



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**JEMNÉ ČÁSTICE PRODUKOVANÉ SPALOVACÍM  
PROCESEM**

FINE PARTICLES PRODUCED BY THE COMBUSTION PROCESS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Patrik Bunčeka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**

**BRNO 2019**



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	<b>Patrik Bunček</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

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

## **Jemné částice produkované spalovacím procesem**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

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

### **Cíle bakalářské práce:**

1. Stručně představit parametry ovlivňující vznik jemných částic.
2. Popsat použitou experimentální aparaturu.
3. Experimentálně stanovit koncentraci a velikostní distribuci částic emitovaných při spalování.

### **Seznam doporučené literatury:**

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

PAVELEK, M., Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 9788021443006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca je zameraná na problematiku jemných častíc. Úvodná kapitola sa venuje všeobecnému prehľadu, vzniku a dôsledku častíc na ľudský organizmus. Nasledujúce kapitoly sa venujú priblíženiu procesu spaľovania a využitia biomasy. Experimentálna časť sa zaoberá overením a určením závislosti tvorenia jemných častíc pre odlišné prostredia a podmienky.

### **Klíčová slova**

Jemné častice, spaľovací proces, biomasa

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with the issue of fine particles. The introductory chapter is focused on the general overview, formation and effect of fine particles on the human body. The following chapters aims to introduce combustion process and use of biomass. The experimental part of the thesis reports on results, evaluation and determination of fine particle formation for different environments and conditions.

### **Key words**

Fine particles, combustion process, biomass

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

BUNČEK, Patrik. *Jemné částice produkované spalovacím procesem* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117310>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, 33 s. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Jemné částice produkované spalovacím procesem* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád by som sa týmto poďakoval pánovi doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné rady, ktoré mi poskytol počas vypracovania bakalárskej práce. Moja vďaka patrí takisto pánovi Ing. Tomášovi Sitekovi za pomoc poskytnutú počas experimentálnych meraní.

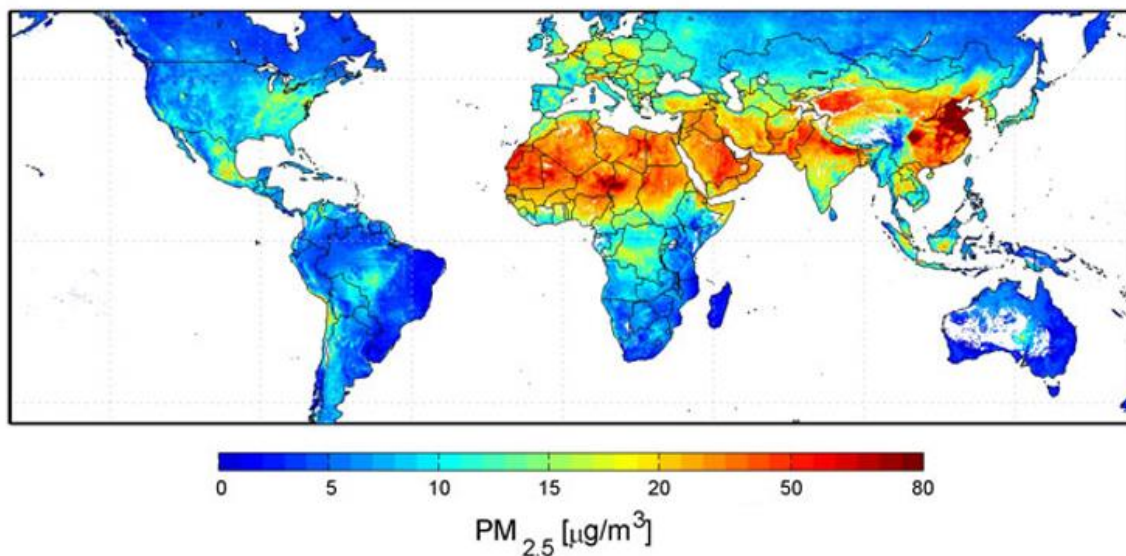
## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Pevné částice.....	12
2.1	Rozdělení.....	12
2.2	Vplyv jemných částic na lidský organizmus a životné prostredie.....	13
2.3	Rozloženie pevných částic v atmosfére na území České republiky.....	14
3	Spaľovací proces.....	16
3.1	Priebeh spaľovacieho procesu.....	16
3.2	Dokonalé a nedokonalé spaľovanie.....	17
3.3	Teplo.....	17
3.4	Výhrevnosť.....	17
4	Biomasa.....	19
4.1	Vznik a rozdelenie biomasy.....	19
4.2	Zloženie a výhrevnosť biomasy.....	21
5	Experimentálne meranie.....	22
5.1	Popis experimentálnej aparatury.....	22
5.2	Meranie pevných částic v kotolni.....	24
5.3	Meranie pevných částic grilu v reálnych podmienkach.....	25
5.4	Meranie pevných částic grilu v ideálnych podmienkach.....	28
6	Záver.....	31
7	Zoznam použitých zdrojov.....	32



## 1 Úvod

Problematika jemných částic a částic tvorených spaľovacím procesom je pomerne nová a ľudstvo sa ňou začalo zaoberať až nedávno. Pritom dôsledky spaľovacieho procesu, ako napríklad postupné znižovanie viditeľnosti, tvorenie smogu, zvýšenie výskytu pľúcnych problémov a ochorení, bolo možné pozorovať už od začiatku priemyselnej revolúcie koncom 18. storočia. Ako jedna z prvých organizácií, ktorá sa začala danou problematikou zaoberať, bola organizácia WHO. Kvôli neustálemu zvyšovaniu znečistenia ovzdušia bol zavedený index kvality ovzdušia. Index vyjadruje mieru znečistenia ovzdušia. Jedným z hlavných kritérií indexu kvality ovzdušia je práve koncentrácia pevných částic. Rizikový faktor rastie zo zvyšujúcim sa indexom.



Obrázok 1.1 – Satelitná mapa priemernej koncentrácie jemných částic [1]

Organizácii NASA vytvorila prvú využiteľnú satelitnú mapu priemernej koncentrácie pevných částic. Vytvorené údaje zo satelitnej mapy neboli také presné, ako údaje z pozemných staníc. Tieto dáta slúžili hlavne orientačne, a to pre rozvojové krajiny, u ktorých neboli doteraz tieto dáta dostupné. Pre takmer každý štát sa zaviedli povolené hodnoty koncentrácie pevných částic v ovzduší. Pri prekročení týchto hodnôt sa stávajú pevné částice nebezpečné a zdraviu škodlivé. V dnešnej dobe existuje niekoľko spôsobov merania pevných částic v ovzduší. Je možné sledovať priemernú, ale i aktuálnu koncentráciu pevných částic.

## 2 Pevné častice

Pevné častice, taktiež nazývané aerosól, sú častice mikroskopických veľkostí o priemere  $10 \div 0,1$  mikrometra ( $\mu\text{m}$ ), nachádzajúce sa v atmosfére. Ovplyvňujú každodenný život ľudí a majú nepriaznivý vplyv na človeka v podobe zdravotných komplikácií. Rizikový faktor na človeka určuje ich aerodynamický priemer, morfológia, ale i chemické zloženie. [2]

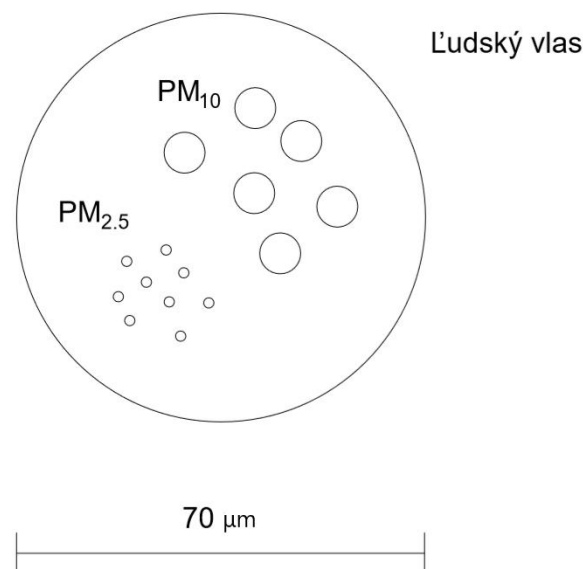
Pevné častice môžu vzniknúť prirodzene zo sopiek, prašných a morských buniek, z lesných požiarov alebo aj zapríčinením človeka, a to hlavne spaľovaním fosílnych palív a biomasy. Veľký podiel na vznik jemných častíc majú primárne zlúčeniny síry, dusíka a uhlíka, vznikajúce počas spaľovacieho procesu, ktoré ovplyvňujú hlavne tvar, veľkosť a zloženie jemných častíc. [3]

### 2.1 Rozdelenie

Pevné častice sa rozdeľujú na základe ich aerodynamického priemeru s označením  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{0,1}$ , ktoré vychádza z anglického výrazu particulate matter.[4]

Medzi hrubé častice patria častice s aerodynamickým priemerom  $10 \div 2,5 \mu\text{m}$ . Ich označenie vychádza z anglického slovného spojenia Particulate Matter ( $\text{PM}_{10}$ ). Vznikajú mechanickým rozdelením väčších častíc. Patria k nim hlavne prach, peľ, baktériové spóry, popolček, časti rastlín a hmyzu. [3]

Pevné častice s označením  $\text{PM}_{2,5}$  sú považované za jemné. Priemer týchto častíc je do  $2,5 \mu\text{m}$ . Ich vznik je podmienený kondenzáciou plynu na časticu, alebo koaguláciou (spojením) dvoch častíc do jednej. Špeciálnym prípadom sú ultrajemné častice, ktoré patria do tejto kategórie s označením  $\text{PM}_{0,1}$ . [5]



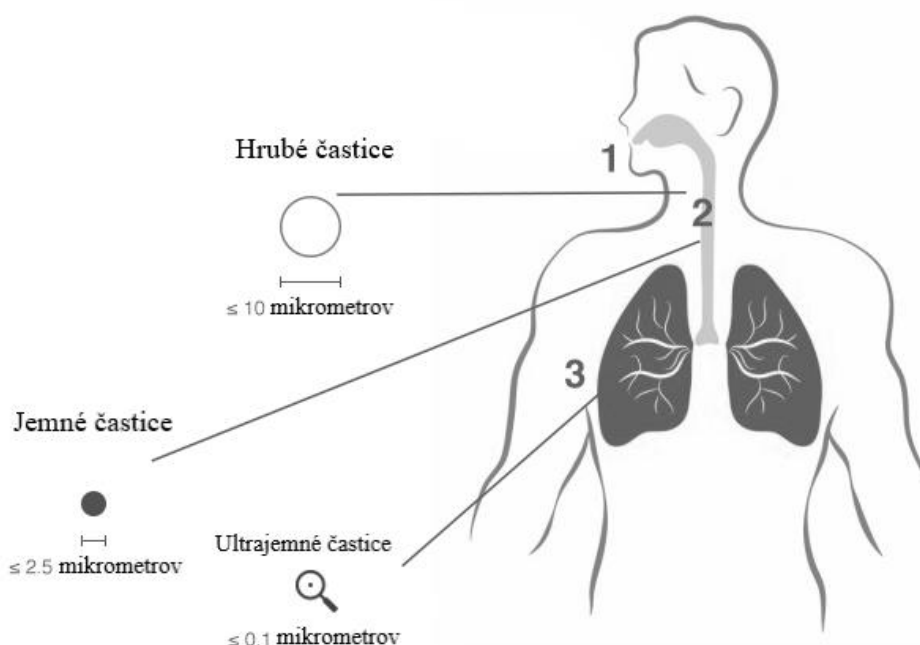
Obrázok 2.1 – Porovnanie jednotlivých veľkostí PM a ľudského vlasu

## 2.2 Vplyv jemných častíc na ľudský organizmus a životné prostredie

Nebezpečenstvo pevných častíc spočíva hlavne v ich veľkosti. Štúdie ukazujú, že pevné častice menších aerodynamických priemerov majú na ľudský organizmus kritickejší vplyv.

Jemné a ultrajemné častice majú schopnosť preniknúť do dýchacích ciest. Niektoré z nich sa dokážu dostať až do krvného obehu. Pri nadmernom vystavovaní sa týmto časticiam môže časom dochádzať k rôznym zdravotným problémom, akým je napr. kašeľ, astma, znížená funkčnosť pľúc, nepravidelný srdcový tep, môže dochádzať k sťaženiu dýchania, k infarktu myokardu, až ku predčasnej smrti u ľudí s pľúcnymi ochoreniami. Práve pre tento dôvod sa kladie veľký dôraz na množstvo jemných a ultrajemných častíc v ovzduší. [6]

V spojených štátoch amerických (USA) bol založený ústav priamo určený na monitorovanie pevných častíc vo vzduchu, vplyvu na ľudský organizmus a životné prostredie. Český hydrometeorologický ústav sleduje na celom území Českej republiky množstvo, koncentráciu a rozšírenie pevných častíc v ovzduší.



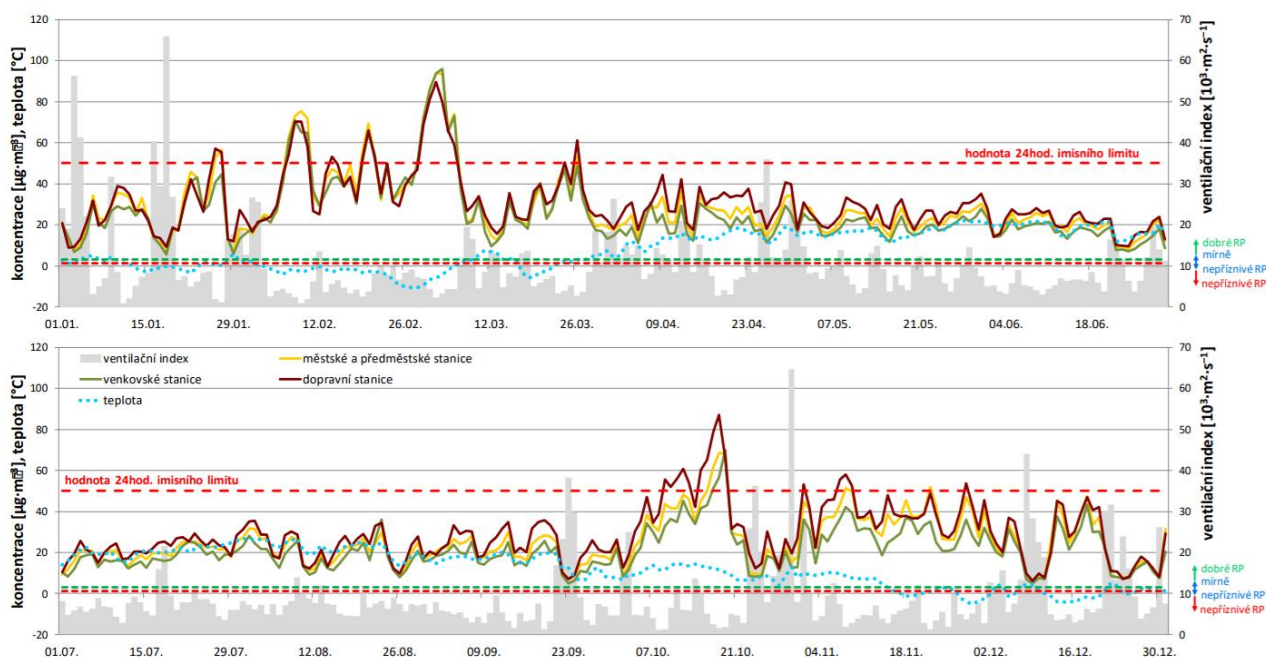
Obrázok 2.2 – Schopnosť dýchacieho systému ľudí zachytiť pevné častice [7]

Schopnosť prenášania jemných častíc pomocou prúdenia vzduchu a následné usadenie má veľký vplyv na životné prostredie. Táto vlastnosť častíc má za efekt zníženie výživy pôdy, poškodzovanie lesov, poľnohospodárskych plodín a narušanie rovnováhy ekosystému. Pevné častice sú jedným z hlavných dôvodov zníženia viditeľnosti. [6]

## 2.3 Rozloženie pevných častíc v atmosfére na území Českej republiky

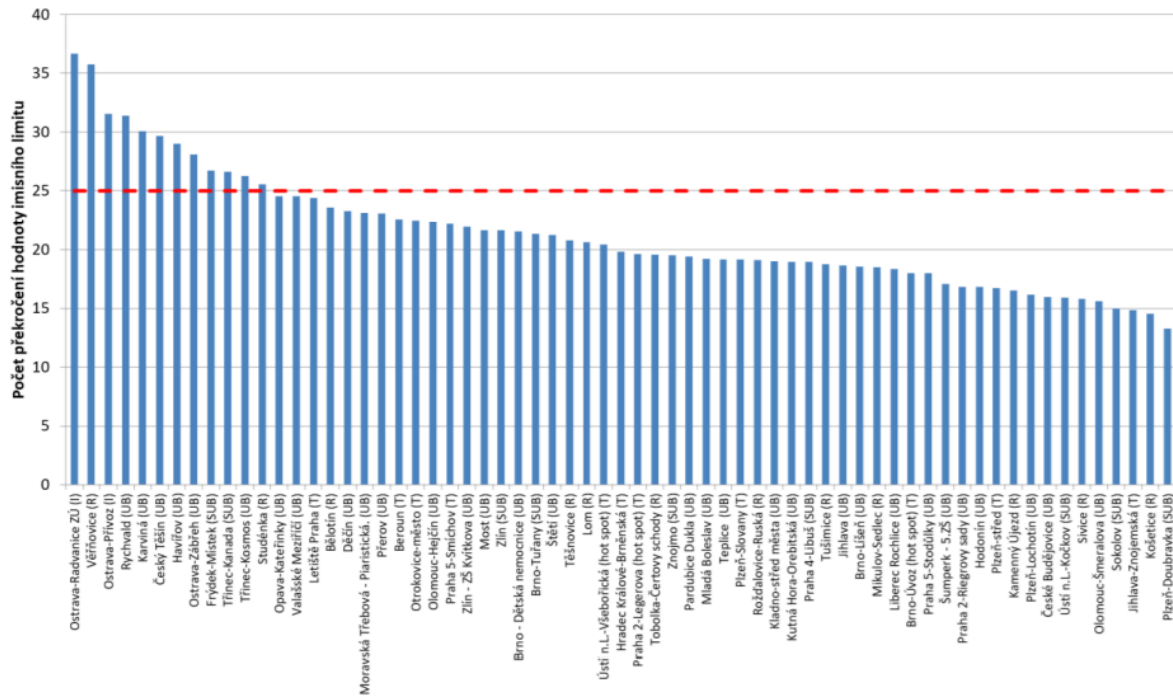
Najpoužívanější metoda merania pevných častíc v ovzduší je gravimetria (referenčná). Vychádza zo známeho prietoku nasávajúceho vzduchu z okolia. Tento vzduch ďalej prechádza filtrom, kde sa častice zachytia a daný filter sa následne odváži z čoho sa určí koncentrácia pevných častíc. Meranie zvyčajne trvá 24 h a nemôžeme sledovať koncentráciu PM v reálnom čase. Okrem gravimetrie existuje optická metóda, ktorá funguje na rozptyle svetla, a metóda založená na princípe  $\beta$  – žiarenia. [8]

Český hydrometeorologický ústav vydáva výročnú správu, kde sa zaoberá kvalitou ovzdušia a rozptylovými podmienkami. Kvalita ovzdušia sa posudzuje podľa koncentrácie pevných častíc a ďalších znečisťujúcich látok, ako  $O_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO_2$  s ohľadom na rozptylové podmienky ktoré vychádzajú z ventilačného indexu. Tento index zodpovedá súčinu výšky medzi atmosférami a priemernej rýchlosti vetra v nej. Pre presnosť merania sa využíva súčasne viacero metód merania PM v atmosfére. [9]

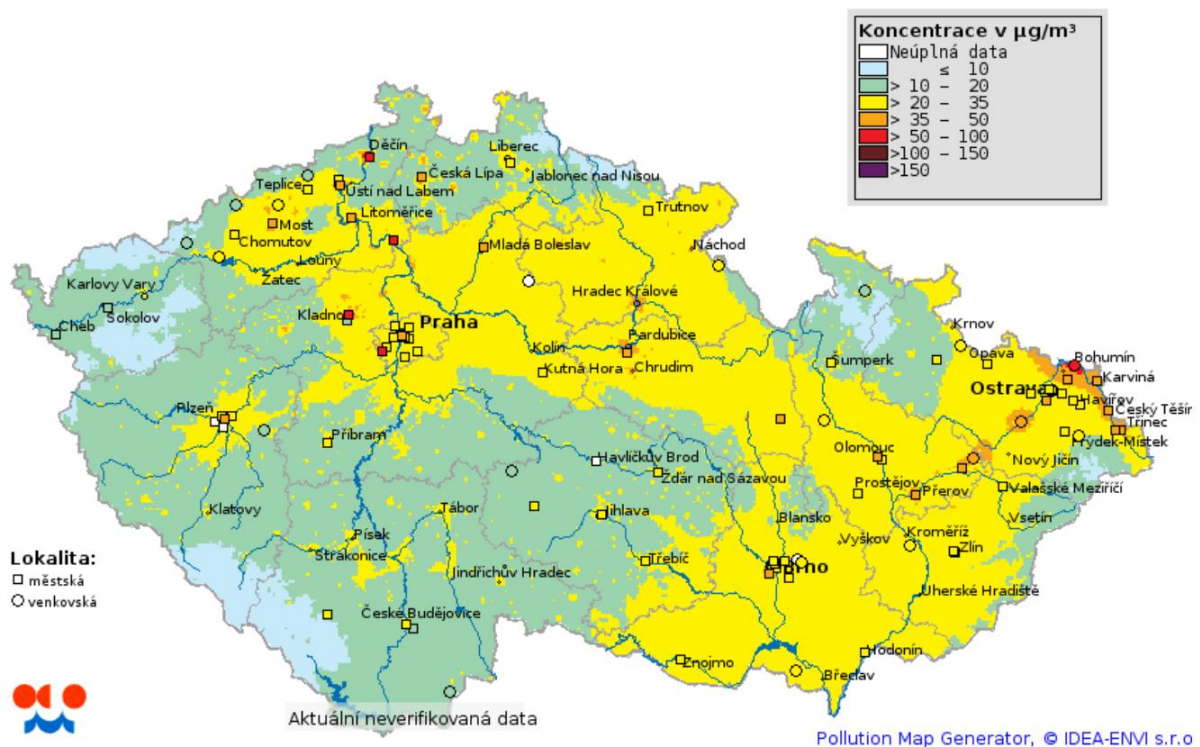


Obrázok 2.3 – Vývoj priemerných denných koncentrácií  $PM_{10}$  na staniách AIM, priemeru teploty (T) a ventilačného indexu (VI) na území Českej republiky [9]

Podľa Českého hydrometeorologického ústavu pre rok 2018 bola kritická hodnota hrubých častíc  $PM_{10}$  prekročená na troch meracích staniách AIM (automatizovaný imisný monitoring) a hodnota jemných častíc  $PM_{2,5}$  prekročila kritickú hranicu na 12-ch staniách z celkových 65 stanic. [9]



Obrázok 2.4 – Počet dní, kedy priemerná koncentrácia PM<sub>2,5</sub> prekročila limitnú imisnú hodnotu na staniciach AIM pre rok 2018 [9]



Obrázok 2.5 – 24 hodinový priemer koncentrácie PM<sub>10</sub> ku dňu 30.3.2019 [10]

### 3 Spařovací proces

Spařovací proces je chemický dej ktorý je vždy exotermický (energia sa uvoľňuje vo forme tepla). Základnou podmienkou vzniku tohto deja je prítomnosť kyslíka ( $O_2$ ) a fosílného paliva, ako napríklad uhlie, zemný plyn a ropných produktov, prípadne biomás, ktoré zapríčinia priebeh chemickej reakcii. Výsledkom je produkt po spařovacom procese ( $CO_2$ ,  $CO$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ) a uvoľnené teplo. Na začiatku procesu je vždy potrebné dodať systému energiu, aby sa mohla uskutočniť chemická reakcia (spařovací proces). [11]

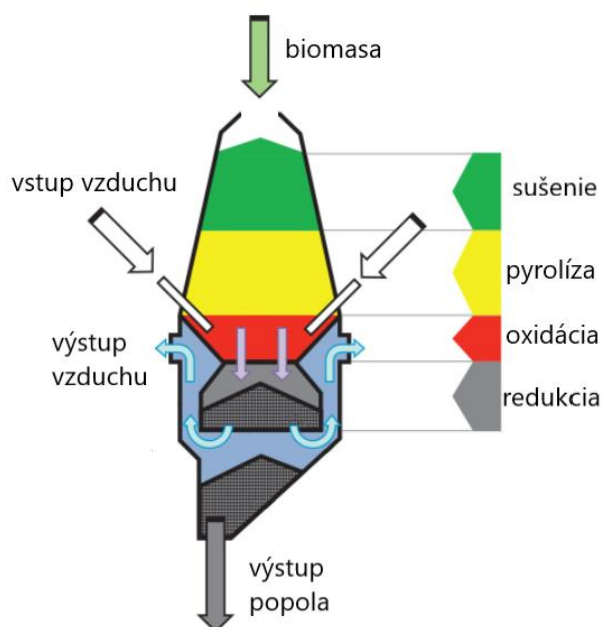
#### 3.1 Priebeh spařovacieho procesu

Spařovací proces môže prebiehať v štyroch fázach. Medzi tieto fázy patrí sušenie, pyrolýza, tepelná degradácia a splyňovanie. Jednotlivé fázy neprebiehajú samostatne. Väčšinou sa prelínajú medzi sebou. Výskyt všetkých štyroch fáz počas jedného spařovacieho procesu nie je podmienené.

Teplota, pri ktorej nastáva pyrolýza je pomerne vyššia, ako pre sušenie. Jedná sa o fyzikálno-chemický dej ktorý je podmienený termickým rozpadom za neprítomnosti dodávaného kyslíka (oxidačnej redukci). Počas tejto fázy nastáva prvé tvorenie jemných částíc a pokračuje až do fázy splyňovania.

Pri tepelnej degradácii sa uvoľňujú prchavé látky (zlúčeniny dusíku a síry). Teplota, pri ktorej tepelná degradácia nastáva, závisí na použítom reaktante (fosílného paliva, biomasy) pri chemickej reakcii.

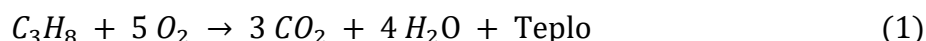
Splyňovanie je určitým prípadom tepelnej degradácii práve vtedy, keď je pri chemickej reakcii dodávané oxidačné činidlo (kyslík, vzduch, para). Počas priebehu reakcie sa z fosílného paliva uvoľňujú prchavé látky a to najmä vodík ( $H$ ), oxid uhličitý ( $CO_2$ ) a oxid uhoľnatý ( $CO$ ). [11]



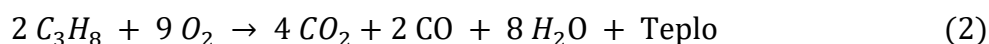
Obrázok 3.1 – Jednotlivé fázy spařovacieho procesu biomasy [12]

### 3.2 Dokonalé a nedokonalé spaľovanie

Podľa prítomnosti dostatočného množstva kyslíku počas spaľovacieho procesu, rozlišujeme dokonalé a nedokonalé spaľovanie. Podmienkou dokonalého spaľovania je prítomnosť potrebného množstva kyslíka, aby sme z reaktantu dosiahli maximálne množstvo uvoľnenej energie vo forme tepla. Dokonalé spaľovanie (úplné) je iba teoretické a v reálnych podmienkach úplne spaľovanie nie je možné dosiahnuť. [13]

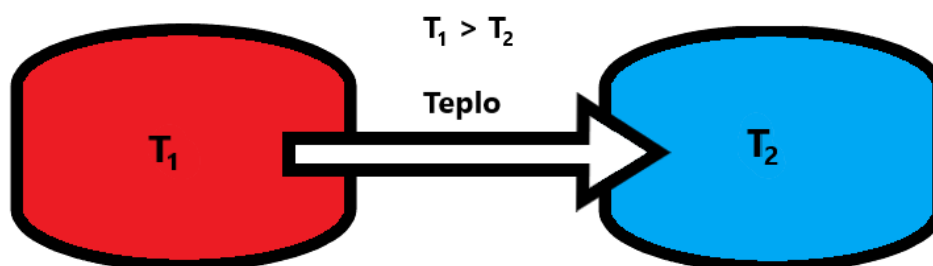


Nedokonalé spaľovanie nastáva za nedostatočného množstva kyslíka počas spaľovacieho procesu. Jedným z najjednoduchších názorných ukážok nedokonalého spaľovacieho procesu, je horenie dreva. Produktom tejto reakcie za nízkeho obsahu kyslíka, je okrem oxidu uhličitého a vody, aj nespálený uhlík a oxid uhoľnatý. [13]



### 3.3 Tepló

Termodynamické tepló je veličina, charakterizujúca množstvo energie samovoľne prechádzajúcej z jedného bodu do druhého, vďaka teplotným rozdielom. Systém s vyššou teplotou odovzdáva tepló systému s nižšou teplotou. Tento jav trvá, dokiaľ tieto systémy nedosiahnu tepelnú rovnováhu (systémy majú rovnakú teplotu). Prenos tepla môže nastať prenosom, vodivosťou alebo žiarením. Každý z týchto spôsobov sa rozlišuje druhom materiálu, ktorým sa tepló prenáša. Základnou jednotkou tepla v SI systéme je joule (J). [14]



Obrázok 3.2 – Smer prenosu tepla

### 3.4 Výhrevnosť

Výhrevnosť je jednou zo základných fyzikálnych parametrov palív. Udáva, aké množstvo tepla sa uvoľní spálením jednotkového množstva látky, alebo zmesi, počas adiabatického spaľovania za atmosférického tlaku. Základná jednotka, v ktorej sa výhrevnosť udáva, závisí na skupenstve paliva. Joule na kilogram (J/kg) sa priradzuje palivám v pevnom alebo kvapalnom skupenstve. Palivám plynného skupenstva sa priradzuje joule na meter kubický (J/m<sup>3</sup>).

Podľa skupenstva vody v spalinách, rozlišujeme dolnú výhrevnosť (voda obsiahnutá v spalinách je v plynnom stave) a hornú výhrevnosť (voda obsiahnutá v spalinách je v kvapalnom stave). Dolná výhrevnosť je vždy menšia, ako horná výhrevnosť. Kvôli energii potrebnej na odparovanie vody v spalinách. Rozdiel vo výhrevnostiach môže nadobúdať až veľkosť 10 % v závislosti od množstva vodíka v palive. [15]

Tabuľka 3.2 – Výhrevnosť (horná / dolná) pre rôzne druhy palív [16]

Druh paliva	Horná výhrevnosť			Dolná výhrevnosť		
	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]	[kWh/kg]	[MJ/kg]	[MJ/m <sup>3</sup> ]
<b>Plynné skupenstvo</b>						
Metán	15.4	55.5	39.8	13.9	50	35.8
Vodík	39.4	141.7	12.7	33.3	120	10.8
Zemný plyn	14.5	52.2	40.6	13.1	47.1	36.6
<b>Kvapalné skupenstvo</b>						
Benzín	12.89	46.4	34.2	12.06	43.4	32
Bután	13.64	49.1	29.5	12.58	45.3	27.2
Etán	14.42	51.9	29.7	13.28	47.8	27.3
Etanol	8.25	29.7	23.4	7.42	26.7	21.1
LNG	15.33	55.2	23.6	13.5	48.6	20.8
LPG	13.69	49.3	26.5	12.64	45.5	24.4
Metanol	6.39	23	18.2	5.54	19.9	15.8
Petrolej	12.83	46.2	37.9	11.94	43	35.3
Propán	13.99	50.4	25.1	12.88	46.4	23.1
Rastlinný olej	11.25	40.5	37.3	10.5	37.8	34.8
<b>Pevné skupenstvo</b>						
Drevné uhlie	8.22	29.6		7.89	28.4	
Hnedé uhlie	3.89	14				
Koks	7.22	26				
Rašelina	4.72	17				
Síra	2.56	9.2		2.55	9.2	
Suché drevo	4.5	16.2		4.28	15.4	
Uhlík	9.11	32.8				

## 4 Biomasa

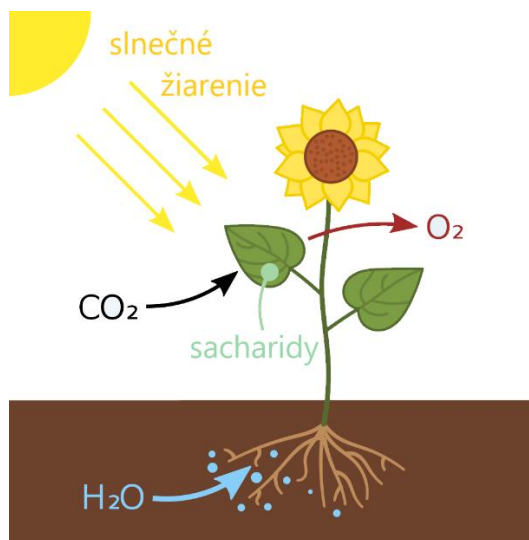
Biomasa je organického pôvodu, pochádzajúca primárne z odumretých častí rastlín a stromov. Patrí medzi jednu z hlavných zložiek obnoviteľných zdrojov energie. Za obnoviteľný zdroj energie sa považuje kvôli relatívne nízkemu času, potrebnému na obnovu využitých zásob, oproti iným zdrojom energie. [17]



Obrázok 4.1 – Zber Japonského topoľa za účelom biomasy [18]

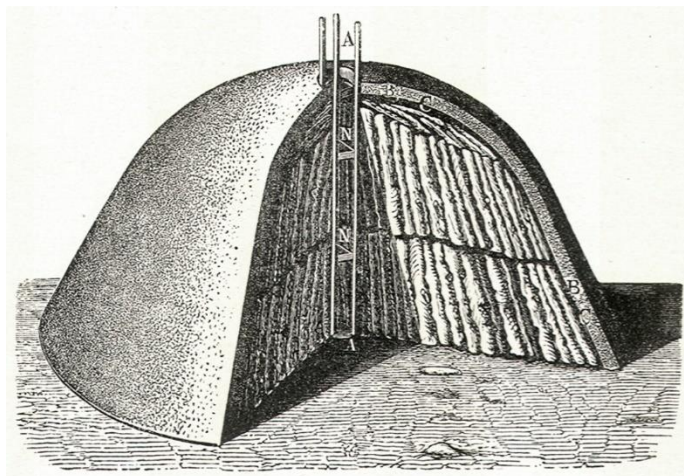
### 4.1 Vznik a rozdelenie biomasy

Využitelná forma energie v podobe tepla pochádza z uloženej energie slnka v rastlinách, v podobe glukózy. Tento jav nastáva u rastlín za prítomnosti vody a oxidu uhličitého, ktoré umožňujú priebeh fotosyntézy. Biomasa, ako zdroj energie, by sa dala považovať za neutrálny zdroj emisií oxidu uhličitého, pretože oxid uhčitý, ktorý sa vyprodukuje počas spaľovania biomasy, sa spotrebuje v procese fotosyntézy. [17]



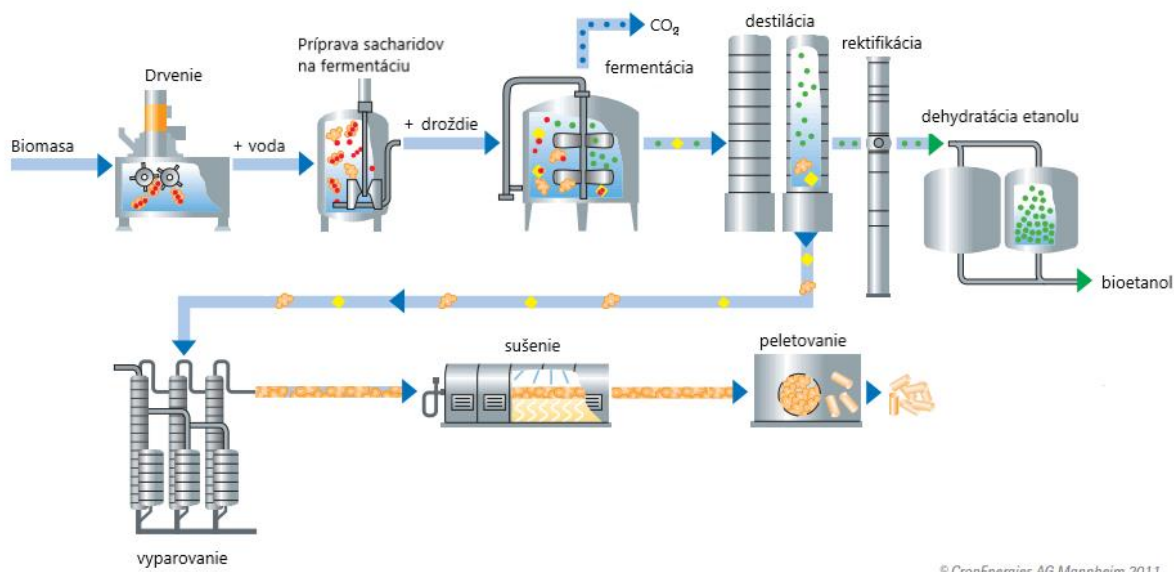
Obrázok 4.1 – Priebeh fotosyntézy [19]

Biomasu vieme rozdeliť na dve hlavné skupiny podľa spôsobu premeny biomasy na energiu. Prvý spôsob je termochemická premena (spaľovanie, pyrolýza, splynovanie). Spaľovanie patrí medzi priame metódy premeny biomasy na energiu. Najčastejší zdroj biomasy pre spaľovanie je odpadové drevo a poľnohospodársky odpad v lisovanej forme (pelety). Najvyužívanejšia príprava biomasy pomocou pyrolýzy je premena dreva na drevné uhlie. Produktom splynovania sú plyny, z ktorých vieme následným spaľovaním získať energiu. [17]



Obrázok 4.2 – Pec určená na výrobu drevného uhlia [20]

Druhý spôsob premeny biomasy na energiu je biochemická premena (fermentácia, anaeróbne vyhnívanie). Výsledným produktom fermentácie je etanol a metanol, ktorý sa využíva ako náhrada za benzín v motorových vozidlách. Etanol a metanol sa získava z cukru, obsiahnutého v biomase, pôsobením mikroorganizmov (kvasinky). Anaeróbne vyhnívanie je získavanie bioplynu (metánu) zo zemných skládok. Táto metóda je využívaná ako vyspelými krajinami, tak i rozvojovými krajinami, hlavne vďaka jej jednoduchosti a nenáročnosti na technologické prvky. [17]



© CropEnergies AG Mannheim 2011

Obrázok 4.3 – Schéma výroby bioetanolu [21]

## 4.2 Zloženie a výhrevnosť biomasy

Výhrevnosť biomasy je závislá na chemickom zložení, vlhkosti a množstve popola. Vlhkosť biomasy sa zväčša pohybuje okolo 5% – 15%. Výhrevnosť poľnohospodárskeho rastlinného odpadu je okolo 14 – 19 MJ/kg.

Tabuľka 4.1 – Výhrevnosť a chemické zloženie jednotlivých typov biomasy [22]

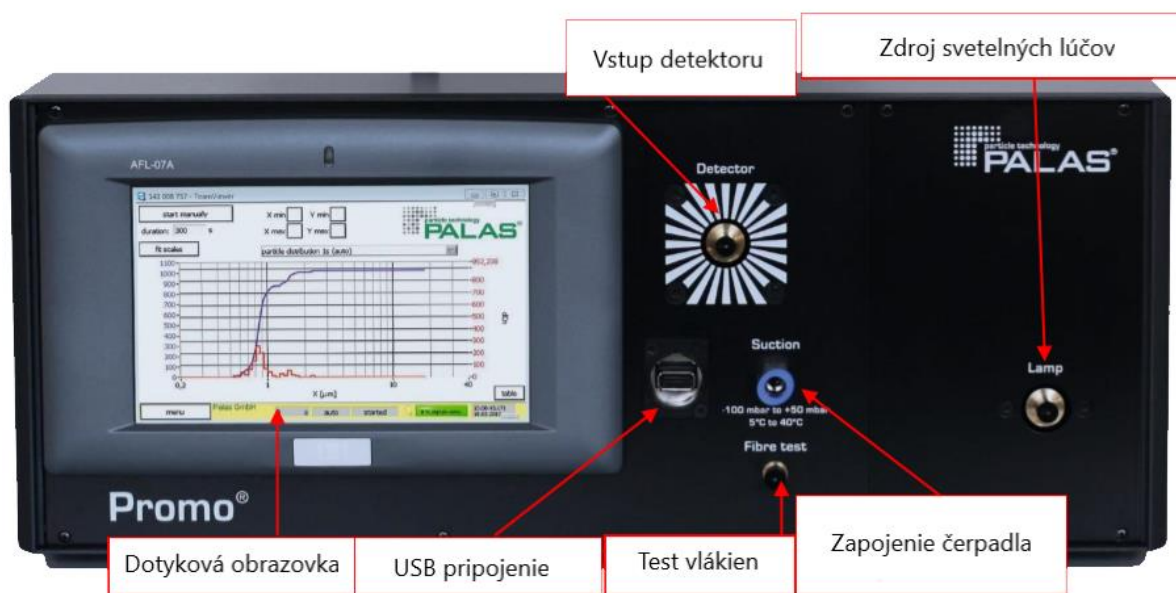
Typ Biomasy	MJ/kg	Popol [%]	Uhlík [%]	Vodík [%]	Dusík [%]	Síra [%]	Kyslík [%]	Chlór (µg/g) <sup>3</sup>
<b>Poľnohospodárske plodiny</b>								
Fazuľa	19	4.7	45.7	6.3	4.3	0.7	38.8	193
Kukurica	17	1.5	42.1	6.5	1.2	0.1	48.9	472
Repka olejná	28	4.5	60.8	8.3	4.5	0.5	21.4	163
Obilie	22	4.9	50.4	6.7	4.7	0.7	32.6	1,367
<b>Rastliny pestovane na biomasu</b>								
Zlatofúz	19	6.1	44.4	6.1	0.8	0.1	42.6	1,88
Miskant	19	2.7	47.9	5.8	0.5	0.1	43	1,048
Cirok	17	6.6	45.8	5.3	1	0.1	42.3	760
Proso	18	5.7	45.5	6.1	0.9	0.1	41.7	1,98
<b>Nespracované časti poľnohospodárskych plodín</b>								
Lucerna	17	9.1	45.9	5.2	2.5	0.2	39.5	3,129
Jačmenná slama	17	5.9	46.9	5.3	0.7	0.1	41	1,04
Kukuričné klasy	18	1.5	48.1	6	0.4	0.1	44	2,907
Zvyšok kukurice	19	5.1	43.7	6.1	0.5	0.1	44.6	1,38
Ľanová slama	18	3.7	48.2	5.6	0.9	0.1	41.6	2,594
Pšeničná slama	18	7.7	43.4	6	0.8	0.1	44.5	525
<b>Drevo</b>								
Kôra	19	1.5	47.8	5.9	0.4	0.1	45.4	257
Vŕba	19	2.1	50.1	5.8	0.5	0.1	41.4	134
Tvrde drevo	19	0.4	48.3	6	0.2	0	45.1	472
<b>Uhlie</b>								
Čierne uhlie	25	6	55	3.7	0.9	0.4	11.5	35
Hnedé uhlie	22	22	58.8	4.2	0.9	0.5	13.6	25

## 5 Experimentálne meranie

Hlavným účelom merania bolo poukázať na emisiu pevných častíc spaľovacím procesom pre rôzne podmienky (druh spaľovania, použité palivo, prostredie). K experimentálnemu meraniu bolo použité zariadenie od spoločnosti Palas, ktorej prístroje sa zaoberajú problematikou emisii pevných častíc. Celkovo prebehli tri merania, z ktorých dve merania boli zamerané na názorné poukázanie závislosti tvorby pevných častíc z drevného uhlia. Experimentálne merania v kotolni slúžilo na zistenie pracovných podmienok, v súvislosti s emisiami pevných častíc.

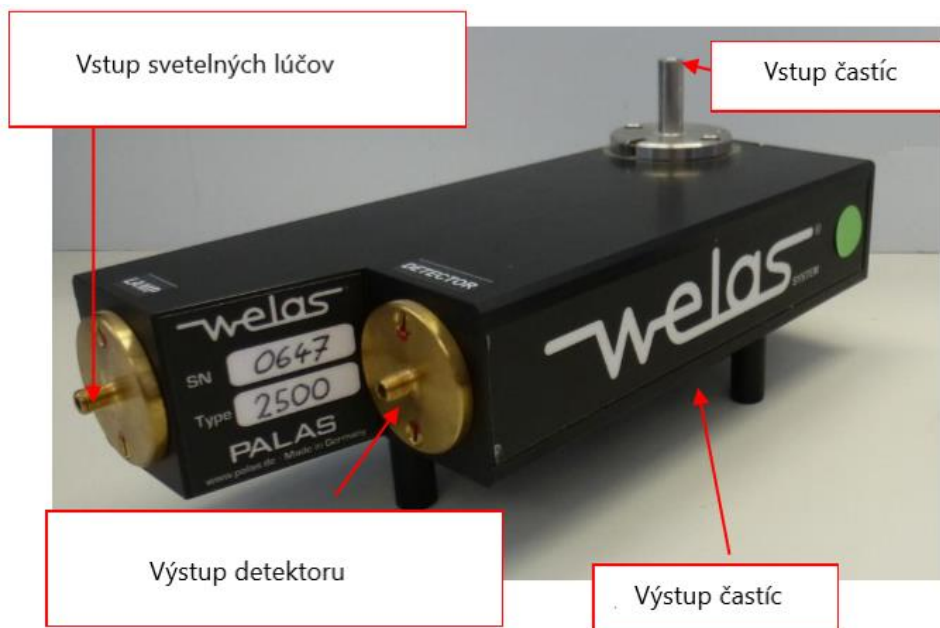
### 5.1 Popis experimentálnej aparatúry

Použitie meracie zariadenie je aerosólový spektrometrický systém Palas Promo 2000, ktorý slúži na analýzu veľkosti a koncentráciu pevných častíc. Prístroj zaznamenáva hodnoty v jednosekundových intervaloch, vďaka tomu je možné dosiahnuť presných a neskreslených hodnôt. Maximálny čas merania závisí od koncentrácie pevných častíc v meranom prostredí. Počas jedného merania vie zachytiť najviac 1,5 miliónu signálov (častíc). Práve z tohto faktu vyplýva, že čím je väčšia koncentrácia častíc v meranom prostredí, tým bude čas merania kratší. [23]



Obrázok 5.1 – Predná časť spektrometru Palas Promo 2000 [24]

Aby zariadenie pracovalo a zaznamenávalo pevné častice, musíme pomocou optických káblov prepojiť Palas 2000 so sensorovou hlavou Welas. K dispozícii boli dva senzory: Welas 2070 a Welas 2300. Po skúšobných meraniach oboch zariadení bol použitý senzor Welas 2300, pretože senzor Welas 2070 nebol vhodný pre dané merané podmienky.



Obrázok 5.2 – Popis senzoru Welas [24]

Experimentálna aparátúra pracuje na princípe rozptylu svetla vytváraného pevnými částicami v senzorovej hlavici Welas. Svetelné lúče sú tvorené v zariadení Palas 2000, ktoré sú prenášané optickými káblami do senzoru, kde nastáva rozptyl svetla a následne sú zaznamenávané v meracom zariadení. Palas 2000 je vybavený čerpadlom, s objemom prietoku 5 l/s, ktoré zaručuje konštantný výskyt částic v senzore.[23]

Tabuľka 5.1 – Záznamové schopnosti senzorov Welas [24]

Senzor	Maximálna koncentrácia [N/cm <sup>3</sup> ]	Interval veľkosti priemerov zaznamenávaných pevných částic [μm]		
		0,2 - 10	0,3 - 17,5	0,6 - 40
Welas 2070	1 000 000	0,2 - 10	0,3 - 17,5	0,6 - 40
Welas 2300	40 000	0,2 - 10	0,3 - 17,5	0,6 - 40 2 - 105

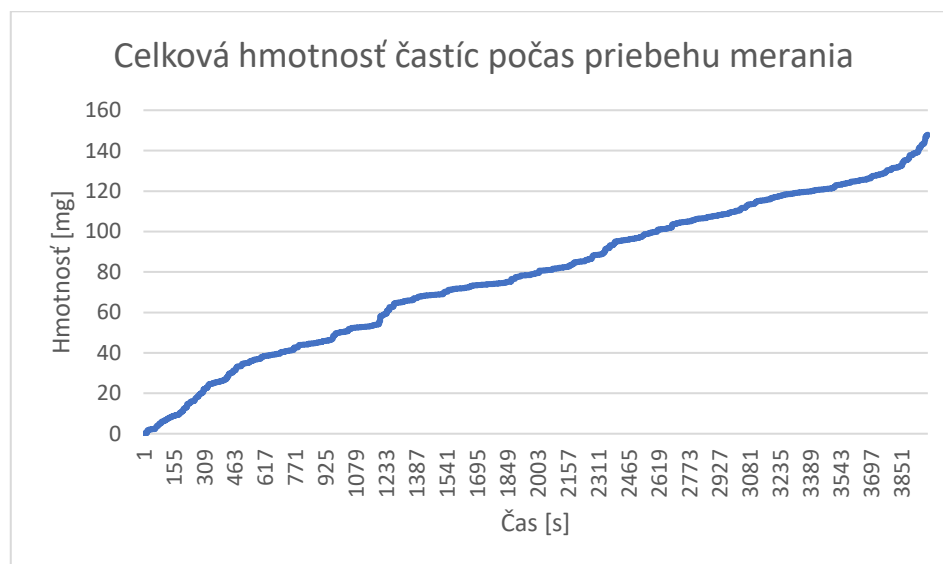
Pred každým meraním je potrebná kalibrácia zariadenia, ktorá zaručuje správnosť meraných hodnôt. Kalibrácia sa prevádza pomocou špeciálnej nádoby, v ktorej sa nachádzajú pevné částice určitých veľkosti. Počas kalibrácie je nutné správne nastaviť rýchlosť a veľkosť pevných částic, prechádzajúcich senzorom. [22]

## 5.2 Meranie pevných částíc v kotolni

Prvé meranie prebiehalo v miestnosti s rôznymi druhmi spaľovacích zariadení. Počas merania bol zapnutý práve iba plyný kotol s automatickým dopĺňaním paliva. V kotli sa spaľovali slamené pelety. Tento druh spaľovacieho zariadenia by mal tvoriť iba minimálny počet pevných částíc počas spaľovania. Experimentálne meranie bolo zamerané na poukázanie správnosti daného tvrdenia. Ďalším cieľom merania bolo zistenie počtu částíc v ovzduší, v ktorom sa pohybujú pracovníci v kotolni.



Obrázok 5.3 – Celkový počet částíc počas priebehu merania v kotolni



Obrázok 5.4 – Celková hmotnosť částíc počas priebehu merania v kotolni

Na daných grafoch je vidieť lineárnu závislosť počtu částíc a hmotnosti počas priebehu merania. Lineárna závislosť naznačuje, že nedošlo k výraznému poklesu, ani k zvýšeniu počtu částíc. Maximálne hodnoty koncentrácie pevných částíc v ovzduší sa blížili k hraničnej hodnote, zadanej Českým hydrometeorologickým ústavom. Z merania je vidieť, že plyné kotle neprekračujú rizikóvu hodnotu a spaľovaním vytvárajú minimálny počet pevných částíc.

### 5.3 Meranie pevných částíc grilu v reálnych podmienkach

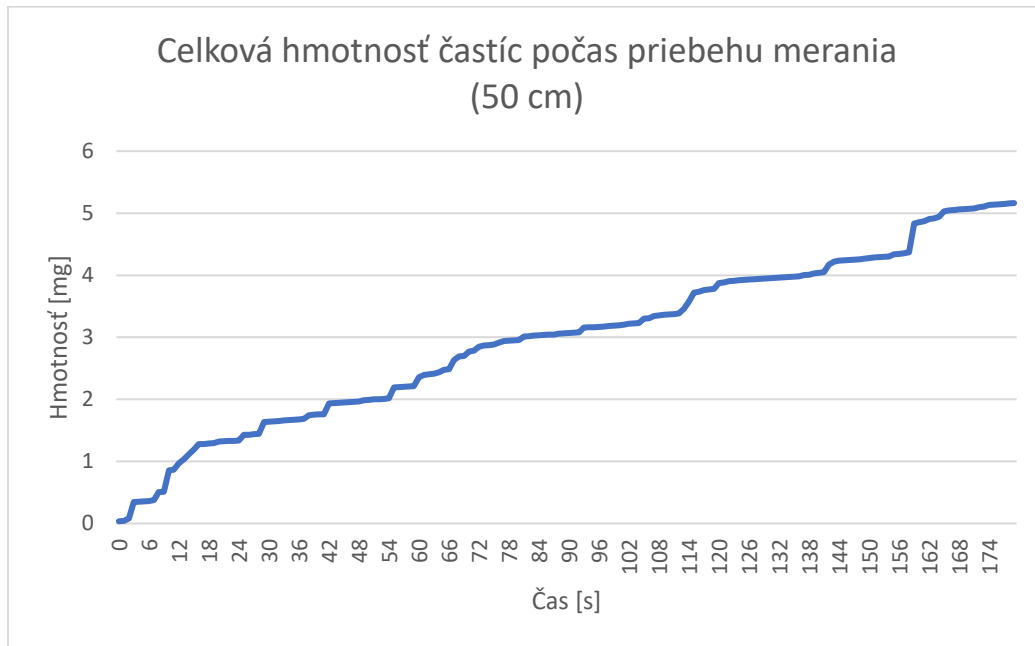
Ďalšie meranie bolo zamerané na produkciu pevných částíc spaľovaním drevného uhlia. Častice boli zaznamenávané vo dvoch rozdielnych výškach od grilu, 50 cm a 70 cm. Výškový rozdiel mal názorne poukázať na rozdielnu distribúciu hmotnosti pevných částíc v rozdielnych hladinách.



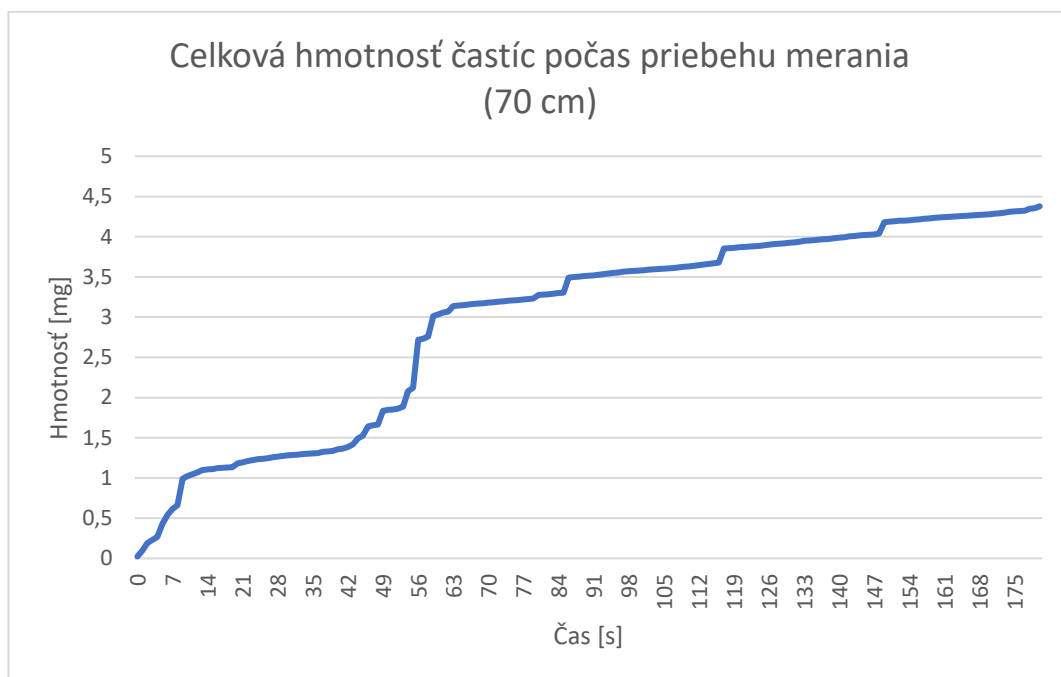
Obrázok 5.5 – Fotografia z merania v reálnych podmienkach

Na fotografii je vidieť zostavu určenú pre meranie v reálnych podmienkach pred počiatkom spaľovacieho procesu drevného uhlia. Vyznačená oblasť na fotografii je vo výške 50 cm od drevného uhlia uloženého v grilu. V tomto mieste sa nachádza miesto odberu pevných částíc, ktoré je prepojené so senzorom Welas pomocou hadice a následne zaznamenávané v zariadení Palas.

Pevné částice sú ovplyvňované prúdením vzduchu a platí, čím částice nadobúdajú väčších rozmerov, tým sú viac ovplyvňované prúdením a majú väčšiu hmotnosť. Poveternostné podmienky v deň merania, podľa Českého hydrometeorologického ústavu, boli nepriaznivé a rýchlosť vetra dosahovala vysoké hodnoty.

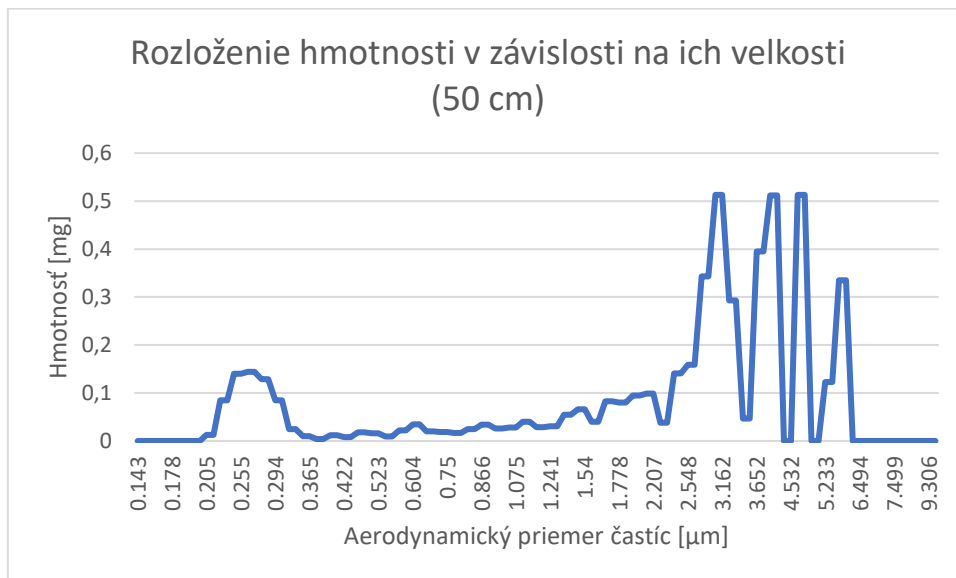


Obrázok 5.6 – Celková hmotnosť častíc počas priebehu merania pre 50 cm

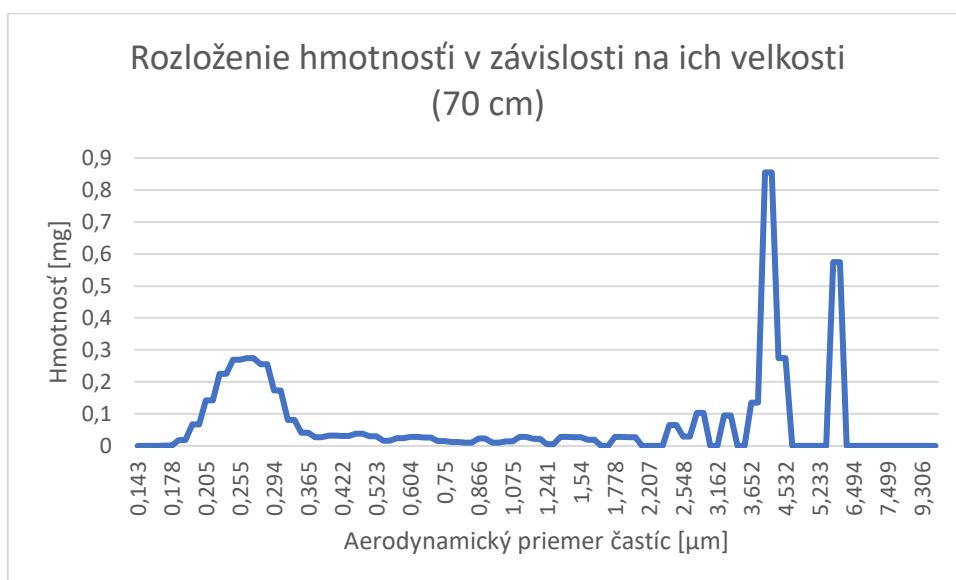


Obrázok 5.7 – Celková hmotnosť častíc počas priebehu merania pre 70 cm

Z grafov kumulatívnej hmotnosti je pozorovateľná určitá schodovitosť, striedanie oblastí s väčším a menším rastom funkcie. Pri meraní so záznamovou výškou 70 cm je viditeľne väčšia schodovitosť, spôsobená väčšou vzdialenosťou od zdroja pevných častíc. Táto závislosť vznikla hlavne kvôli poveternostným podmienkam. Oblasť grafu z nižším rastom znázorňuje úsek s väčšou rýchlosťou vetra. Z tohto pozorovania je možné odvodiť závislosť prúdenia vzduchu a pohybu častíc.



Obrázok 5.8 – Rozloženie hmotnosti podľa veľkosti jednotlivých častíc pre 50 cm



Obrázok 5.9 – Rozloženie hmotnosti podľa veľkosti jednotlivých častíc pre 70 cm

Výrazný rozdiel bol pri porovnaní grafov hmotnostní jednotlivých aerodynamických priemerov pevných častíc. Kvôli spomínanému javu, častice väčších priemerov sú výraznejšie ovplyvňované. Prúdením vzduchu nastal rozdiel medzi celkovými hmotnosťami častíc jednotlivých meraní. Jednoznačne je vidieť že hmotnosť častíc vo výške 50 cm je väčšia. Taktiež z jednotlivých grafov vieme priradiť menší význam z hmotnostného hľadiska časticiam s priemerom do 1  $\mu\text{m}$  aj napriek niekoľko násobne väčšiemu výskytu viditeľného z grafu.

#### 5.4 Meranie pevných částic grilu v ideálních podmienkach

Posledné meranie bolo zvolené kvôli určeni celkovej produkci částic spaľovaním drevného uhlia a jednoznačnému znázorneni ovplyvňovani pohybu částic prúdením.



Obrázok 5.10 – Fotografia z merania v ideálních podmienkach

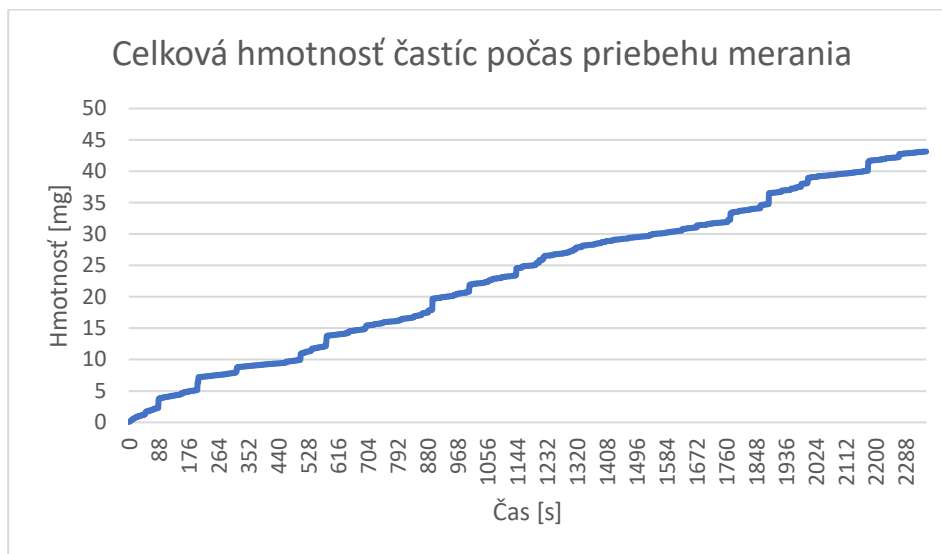
Meranie sa uskutočnilo v uzavretom priestore s odsávaním, ktorý sa nachádza na fotografii. Aby neboli zaznamenávané zvýšené koncentrácie částic dôsledkom merania v uzavretom priestore bolo zaistene odsávanie. Vyznačená meracia oblasť bola v dostatočnej vzdialenosti, kde nenastávala interferencia s digesterom.



Obrázok 5.11 – Celkový počet částic počas priebehu merania pre ideálne podmienky

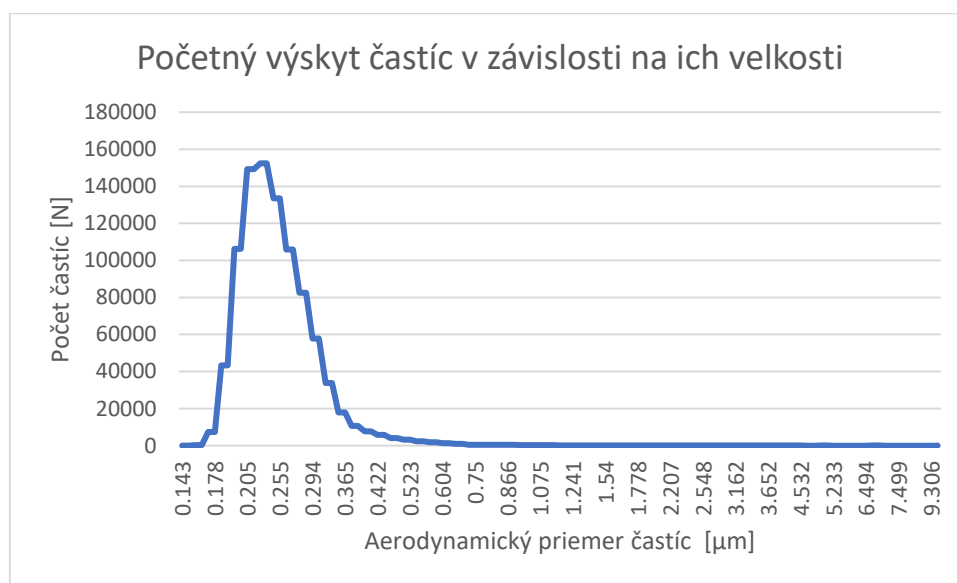
Meranie prebiehalo od začiatku spaľovacieho procesu drevného uhlia. Táto udalosť spôsobila kvadratickú závislosť, na začiatku krivky grafu, kde je možné vidieť postupné rozširovanie spaľovacieho procesu až do momentu, kedy nastalo spaľovanie celého objemu drevného

uhlia. Vďaka meraniu v ideálnych podmienkach sme získali počas zvyšku celého merania lineárnu závislosť oproti meraniu v reálnych podmienkach.



Obrázok 5.12 – Celková hmotnosť častíc počas priebehu merania pre ideálne podmienky

Určitý trend schodovitosti nebolo možné úplne odstrániť ani počas merania v ideálnych podmienkach, pre graf postupnej kumulácie hmotnosti. Eliminovaním prúdenia vzduchu bola získaná väčšia miera lineárnosti. Vznik danej závislosti bol pravdepodobne vytvorený nedokonalým spaľovaním, ktoré nie je možné odstrániť spaľovaním drevného uhlia.



Obrázok 5.13 – Početný výskyt častíc počas priebehu merania pre ideálne podmienky

Na grafe je vidieť, že spaľovaním drevného uhlia vznikajú najmä jemné a ultrajemné častice. Táto krivka odpovedá meraniu v otvorenom priestore pre obe záznamové výšky. Niekoľkonásobne vyššia hodnota výskytu častíc jednotlivých aerodynamických priemerov oproti predchádzajúcim meraniam, bola spôsobená rozdielnym časom merania.



Obrázok 5.14 – Rozloženie hmotnosti podľa veľkosti jednotlivých častíc pre ideálne podmienky

Eliminovaním vonkajších faktorov boli zachytené experimentálnou aparátúrou častice s priemerom od 6  $\mu\text{m}$ . Častice s daným priemerom nebolo možné zaznamenať počas merania v reálnych podmienkach, kvôli poveternostným podmienkam. Spojením výsledkov merania v reálnych podmienkach a v ideálnych podmienkach je možné dôjsť k záveru, že častice sú ovplyvňované prúdením vzduchu v závislosti na ich veľkosti, vyplývajúce z faktu neprítomnosti častíc s priemerom 6  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$ , pre meranie v reálnych podmienkach. Medzi jeden z ďalších možných vyvoditeľných záverov patrí rozloženie hmotnosti častíc pri spaľovacom procese dreveného uhlia. Napriek niekoľkonásobne vyšším emisiám pevných častíc o priemeroch 0,2 až 0,4  $\mu\text{m}$  je hmotnosť týchto častíc menej podstatná než pri emisii častíc s priemerom 4 až 10  $\mu\text{m}$ . Tento poznatok by bolo možné vylúčiť z hľadiska ľudského zdravia pretože najkritickejšie na ľudský organizmus vplývajú ultrajemné a jemné častice, ktoré sa podľa závislosti z grafu celkového počtu častíc na jednotlivých priemeroch, vyskytovali najčastejšie.

## 6 Závěr

Prvá část byla venovaná teoretickému úvodu problematiky pevných částic. Tato část se zabývala rozdělením pevných částic, podle jejich charakteristických velikostí, důsledků na lidský organizmus a přírodu. Spomenutá byla i výroční správa hydrometeorologického ústavu, která sloužila pro názorné zobrazení koncentrací jemných částic v atmosféře a na stav kvality ovzduší na území České republiky.

Ďalší část měla za úlohu přiblížit spalovací proces v souvislosti s pevnými částicami. Popisovala princip a rozdělení fází spalovacího procesu a vývoj vzniku pevných částic. Byly vymezeny a následně vysvětleny charakteristické pojmy patřící k spalovacímu procesu, jako jsou výhřevnost, teplo, dokonalé a nedokonalé spalování.

Koniec rešeršnej časti patrilo biomase. Spomenutá bola hlavne kvôli neustále väčšiemu dopytu po biomase a postupným nahradzovaním fosílnych palív. Dôraz bol kladený na poukázanie širokého spektra využitia biomasy, ako obnoviteľného zdroja energie, a efektivity spalovania rôznych druhov poľnohospodárskych plodín.

Úvodná kapitola experimentálneho merania popisovala ciele jednotlivých meraní a princíp zaznamenávania pevných částic experimentálnou aparaturou. Zvolené boli celkovo tri merania, z ktorých niektoré medzi sebou mali súvis a bol možný, pre dané merania, aj vyvoditeľný spoločný záver.

Prvé meranie prebiehalo za účelom overenia tvorby pevných částic plynným kotlom, zistenia pracovných podmienok zamestnancov v kotolni a následné porovnanie daných výsledkov s povolenými hodnotami koncentrácie pevných částic. Jedným z cieľov merania bolo overenie tvrdenia o plynných kotloch. Toto tvrdenie sa meraním potvrdilo, pretože počas celého merania neprišlo ku výraznému zvýšeniu koncentrácie pevných částic, oproti skúšobným meraniam, ktoré prebiehali v priestore bez spalovacieho zariadenia. Z merania je možné usúdiť, že nedošlo k prekročeniu kritickej hodnoty koncentrácie pevných částic stanovenej Českým hydrometeorologickým ústavom. Prostredie, v ktorom sa pohybujú pracovníci v kotolni, sa výrazne neodlišovalo od bežného prostredia a nemalo by mať nepriaznivé účinky na ľudský organizmus.

Meranie produkcie částic spalovaním dreveného uhlia v reálnych podmienkach prebiehalo v dvoch rozdielnych výškach, z čoho bola následne pozorovaná závislosť. Z pozorovaného trendu bolo usúdené, že částice s väčším aerodynamickým priemerom sú výraznejšie ovplyvňované prúdením vzduchu. Tento jav bol naznačený zaznamenanými částicami. Významne vyššia hmotnosť sa objavila v oblasti veľkosti částic o priemeroch 3  $\mu\text{m}$  až 6,5  $\mu\text{m}$ , napriek niekoľkonásobne menej početnému výskytu daných částic. V celom meraní sa nevyskytovali částice o veľkostiach priemeru 6,5  $\mu\text{m}$  až 10  $\mu\text{m}$ .

Meranie v ideálnych podmienkach bolo uskutočnené na základe overenia zistenej závislosti z predhadzujúceho merania. Daná závislosť bola meraním potvrdená a mohol sa vyviesť záver, z ktorej sa mohli určiť závislosti ovplyvňovania pevných částic prúdením a rozloženia závislosti hmotnosti jednotlivých priemerov pevných částic. Taktiež bolo možné určiť celkovú produkciu pevných částic spalovaním dreveného uhlia, v rozmedzí od 0,1 do 10  $\mu\text{m}$ . Z grafu sa dá jednoznačne určiť výskyt pevných částic, ktoré nebolo možné zachytiť z predchádzajúceho merania.

## 7 Zoznam použitých zdrojov

- [1] *New Map Offers a Global View of Health-Sapping Air Pollution* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/topics/earth/features/health-sapping.html?utm\\_source=weibolife.appspot.com](https://www.nasa.gov/topics/earth/features/health-sapping.html?utm_source=weibolife.appspot.com)
- [2] *Particulate Matter (PM) Basics* [online]. [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- [3] *Sources of atmospheric particulate matter* [online]. [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Particulates#cite\\_note-www3.epa.gov-5](https://en.wikipedia.org/wiki/Particulates#cite_note-www3.epa.gov-5)
- [4] *PM10, PM2.5, PM0.1* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.greenfacts.org/glossary/pqrs/PM10-PM2.5-PM0.1.htm>
- [5] *Coarse particles* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.greenfacts.org/glossary/abc/coarse-particles.htm>
- [6] *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)* [online]. [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- [7] *Particle size and air purification.* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.lightair.com/learning-center/lightair-science/size-matters/>
- [8] *Suspendované částice (PM) – otázky a odpovědi* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/12/01/suspendovane-castice-pm-otazky-a-odpovedi/>
- [9] *Kvalita ovzduší a rozptylové podmínky na území ČR* [online]. 2019 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: [http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove\\_zpravy/2019/Rocni\\_zprava\\_2018\\_k\\_valita\\_ovzdusi.pdf](http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/tiskove_zpravy/2019/Rocni_zprava_2018_k_valita_ovzdusi.pdf)
- [10] *Mapy znečištění ovzduší* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://pr-asu.chmi.cz:8080/IskoPollutionMapView/faces/viewMapImages.xhtml>
- [11] *The Process of Combustion* [online]. [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: [https://www.forbesmarshall.com/fm\\_micro/news\\_room.aspx?Id=boilers&nid=179](https://www.forbesmarshall.com/fm_micro/news_room.aspx?Id=boilers&nid=179)
- [12] *Gasifier* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.renewablesplus.com/new/wp-content/uploads/2015/07/gasifier.png>
- [13] *Combustion* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Combustion>
- [14] *Heat in Thermodynamics* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/thermodynamics/laws-of-thermodynamics/first-law-of-thermodynamics/heat-in-thermodynamics/>
- [15] *Výhrevnost'* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://sk.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDhrevnos%C5%A5>

[16] *Fuels - Higher and Lower Calorific Values* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html)

[17] *Biomasa (energetika)* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://sk.wikipedia.org/wiki/Biomasa\\_\(energetika\)](https://sk.wikipedia.org/wiki/Biomasa_(energetika))

[18] [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.turieonline.sk/images/fotky/2013/02/foto-japonske-topole-sk.jpg>

[19] *Fotosyntéza* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Fotosynt%C3%A9za#/media/File:Fotosynt%C3%A9za.svg>

[20] *Charcoal* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal#/media/File:Meule\\_charbon\\_bois.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Charcoal#/media/File:Meule_charbon_bois.jpg)

[21] *Production processes* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.cropenergies.com/en/Bioethanol/Produktionsverfahren/>

[22] *Biomass Burn Characteristics* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/engineer/facts/11-033.htm>

[23] *Promo® 2000* [online]. [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: <https://www.palas.de/en/product/promo2000>

[24] *Instruction Manual Promo*. Vydal PALAS GmbH