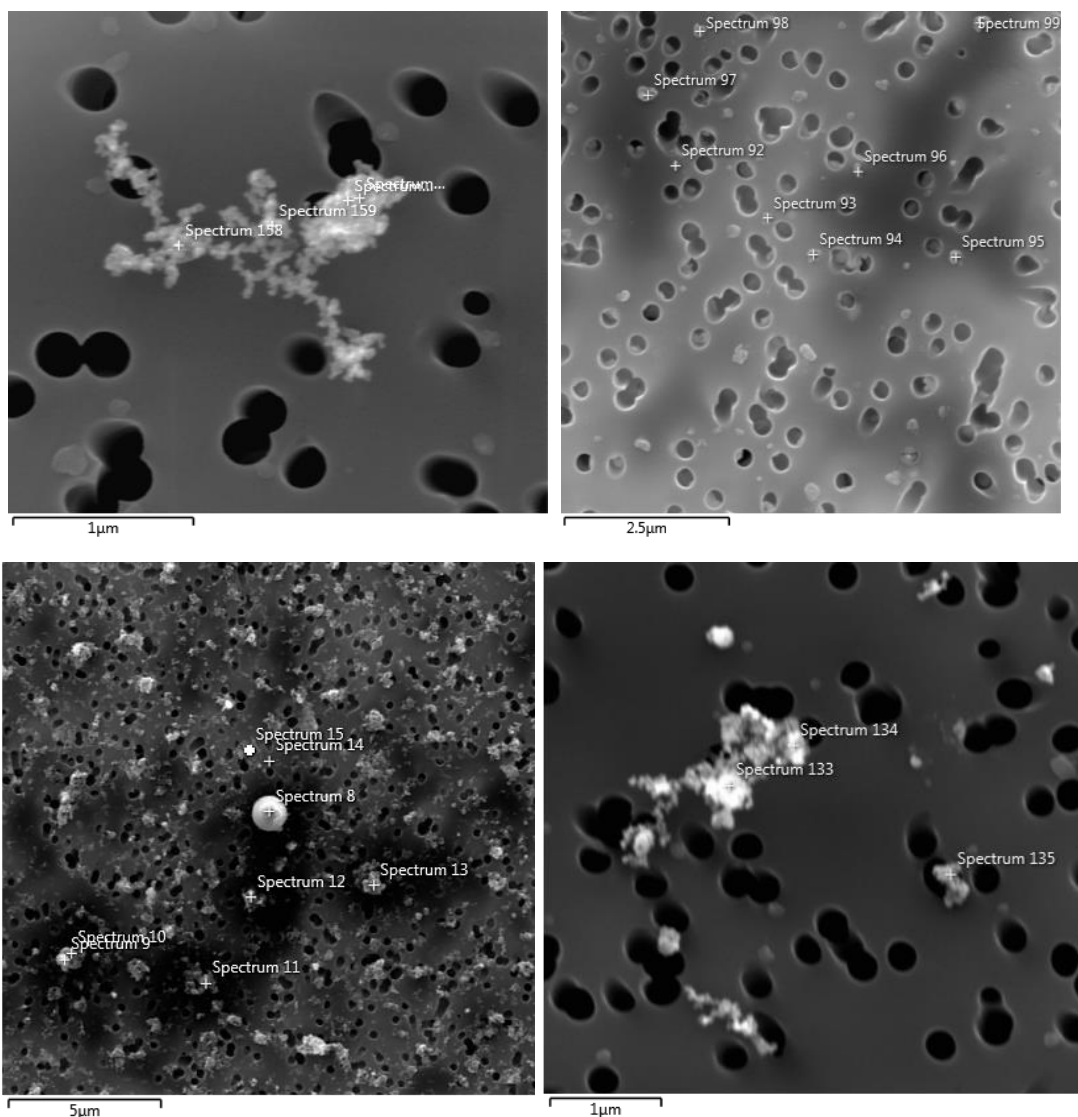
Na nasledujúcich obrázkoch sú uvedené fotografie z SEM, zachytávajúce morfológiu jemných častíc pochádzajúcich z procesu spaľovania biomasy, ktoré vytvára najprv malé ( $\leq 700$  nm) a následne väčšie zhluky ( $\leq 2,5$   $\mu\text{m}$ ) až po ustálenie podmienok spaľovania, kedy opäť dochádza k vzniku menších častíc a zhlukov. Počas spaľovania v kotle Gemos boli vzorky odobraté pri začiatku spaľovania drevených pilín. V priebehu spaľovacieho procesu dochádzalo ku intenzívnemu uvoľňovaniu malých častíc ( $< \text{PM}_{0,5}$ ) s vysokou koncentráciou. Sú zachytené výsledky z prvkovej analýzy v jednotlivých bodoch (na časticiach, často zhlukoch). Ďalej sú zobrazené snímky zachytených častíc na automatickom kotle Verner počas spaľovania drevených peliet.

Z celkových výsledkov prvkovej analýzy jednotlivých spektier metódou ICP OES vyplynulo, že najvyšší percentuálny podiel má uhlík (C), kyslík (O), ale aj kremík (Si), sodík (Na), draslík (K), horčík (Mg), vápnik (Ca) a zinok (Zn). O častici spektra 8 (obrázok 99) je možné uvažovať ako o sférickej častici, ktorá ale pravdepodobne nie je súčasťou vzniknutých spalín. Sú uvedené i ďalšie fotografie z vykonaných odberov a ich prvkové analýzy, ktoré potvrdzujú najvyššie zastúpenie C, O, Si, Na a K.

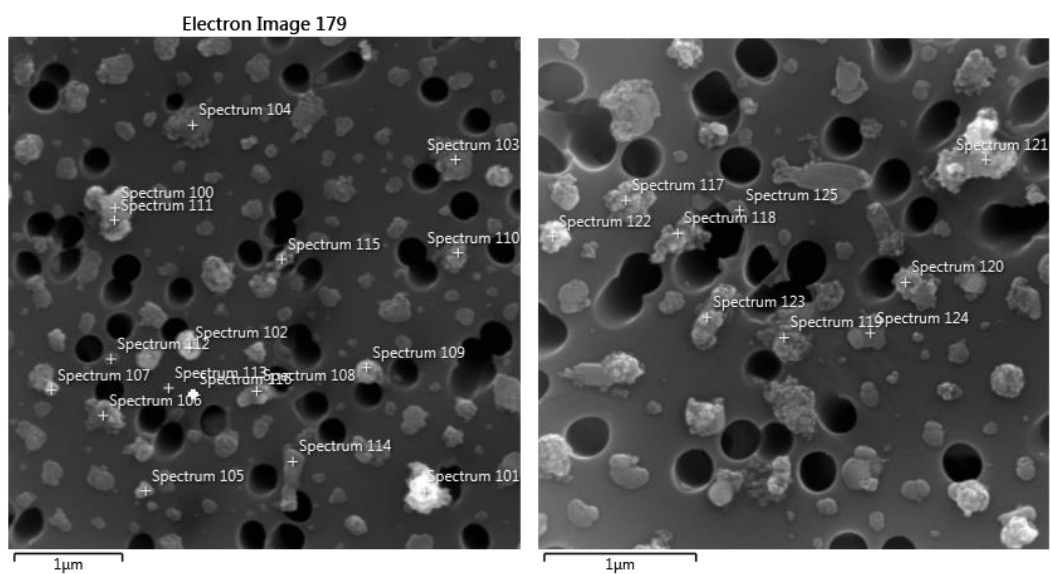
Z hľadiska vplyvu dynamiky spaľovania na morfológiu častíc bolo zistené, že predovšetkým v počiatočnej fáze spaľovacieho procesu vznikajú častice menšie ako  $\text{PM}_{0,5}$ , konkrétne 1 - 400 nm. S narastajúcou koncentráciou dochádza ku intenzívnejšiemu zhlukovaniu týchto častíc, ktoré tak následne získavajú väčšie rozmery.



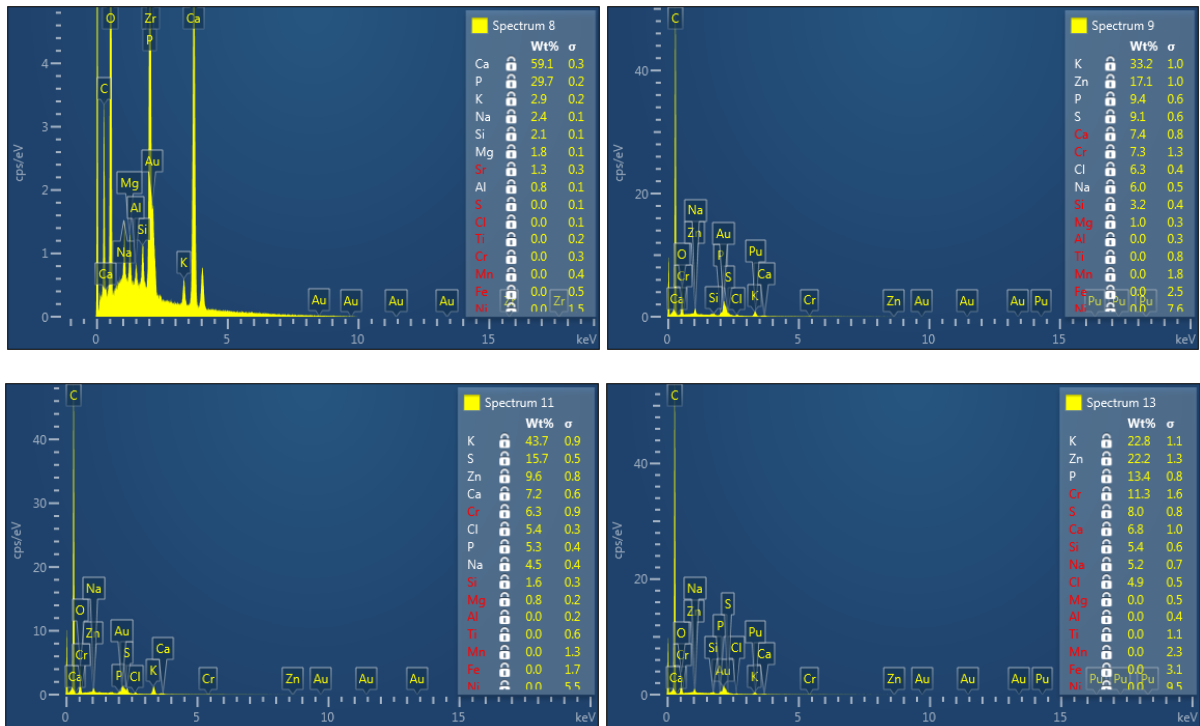
Obr. 98 Ukážka zhlukov častíc vzniknutých pri spaľovaní drevených peliet



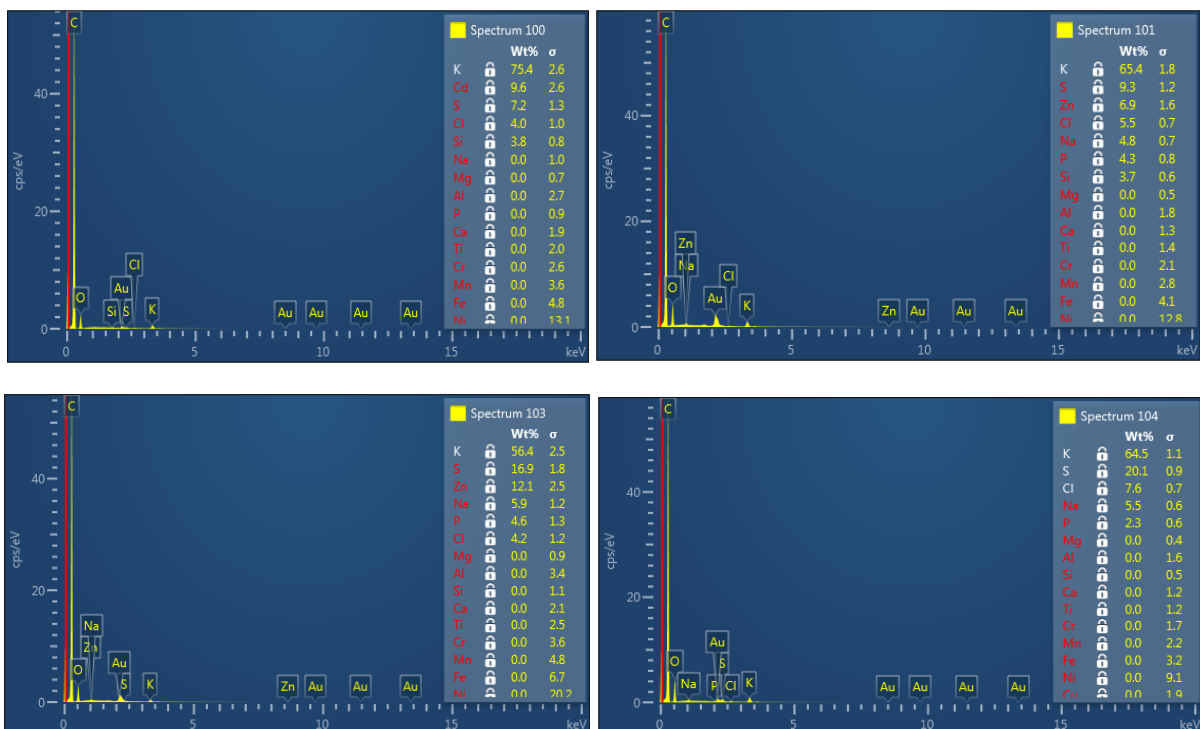
Obr. 99 Snímka analyzovaných částic pomocou SEM (MIRA3, Ltd.) zachytených zo spalín kotla Gemos



Obr. 100 Snímka analyzovaných částic SEM, nachádzajúcich sa v spalínach kotla Verner



Obr. 101 Výsledky prvkovej analýzy na jednotlivých spektrách odobranej vzorky spalín kotla Gemos



Obr. 102 Výsledky prvkovej analýzy vybraných částic s príslušným označením odobranej vzorky spalín kotla Verner

## 10 Vyhodnotenie dosiahnutých výsledkov

Na základe vyššie uvedených experimentálne nameraných výsledkov boli určené parametrické závislosti tvorby jemných častíc osobitne pre automatické kotle a pre krb s ručným prikladaním. Každé z meraní prebehlo s určitou presnosťou. Na základe štatistických dát sú zhrnuté čo najpresnejšie výsledky zohľadňujúce vplyv jednotlivých parametrov. Ak porovnáme nami dosiahnuté výsledky so závermi iných, zahraničných autorov, uvedených v rešeršnej časti tejto práce, môžeme konštatovať, že namerané koncentrácie jemných častíc sú vzájomne porovnateľné. Napríklad, autori Weimer a spol. uvádzajú koncentráciu jemných častíc a ďalšie hodnoty pre vybrané druhy drevín. Z ich výsledkov je zrejmé, že koncentrácia jemných častíc produkovaných spaľovacím procesom pri danej fáze horenia. Hodnoty sa pohybujú v rozmedzí  $3 \cdot 10^6$  –  $1,8 \cdot 10^8$ , čo je takisto porovnateľné s našimi nameranými hodnotami [62].

Zo spaľovacích skúšok na automatických spaľovacích jednotkách je zrejmé, že agro-pelety produkovali o niečo viac častíc, než drevené pelety. V porovnaní so spaľovacím zariadením Verner, pri kotle EkoScroll bola produkcia častíc výrazne nižšia. Pre krb s ručným prikladaním nebolo možné jednotlivé trendy veľkostnej distribúcie jemných častíc vyjadriť prehľadne graficky, preto sú uvedené v tabuľke. Na základe celkového počtu a celkovej hmotnosti nameraných jemných častíc je percentuálne vyjadrené, ako zmena jednotlivých parametrov spaľovacieho procesu ovplyvňuje tvorbu jemných častíc v meranom veľkostnom rozsahu. V nasledujúcich kapitolách uvádzame jednotlivé experimentálne zistené trendy pre vybrané parametre.

### 10.1 Porovnanie automatických spaľovacích zariadení

Pre automatické kotle bol nameraný vplyv teploty spaľovacej komory a vplyv použitého paliva na tvorbu jemných častíc. Keď porovnáme medzi sebou jednotlivé spaľovacie zariadenia, dokážeme určiť trend použitej emisnej triedy kotla. Na základe výhrevnosti jednotlivých peliet môžeme predpokladať trend tvorby jemných častíc v závislosti na použítom palive. Na obrázku 103 vyjadrujeme závislosť početnej veľkostnej distribúcie na jednotlivých parametroch pomocou regresných polynómov 3. stupňa vo forme uvedenej v rovnici 10.1:

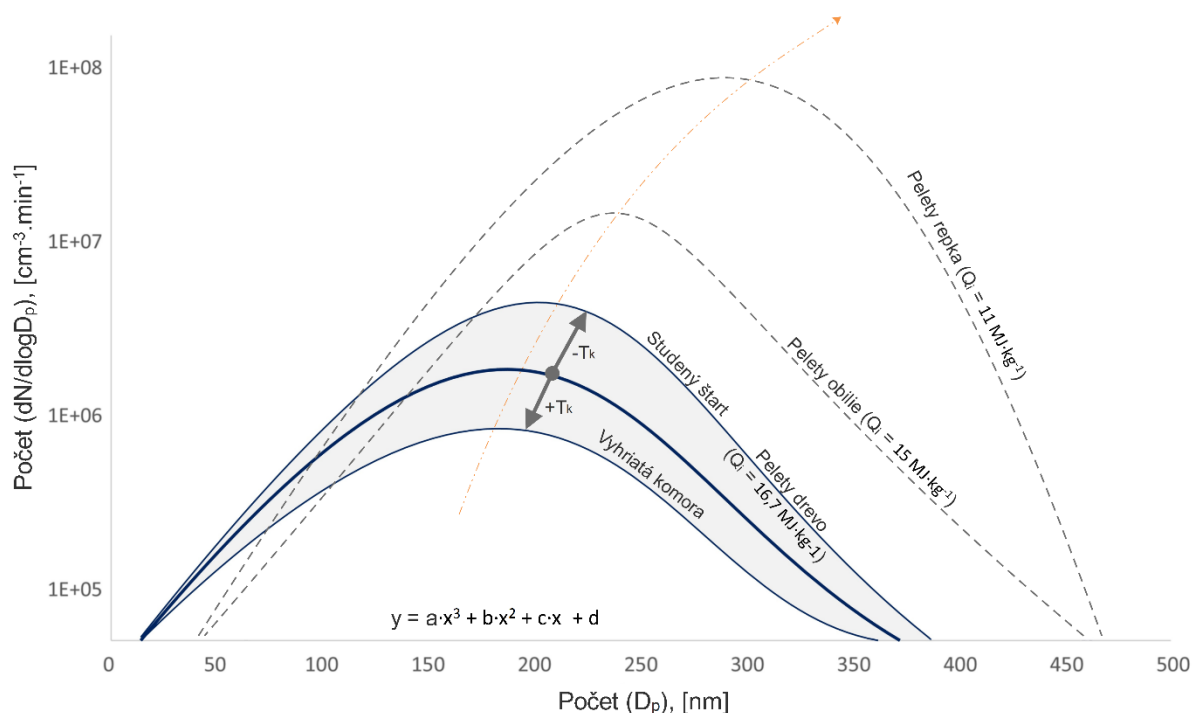
$$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d \quad (10.1)$$

kde  $y$  vyjadruje počet nameraných jemných častíc vo veľkostnom rozsahu 18 – 550 nm, a  $x$  je veľkosť častíc. Koeficienty  $a$ ,  $b$ ,  $c$  a  $d$  pre drevené, obilné a repkové pelety sú uvedené v tabuľke 15. Hodnotu spoľahlivosti regresnej polynomickej funkcie označujeme  $R^2$ .

Tab. 15 Hodnoty koeficientov  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , a  $R^2$ , ktorými sú vyjadrené jednotlivé polynómy

Polynóm $y$	$a$	$b$	$c$	$d$	$R^2$
Pelety drevo	0,1151	-121,81	35594	-2E+06	0,8654
Pelety obilie	0,3287	-368,43	105600	-3E+06	0,5892
Pelety repka	6,1813	-5613,9	1E+06	-3E+07	0,5752

Okrem porovnania veľkostnej početnej distribúcie jemných častíc rôznych druhov palív, naznačujeme trendy distribúcie pri zmene teploty spaľovacej komory. Prerušovanou čiarou je tiež naznačený posun vrcholu pri zvýšení a znížení početnej veľkostnej distribúcie. Pri vyšších koncentráciách sa krivka posúva vpravo smerom ku väčším ekvivalentným priemerom častíc.



Obr. 103 Zobrazenie experimentálne zistených distribučných kriviek jemných častíc pre automatické kotle.

## 10.2 Porovnanie výsledkov manuálneho spaľovacieho zariadenia

V spaľovacom zariadení s ručným prikladaním paliva nebolo jednoduché graficky vyjadriť všetky sledované parametre, ako sme uviedli v prípade automatických kotlov. Každý z parametrov, uvedených v kapitole 8, vplýva na tvorbu jemných častíc. V tabuľke 16 je uvedené zhrnutie pozorovaných trendov v produkcii jemných častíc spoločne s percentuálnym vyjadrením zmeny daného parametra.

Tab. 16 Experimentálne zistené trendy produkcie jemných častíc v spalinách manuálneho spaľovacieho zariadenia

Sledovaný parameter	Pôvodná hodnota	Konečná hodnota	Počet jemných častíc [N.cm <sup>-3</sup> .min <sup>-1</sup> ]			Hmotnosti jemných častíc [μg.m <sup>-3</sup> .min <sup>-1</sup> ]		
			Pôvodná	Konečná	Zmena	Pôvodná	Konečná	Zmena
Prechod z I. do II.	I. fáza	II. fáza	9,0E+07	1,2E+07	-86 %	7,5E+05	3,0E+03	-99 %
Zvýšenie ťahu	12 Pa	23 Pa	3,9E+07	4,7E+07	+21 %	2,7E+05	3,3E+05	+20 %
Zníženie ťahu	12 Pa	6 Pa	3,9E+07	5,1E+07	+32 %	2,7E+05	4,0E+05	+44 %
Zvýšenie T <sub>komory</sub>	677 °C	820 °C	1,8E+07	1,0E+07	-40 %	6,7E+03	3,7E+03	-45 %
Zvýšenie T <sub>TV</sub> v I.	120 °C	217 °C	5,2E+07	3,0E+07	-26 %*	6,4E+04	5,3E+04	-8 %*
Zvýšenie T <sub>TV</sub> v II.	151 °C	243 °C	1,4E+07	9,5E+06	-19 %*	5,2E+03	3,0E+03	-25 %*
Zvýšenie T <sub>SV</sub>	420 °C	456 °C	2,0E+07	1,6E+07	-23 %	6,7E+03	5,1E+03	-24 %
Povrch paliva	0,5 m <sup>3</sup>	1,2 m <sup>3</sup>	5,7E+06	1,1E+07	+93 %	3,6E+05	5,1E+05	+39 %

\* - Meranie je porovnaním tvorby častíc počas jedného meraného cyklu, preto je v percentuálnom vyjadrení započítaný prirodzený pokles súvisiaci s vyháráním paliva ako je uvedené v kapitole 8.4.1.

I. – prvá fáza horenia; II. – druhá fáza horenia; T<sub>TV</sub> – teplota terciárneho vzduchu; T<sub>SV</sub> – teplota sekundárneho vzduchu.

Uvedené hodnoty prehľadne vyjadrujú vplyv jednotlivých prevádzkových parametrov pri spaľovaní biomasy na tvorbu jemných častíc. Najvýznamnejšou zmenou počas horenia paliva



v spaľovacom zariadení s ručným prikladáním kusového dreva je prechod z prvej fázy horenia do druhej v rámci jedného cyklu. Je to prirodzený dej, daný dynamikou spaľovacieho procesu, ktorý nie je ovplyvňovaný užívateľom spaľovacieho zariadenia. Užívateľ môže ovplyvniť parametre ako napríklad geometriu spaľovaného paliva, čo je parameter významne ovplyvňujúci najmä počet vzniknutých jemných častíc. Zníženie ťahu komína z odporúčanej hodnoty 12 Pa na polovicu vedie ku značnému zvýšeniu produkcie jemných častíc, najmä väčších veľkostí.

Ukazuje sa, že zvýšenie teploty spaľovacej komory má značný vplyv na zníženie tvorby jemných častíc. Najvýznamnejší rozdiel z hľadiska teploty je pri studenom a teplom rozháraní priloženého paliva. Pre zníženie produkcie jemných častíc počas spaľovania biomasy je nevyhnutné, aby povrchová teplota stien spaľovacej komory bola dostatočne vysoká. Vo vyhriatej spaľovacej komore sa tvorí menší počet častíc ako v komore so studenými stenami. Predohrev vzduchu, či už sekundárneho alebo terciárneho, zvyšuje efektivitu spaľovania prchavej horľaviny uvoľnenej z paliva, čím sa znižuje množstvo vzniknutých častíc nameraných v spalínovode.

Na základe týchto experimentálne zistených trendov je možné vhodnou kombináciou prevádzkových parametrov prispieť ku celkovému zníženiu tvorby jemných častíc v spalínách biomasových kotlov. Zvlášť v prípade krbu s manuálnym prikladáním paliva je efektivita spaľovacieho procesu, a s ňou súvisiaca tvorba jemných častíc, z veľkej časti závislá na obsluhu. Spôsob prikladania, použité palivo, nastavenie prívodu spaľovacieho vzduchu, ako aj ťahu komína, sú čiastkové parametre, ktorých správnu synchronizáciou a porozumením jednotlivých vplyvov na tvorbu emisií, je možné prispieť ku čistote ovzdušia.

## 11 Záver

Malé domáce spaľovacie jednotky sú významným prispievateľom ku celkovému znečisteniu ovzdušia. Spaľovaním biomasy vznikajú jemné častice s veľkosťou do 1  $\mu\text{m}$ , ktoré majú schopnosť deponovať v respiračnom trakte človeka. Cieľom tejto práce bolo popísať tvorbu jemných častíc skúmaním vplyvov jednotlivých prevádzkových parametrov spaľovacieho procesu v kotloch na biomasu. V rešeršnej časti práce bola preto spracovaná problematika tvorby častíc, ich rozdelenie, vplyv na zdravie človeka, ako aj súčasné limity dané legislatívou. Boli tiež zhrnuté aktuálne dostupné vedomosti týkajúce sa tejto problematiky. Vďaka pokročilým technológiám je dnes možné čoraz presnejšie merať koncentráciu a veľkostnú distribúciu jemných častíc. Vďaka chemickej analýze sme schopní určiť ich pôvod a vznik.

V experimentálnej časti práce sú uvedené výsledky spaľovacích skúšok. Merali sa jemné častice v rozsahu 18 – 550 nm. Produkcia častíc bola vyhodnotená na základe ich veľkosti, počtu, ako aj celkovej hmotnosti. V laboratórnych podmienkach bol pomocou termogravimetrickej analýzy skúmaný vplyv teploty, množstva kyslíka a geometrie spaľovanej vzorky na produkciu jemných častíc. Na automatických kotloch spaľujúcich biomasu bol skúmaný vplyv rôznych druhov paliva a teploty spaľovacej komory. Ukázala sa závislosť množstva vyprodukovaných jemných častíc na kvalite a výhrevnosti paliva. Studené steny spaľovacej komory majú za následok intenzívnejšiu tvorbu jemných častíc. Pri spaľovaní v dobre zahriatej spaľovacej komore bol pri peletách z rôzneho materiálu pozorovaný iba malý rozdiel v produkcii jemných častíc.

Väčšina spaľovacích skúšok, s cieľom sledovať vplyv prevádzkových parametrov na tvorbu častíc, prebehla na spaľovacom zariadení s ručným prikladaním kusového paliva. Zistil sa významný vplyv fázy horenia paliva a korelácia tvorby jemných častíc s množstvom uvoľňovanej prchavej horľaviny. Sledoval sa vplyv teploty spaľovacej komory, spôsobu privádzania vzduchu a geometrie paliva. Potvrdilo sa, že pri vyššej teplote spaľovania dochádza ku zníženiu tvorby jemných častíc. Boli určené percentuálne zmeny celkového počtu a hmotnosti jemných častíc vplyvom sledovaných parametrov.

Spaľovanie biomasy v malých domácich kotloch je stále populárne. Zároveň je trendom chrániť životné prostredie a dbať na čistotu ovzdušia. Emisné limity sa neustále sprísňujú. Aj keď sa zatiaľ legislatívne priamo neobmedzuje koncentrácia častíc  $\text{PM}_{10}$ , vzhľadom ku zdravotným rizikám s nimi spojenými, je potrebné hľadať spôsoby, ako chrániť ovzdušie. Pre výrobcov spaľovacích zariadení je to výzva neustále zdokonaľovať konštrukciu kotlov. Domáci užívatelia krbov s ručným prikladaním zasa môžu svojim prístupom a správnym nastavením parametrov spaľovať čistejšie. Veríme, že aj táto práca pomohla objasniť vplyvy jednotlivých prevádzkových parametrov týkajúcich sa spaľovania biomasy na tvorbu jemných častíc a poskytla podnety pre ďalší výskum v uvedenej problematike.

## Zoznam použitých symbolov a skratiek

Symbol	Veličina / význam	Jednotka
BC	Čierny uhlík (Black Carbon)	
CCD	Zariadenie pre záznam obrazu (Charge-coupled device)	
CCN	Kondenzačné jadro (Cloud Condensation Nucleus)	
DTG	Derivácia termogravimetrickej krivky	
$D_p$	Ekvivalentný priemer častice	nm
EC	Elementárny uhlík (Elementar Carbon)	
EEA	Európska environmentálna agentúra	
FP	Jemné častice (Fine particles)	
ICP OES	Optická emisná spektrometria s indukčne viazanou plazmou	
LDH	laktátdehydrogenáza	
NP	Nanočastice (Nanoparticles)	
OC	Organický uhlík (Organic Carbon)	
PAH	Polycyklické aromatické uhľovodíky	
PM	Časticová hmota (Particulate Matter)	
$R^2$	Hodnota spoľahlivosti regresnej polynomickej funkcie	
SEM	Skenovací elektrónový mikroskop	
SMPS	Skenovanie veľkostí častíc na základe ich mobility	
SVOC	polo-prchavé organické zlúčeniny (Semi-Volatile Organic Compounds).	
TGA	Termogravimetrická analýza	
$T_k$	Teplota v spaľovacej komore	°C
$T_{sv}$	Teplota sekundárneho vzduchu	°C
$T_{tv}$	Teplota terciárneho vzduchu	°C
UFP	Ultrajemné častice (Ultrafine particles)	
VOC	prchavé organické zlúčeniny (Volatile Organic Compounds)	
WSOC	Vo vode rozpustný organický uhlík	
$\Delta p$	Podtlak v komíne (ťah komína)	Pa
I.	Prvá fáza horenia	
II.	Druhá fáza horenia	

## Zoznam zdrojov a použitej literatúry

- [1] BOUCHER, Olivier a Ulrike LOHMANN. The sulfate-CCN-cloud albedo effect. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology* [online]. 2017, **47**(3), 281-300 [cit. 2018-08-14]. DOI: 10.3402/tellusb.v47i3.16048. ISSN 1600-0889. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusb.v47i3.16048>
- [2] Aerosol Influence on Clouds (Cloud Albedo Effect): Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis. In: *Www.ipcc.ch: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007* [online]. Switzerland: C/O World Meteorological Organization, 2007 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-4-5.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-4-5.html)
- [3] MIKUŠKA, Pavel. *Atmosférické aerosoly*. Ústav analytické chemie AV ČR, v.v.i., Brno: <https://is.muni.cz/el/1431/podzim2015/C5150/um/Mikuska.pdf>, 2015.
- [4] HINDS, William. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. A Wiley-Interscience publication. ISBN 9780471194101.
- [5] Particle Size-Distribution. In: *The Deutscher Wetterdienst* [online]. Germany: The Deutscher Wetterdienst, 2013 [cit. 2018-08-15]. Dostupné z: [https://www.dwd.de/EN/research/observing\\_atmosphere/composition\\_atmosphere/aerosol/cont\\_nav/particle\\_size\\_distribution\\_node.html](https://www.dwd.de/EN/research/observing_atmosphere/composition_atmosphere/aerosol/cont_nav/particle_size_distribution_node.html)
- [6] G WATSON, John. *Measurement system evaluation for fugitive dust emissions detection and quantification* [online]. In: . s. 21 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/235341860\\_Measurement\\_system\\_evaluation\\_for\\_fugitive\\_dust\\_emissions\\_detection\\_and\\_quantification/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/235341860_Measurement_system_evaluation_for_fugitive_dust_emissions_detection_and_quantification/citation/download)
- [7] SIPPULA, OLLI. Fine particle formation and emissions in biomass combustion. *Report series in aerosol science*. 2010, **108**. ISBN 9525822141.
- [8] OBERNBERGER, Ingwald, Thomas BRUNNER a Georg BÄRNTHALER. Fine particulate emissions from modern Austrian small-scale biomass combustion plants. In: *Proceedings of the 15th European Biomass Conference & Exhibition*. 2007.
- [9] Emisní faktory a poměry částic PM<sub>10</sub> a PM<sub>2,5</sub> v TZL pro vypracování energetických posudků a auditů. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: Ministerstvo životního prostředí, 2012 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/cz/emisni\\_faktory\\_pomery\\_castic](https://www.mzp.cz/cz/emisni_faktory_pomery_castic)
- [10] *Composition of Dust Particles and Particulate Matter in The Air. Radon testing Dallas* [online]. <http://radontestingdallas.com/> [cit. 2018-07-10]. Dostupné z: <http://radontestingdallas.com/indoor-air-quality-testing-composition-dust-particles-particulate-matter/>
- [11] LONG, Christopher, Marc NASCARELLA a Peter VALBERG. Carbon black vs. black carbon and other airborne materials containing elemental carbon: Physical and chemical distinctions. *Environmental Pollution* [online]. 2013, **181**, 271-286 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.06.009. ISSN 02697491. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749113003266>

- [12] POPE, C. a Douglas DOCKERY. Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. 2012, **56**(6), 709-742 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1080/10473289.2006.10464485. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10473289.2006.10464485>
- [13] Air quality in Europe — 2015 report. *EEA* [online]. [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015>
- [14] BLAŽEK, JAROSLAV, IVANA SÝKOROVÁ a MARTINA HAVELCOVÁ. BLACK CARBON JAKO PRODUKT NE DOKONALÉHO SPALOVÁNÍ – VZNIK, VLASTNOSTI, VÝSKYT, STANOVENÍ. *Chemické-listy.cz* [online]. Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8: Chem. Listy 108, 2014 [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014\\_09\\_859-864.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2014_09_859-864.pdf)
- [15] KIRKEVÅG, A., T. IVERSEN, Ø. SELAND et al. Aerosol–climate interactions in the Norwegian Earth System Model – NorESM1-M. *Geoscientific Model Development* [online]. 2013, **6**(1), 207-244 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.5194/gmd-6-207-2013. ISSN 1991-9603. Dostupné z: <https://gmd.copernicus.org/articles/6/207/2013/>
- [16] SENGUPTA, Deep, Vera SAMBUROVA, Chiranjivi BHATTARAI et al. Light absorption by polar and non-polar aerosol compounds from laboratory biomass combustion. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2018, **18**(15), 10849-10867 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.5194/acp-18-10849-2018. ISSN 1680-7324. Dostupné z: <https://www.atmos-chem-phys.net/18/10849/2018/>
- [17] PENG, Xiaole, Qingju HAO, Tianxue WEN et al. Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in the Urban Area in Beibei, a Suburb of Chongqing. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2018, **18**(11), 2764-2774 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.4209/aaqr.2017.11.0450. ISSN 16808584. Dostupné z: <https://aaqr.org/articles/aaqr-17-11-maps-0450>
- [18] NOVAKOV, T., S. MENON, T. KIRCHSTETTER, D. KOCH a J. HANSEN. Aerosol organic carbon to black carbon ratios: Analysis of published data and implications for climate forcing. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2005, **110**(21), - [cit. 2018-08-10]. DOI: 10.1029/2005JD005977. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2005JD005977>
- [19] KUCBEL, Marek. *Formy výskytu uhlíku jako indikátory spalovacích procesů*. Ostrava, 2017.. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Vedoucí práce Raclavská Helena.
- [20] BOND, Tami. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2004, **109**(14), - [cit. 2018-08-10]. DOI: 10.1029/2003JD003697. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2003JD003697>
- [21] TURPIN, Barbara a James HUNTZICKER. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS. *Atmospheric Environment* [online]. 1995, **29**(23), 3527-3544 [cit. 2020-07-21]. DOI:

- 10.1016/1352-2310(94)00276-Q. ISSN 13522310. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/135223109400276Q>
- [22] LI, Weifang a Zhipeng BAI. Characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric fine particles in Tianjin, China. *Particuology* [online]. 2009, **7**(6), 432-437 [cit. 2020-07-21]. DOI: 10.1016/j.partic.2009.06.010. ISSN 16742001. Dostupné z:  
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1674200109001333>
- [23] MCMANUS, Marcelle a Caroline TAYLOR. Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems: The Role of Life Cycle Assessment. *Greenhouse Gases Balances of Bioenergy Systems* [online]. 1st. Elsevier, 2018 [cit. 2018-08-10]. DOI: 10.1016/B978-0-08-101036-5.00003-3. ISBN 9780081010365. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081010365000033>
- [24] BAHNER, Mark, Keith WEITZ a Alexandra ZAPAT. Use of Black Carbon and Organic Carbon Inventories for Projections and Mitigation Analysis. *Epa.gov* [online]. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs, Climate Change Division 1200 Pennsylvania Ave. NW (6207J) Washington, DC 20460: RTI International [cit. 2018-08-10]. Dostupné z: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei16/session3/k.weitz.pdf>
- [25] Suspendované částice (Aerosol). In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: ČHMÚ, 2005 [cit. 2018-08-16]. Dostupné z:  
[http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather\\_links/Pocasi/Navody/Znecistení/susp\\_castice.pdf](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Znecistení/susp_castice.pdf)
- [26] CAPASSO, L., M. GUALTIERI, E. LONGHIN et al. Biological effects of ultrafine particles from relevant emission sources: Diesel and biomass combustion. *Toxicology Letters* [online]. 2015, **238**(2), 315- [cit. 2018-08-15]. DOI: 10.1016/j.toxlet.2015.08.900. ISSN 03784274. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378427415028398>
- [27] WORLD HEALTH ORGANIZATION, a REGIONAL OFFICE FOR EUROPE. *Health effects of black carbon*. Copenhagen: World Health Organization, Regional Office for Europe, 2012. ISBN 9789289002653.
- [28] DRASTICHOVÁ, Vendula, Kamil KRPEC, Jiří HORÁK et al. *Emission of nanoparticles during combustion of waste biomass in fireplace* [online]. In: . s. 27-32 [cit. 2018-07-10]. DOI: 10.1063/1.4892701. Dostupné z: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4892701>
- [29] BRANDELET, Benoît, Christophe ROSE, Caroline ROGAUME a Yann ROGAUME. Investigation of the organic carbon ratio analysis on particles from biomass combustion and its evolution in three generations of firewood stoves. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2017, **99**, 106-115 [cit. 2018-08-09]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.03.002. ISSN 09619534. Dostupné z:  
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953417300892>
- [30] Státní zdravotní ústav. *Státní zdravotní ústav* [online]. Praha [cit. 2018-08-14]. Dostupné z:  
<http://www.szu.cz/>
- [31] Zdravotní důsledky a rizika znečištění ovzduší: Odborná zpráva za rok 2015. *Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva ČR ve vztahu k životnímu prostředí* [online].

- 2015, , 1-101 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne\\_zpravy/OZ\\_15/ovzdusi\\_2015.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne_zpravy/OZ_15/ovzdusi_2015.pdf)
- [32] PENTTINEN, Pasi, Marko VALLIUS, Pekka TIITTANEN, Juhani RUUSKANEN a Juha PEKKANEN. Source-Specific Fine Particles in Urban Air and Respiratory Function Among Adult Asthmatics. *Inhalation Toxicology* [online]. 2008, **18**(3), 191-198 [cit. 2018-08-09]. DOI: 10.1080/08958370500434230. ISSN 0895-8378. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08958370500434230>
- [33] MAJEWSKI, W. a Heinz BURTSCHER. Measurement of Ambient Diesel Aerosol: Aerosol Sampling and Analysis. In: *Dieselnet.com* [online]. 2013 [cit. 2018-08-14]. Dostupné z: [https://www.dieselnet.com/tech/measure\\_air.php](https://www.dieselnet.com/tech/measure_air.php)
- [34] Nanoparticles and the lung. In: *Nanopartikel.info* [online]. Frankfurt, Germany: Nanopartikel.info, 2020 [cit. 2020-07-23]. Dostupné z: <https://www.nanopartikel.info/en/nanoinfo/body-barriers/2388-nanoparticles-and-the-lung>
- [35] BÍROŠÍKOVÁ, Martina. *Čistenie ovzdušia od jemných častíc: Prezentácia k obhajobe SZZ*. Brno, 2020.
- [36] GALLI, C.L., V. GALBIATI, M. MARINOVICH, S. OZGEN, G. LONATI, P. FERMO, L. CORBELLA a E. CORSINI. In vitro assessment of the proinflammatory effects of biomass combustion generated ultrafine particles (UFP). *Toxicology Letters* [online]. 2015, **238**(2), 219- [cit. 2018-07-26]. DOI: 10.1016/j.toxlet.2015.08.648. ISSN 03784274. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378427415025874>
- [37] MARCHETTI, Sara, Eleonora LONGHIN, Rossella BENGALLI, Giorgio BUONANNO, Anita COLOMBO, Paride MANTECCA a Marina CAMATINI. Comparative biological effects induced in A549 cells by combustion-derived particles from different biomass sources. *Toxicology Letters* [online]. 2017, **280**, 265- [cit. 2018-07-27]. DOI: 10.1016/j.toxlet.2017.07.938. ISSN 03784274. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378427417312006>
- [38] Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší: Sběrka zákonů České republiky. In: *Sběrka zákonu* [online]. Česká republika: MŽP, 2012 [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24325>
- [39] Imisní limity podle zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. a vyhlášky o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích 330/2012 Sb.: Imisní limity pro ochranu zdraví a maximální počet jejich překročení. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. Praha: Český hydrometeorologický ústav [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity\\_CZ.html](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity_CZ.html)
- [40] Air quality in Europe - 2017 report: EEA Report No 13/2017. In: *EEA* [online]. EEA, 2017 [cit. 2018-08-17]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>

- [41] *Air Quality Standards* [online]. Europe: Environment Directorate General of the European Commission, 2020 [cit. 2020-07-29]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>
- [42] POLETTO, Matheus, Vincios PISTOR a Ademir J. Structural Characteristics and Thermal Properties of Native Cellulose. VAN DE VEN, Theo G.M., ed., Theo VAN DE VEN. *Cellulose - Fundamental Aspects* [online]. InTech, 2013 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.5772/50452. ISBN 978-953-51-1183-2. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/cellulose-fundamental-aspects/structural-characteristics-and-thermal-properties-of-native-cellulose>
- [43] SITEK, Tomáš. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-01-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/108967>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, FSI, Energetické inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [44] MOON, Robert, Ashlie MARTINI, John NAIRN, John SIMONSEN a Jeff YOUNGBLOOD. Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews* [online]. 2011, **40**(7) [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1039/c0cs00108b. ISSN 0306-0012. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c0cs00108b>
- [45] DOREZ, G., L. FERRY, R. SONNIER, A. TAGUET a J.-M. LOPEZ-CUESTA. Effect of cellulose, hemicellulose and lignin contents on pyrolysis and combustion of natural fibers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2014, **107**, 323-331 [cit. 2020-07-29]. DOI: 10.1016/j.jaap.2014.03.017. ISSN 01652370. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165237014000771>
- [46] CHEN, Hongzhang. *Biotechnology of lignocellulose: theory and practice*. EBook. New York: Chemical Industry Press, 2014. ISBN 9789400768970.
- [47] MOMENI, M., C. YIN, S. KÆR, T. HANSEN, P. JENSEN a P. GLARBORG. Experimental Study on Effects of Particle Shape and Operating Conditions on Combustion Characteristics of Single Biomass Particles. *Energy & Fuels* [online]. 2012, **27**(1), 507-514 [cit. 2018-07-10]. DOI: 10.1021/ef301343q. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/ef301343q>
- [48] MOCK, Chinsung, Hookyung LEE, Sangmin CHOI a Vasilije MANOVIC. Combustion Behavior of Relatively Large Pulverized Biomass Particles at Rapid Heating Rates. *Energy & Fuels* [online]. 2016, **30**(12), 10809-10822 [cit. 2018-07-24]. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.6b01457. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.6b01457>
- [49] RIAZA, Juan, Reza KHATAMI, Yiannis LEVENDIS, Lucía ÁLVAREZ, María GIL, Covadonga PEVIDA, Fernando RUBIERA a José PIS. Combustion of single biomass particles in air and in oxy-fuel conditions. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2014, **64**, 162-174 [cit. 2018-07-25]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.03.018. ISSN 09619534. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953414001366>
- [50] ZHANG, J.K., M.T. CHENG, D.S. JI, Z.R. LIU, B. HU, Y. SUN a Y.S. WANG. Characterization of submicron particles during biomass burning and coal combustion periods in Beijing, China. *Science of The Total Environment* [online]. 2016, **562**, 812-821 [cit. 2018-08-16]. DOI:



- 10.1016/j.scitotenv.2016.04.015. ISSN 00489697. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969716306969>
- [51] XU, Yue, Yan WANG, Yingjun CHEN, Chongguo TIAN, Yanli FENG, Jun LI a Gan ZHANG. Characterization of fine and carbonaceous particles emissions from pelletized biomass-coal blends combustion: Implications on residential crop residue utilization in China. *Atmospheric Environment* [online]. 2016, **141**, 312-319 [cit. 2018-08-16]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.06.073. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231016305143>
- [52] ZOSIMA, Angela a Maria OCHSENKÜHN-PETROPOULOU. Characterization of the Particulate Matter and Carbonaceous Particles Produced by Biomass Combustion. *Analytical Letters* [online]. 2015, **49**(7), 1102-1113 [cit. 2018-07-26]. DOI: 10.1080/00032719.2015.1052970. ISSN 0003-2719. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00032719.2015.1052970>
- [53] TORVELA, T., J. TISSARI, O. SIPPULA, T. KAIVOSOJA, J. LESKINEN, A. VIRÉN, A. LÄHDE a J. JOKINIEMI. Effect of wood combustion conditions on the morphology of freshly emitted fine particles. *Atmospheric Environment* [online]. 2014, **87**, 65-76 [cit. 2017-07-10]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.01.028. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231014000454>
- [54] LAMBERG, Heikki, Kati NUUTINEN, Jarkko TISSARI et al. Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion. *Atmospheric Environment* [online]. 2011, **45**(40), 7635-7643 [cit. 2017-07-10]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.072. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S135223101100255X>
- [55] TISSARI, Jarkko, Kati HYTÖNEN, Olli SIPPULA a Jorma JOKINIEMI. The effects of operating conditions on emissions from masonry heaters and sauna stoves. *Biomass and Bioenergy* [online]. 2009, **33**(3), 513-520 [cit. 2018-08-16]. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.009. ISSN 09619534. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953408002067>
- [56] SARNAT, Jeremy, Amit MARMUR, Mitchel KLEIN et al. Fine Particle Sources and Cardiorespiratory Morbidity: An Application of Chemical Mass Balance and Factor Analytical Source-Apportionment Methods. *Environmental Health Perspectives* [online]. 2008, **116**(4), 459-466 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1289/ehp.10873. ISSN 0091-6765. Dostupné z: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.10873>
- [57] GASTON, Cassandra, Felipe LOPEZ-HILFIKER, Lauren WHYBREW, Odelle HADLEY, Fran MCNAIR, Honglian GAO, Daniel JAFFE a Joel THORNTON. Online molecular characterization of fine particulate matter in Port Angeles, WA: Evidence for a major impact from residential wood smoke. *Atmospheric Environment* [online]. 2016, **138**, 99-107 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.05.013. ISSN 13522310. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231016303491>
- [58] HAYS, Michael, Philip FINE, Christopher GERON, Michael KLEEMAN a Brian GULLETT. Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions. *Atmospheric Environment* [online]. 2005, **39**(36), 6747-6764 [cit. 2019-01-03]. DOI:

- 10.1016/j.atmosenv.2005.07.072. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231005007247>
- [59] CHOW, Judith a John WATSON. Review of PM 2.5 and PM 10 Apportionment for Fossil Fuel Combustion and Other Sources by the Chemical Mass Balance Receptor Model. *Energy & Fuels* [online]. 2002, **16**(2), 222-260 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1021/ef0101715. ISSN 0887-0624. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ef0101715>
- [60] JEGUIRIM, Mejdí, Sophie DORGE a Gwenaëlle TROUVÉ. Thermogravimetric analysis and emission characteristics of two energy crops in air atmosphere: *Arundo donax* and *Miscanthus giganteus*. *Bioresource Technology* [online]. 2010, **101**(2), 788-793 [cit. 2019-01-03]. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.05.063. ISSN 09608524. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852409006324>
- [61] HATA, Mitsuhiko, Jiraporn CHOMANEE, Thunyapat THONGYEN, Linfa BAO, Surajit TEKASAKUL, Perapong TEKASAKUL, Yoshio OTANI a Masami FURUUCHI. Characteristics of nanoparticles emitted from burning of biomass fuels. *Journal of Environmental Sciences* [online]. 2014, **26**(9), 1913-1920 [cit. 2018-07-10]. DOI: 10.1016/j.jes.2014.07.005. ISSN 10010742. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1001074214000904>
- [62] WEIMER, S., M. ALFARRA, D. SCHREIBER, M. MOHR, A. PRÉVÔT a U. BALTENSPERGER. Organic aerosol mass spectral signatures from wood-burning emissions: Influence of burning conditions and wood type. *Journal of Geophysical Research* [online]. 2008, **113**(10) [cit. 2018-10-30]. DOI: 10.1029/2007JD009309. ISSN 0148-0227. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1029/2007JD009309>
- [63] NEUBERGER, Manfred, Hanns MOSHAMMER a Michael KUNDI. Declining ambient air pollution and lung function improvement in Austrian children. *Atmospheric Environment* [online]. 2002, **36**(11), 1733-1736 [cit. 2018-08-09]. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00179-6. ISSN 13522310. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231002001796>
- [64] Technické normy. In: *Tzb-info.cz* [online]. Praha: TZB-info, 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/normy>
- [65] KUBESA, Petr, Jiří HORÁK, Kamil KRPEC a František HOPAN. Emise prachu z malých spalovacích zařízení na tuhá paliva a metody jejich stanovení: Metody stanovení prachu z malých spalovacích zařízení. In: *TZB-info: vytapeni.tzb-info.cz* [online]. Praha: VŠB, TU Ostrava, Výzkumné energetické centrum, 2013 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/9536-emise-prachu-z-malych-spalovacich-zarizeni-na-tuha-paliva-a-metody-jejich-stanoveni>
- [66] BELYAEV, S.P. a L.M. LEVIN. Techniques for collection of representative aerosol samples. *Journal of Aerosol Science* [online]. 1974, **5**(4), 325-338 [cit. 2020-07-13]. DOI: 10.1016/0021-8502(74)90130-X. ISSN 00218502. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/002185027490130X>
- [67] SITEK, Tomáš. *Izokinetika.xlsx: Techniques for collection of representative aerosol samples*. 1. VUT v Brně, FSI, Energetický ústav, Odbor energetického inženýrství, 2020.

- [68] TSI.COM, . Rotating Disk Thermodiluter 379020A: Operation and service manual. In: *TSI Incorporated* [online]. Shoreview, Minnesota 55126 USA: TSI company, 2012 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.tsi.com/discontinued-products/rotating-disk-thermodiluter-379020a/>
- [69] BARON, Paul, Pramod KULKARNI a Klaus WILLEKE. *Aerosol measurement: principles, techniques, and applications*. 3rd ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-38741-2.
- [70] NEUBERGER, Manfred. Cancer in men from fibrous and non-fibrous mineral particles. *Journal of Aerosol Science* [online]. 1989, **20**(8), 1349-1351 [cit. 2018-08-09]. DOI: 10.1016/0021-8502(89)90834-3. ISSN 00218502. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021850289908343>
- [71] TSI Inc. *Tsi.com* [online]. [cit. 2017-08-17]. Dostupné z: <http://www.tsi.com/>
- [72] BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. Vyd. 1. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- [73] *Electrostatic Classifiers Series 3080: Operation and Service Manual*. 1st. U.S.A.: ©TSI Incorporated, 2009.
- [74] Palas Promo 2000. *Palas.de* [online]. Germany: Palas, 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.palas.de/en/product/promo2000>
- [75] Future Diesel Emission Limits: Particel Measurement Programme. *Slideserve.com* [online]. TSI.com, 2008 [cit. 2020-06-26]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/ellis/future-diesel-emission-limits>
- [76] MARTINA, BÍROŠÍKOVÁ. *Čištění ovzduší od jemných částic*. Brno: VUT v Brně, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124693>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [77] Dekati: Fine particle measurement solutions: Dekati.com. *Dekati Ltd.* [online]. Finland: dekati.com, 2019 [cit. 2019-05-08]. Dostupné z: <https://www.dekati.com/>
- [78] DLPI+: The DLPI+ (Dekati® Low Pressure Impactor). *Www.dekati.com* [online]. Finland: Dekati Ltd., 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://www.dekati.com/products/dlpi/>
- [79] Pioneer® Semi-Micro PX225D. <https://us.ohaus.com/> [online]. USA: OHAUS CORPORATION, 2020 [cit. 2020-06-30]. Dostupné z: <https://us.ohaus.com/en-US/Products/Balances-Scales/Analytical-Balances/Pioneer-Semi-Micro/Electronic-Balance-PX225D-AM>
- [80] Oddělení kvality ovzduší: Český hydrometeorologický ústav - Brno. *Ovzduši.cz* [online]. Brno: ČHMÚ - Brno, 2020 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://ovzduši.cz/onas/index.php>
- [81] Filter Cassette, Clear Styrene, 37 mm. *AIR SAMPLING SOLUTIONS & EXPERTISE* [online]. USA: skcinc.com, 2020 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: [https://www.skcinc.com/catalog/product\\_info.php?products\\_id=407](https://www.skcinc.com/catalog/product_info.php?products_id=407)

- [82] TESCAN MIRA: High-resolution analytical SEM for routine materials characterization, research and quality control applications at the sub-micron scale. *Tescan.com* [online]. Brno, CZ: TESCAN, 2019 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.tescan.com/product/sem-for-materials-science-tescan-mira/>
- [83] ABYSS® Syngas: Syngas Monitoring System. <https://www.aquagas.com.au> [online]. Currumbin, AU: ABYSS® Syngas, 2020 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <https://www.aquagas.com.au/environmental-monitoring-australia/emissions-and-process-gas/cems-and-process-analysers/abyss-syngas-analyser/>
- [84] *Rotating Disk Thermodiluter 379020A: OPERATION AND SERVICE MANUAL* [online]. U.S.A: www.tsi.com, 2012 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.tsi.com/discontinued-products/rotating-disk-thermodiluter-379020a/>
- [85] STA 449 F3 Jupiter. *NETZSCH-Gerätebau GmbH* [online]. Germany: NETZCH, 2020 [cit. 2020-06-27]. Dostupné z: <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/en/products-solutions/simultaneous-thermogravimetry-differential-scanning-calorimetry/sta-449-f3-jupiter/>
- [86] ŠPILÁČEK, Michal. *Experimental Investigation of Concentration and Size Distribution of Fine Combustion Particles Emitted by Small Biomass Boiler under Various Operation Conditions*. Brno University of Technology, Czech Republic, 2018.
- [87] Ekogalva Ekoscroll. *Ekoscroll.cz* [online]. Žďár nad Sázavou: Ekogalva s.r.o., 2020 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: [www.ekoscroll.cz](http://www.ekoscroll.cz)
- [88] Projekční podklady pro automatické kotle VERNER A251 a A501: VERNER a.s., *Kotle-verner.cz* [online]. Sokolská 321, 549 41 Červený Kostelec: VERNER, 2010 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/data/sharedfiles/3123/Projek%C4%8Dn%C3%AD%20podklady%20na%20A251%20a%20A501.pdf>
- [89] PAŽOUREK, Josef. *Jemné částice emitované při reálném spalování biomasy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018, 53 s.. BP. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [90] ABX, spol. s r.o. *ABX, spol. s r.o* [online]. Žitná 1091/3, 408 01 Rumburk: ABX, spol. s r.o, 2020 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.abx.cz>
- [91] Sensirion SDP sensors measure pressure but even a flow: Calibrated differential pressure sensors will find usage in industry and also in every smart home. *Soselectronic* [online]. Košice, SVK: [www.soselectronic.com](http://www.soselectronic.com), 2020 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.soselectronic.com/articles/sensirion/sensirion-sensirion-sdp-sensors-measure-pressure-but-even-a-flow-1440>
- [92] Super OMEGA CLAD™ XL: High Stability, SuperOMEGA CLAD™ XL Heavy Duty Transition Junction Probes. *Omega Engineering* [online]. Karviná, Česká Republika: JAKAR Electronics, spol. s r.o., 2019 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/>