



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

JEMNÉ ČÁSTICE PRODUKOVANÉ KRBOVÝMI KAMNY

40/5000 FINE PARTICLES PRODUCED BY THE STOVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Škvařil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Ondřej Škvařil
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Energetické inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Jemné částice produkované krbovými kamny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku produkce jemných částic produkovanými krbovými kamny. Hlavní část práce je věnována experimentálnímu hodnocení vlivu vybraných provozních parametrů krbových kamen na produkci jemných částic. Na základě provedených měření bude navržen algoritmus řízení provozu krbových kamen pro redukci produkce částic.

Cíle diplomové práce:

1. Zpracovat stručný přehled problematiky jemných částic v atmosféře a jejich produkce různými zdroji.
2. Realizovat experimentální měření koncentrace a velikostní distribuce jemných částic ve spalinách krbových kamen.
3. Navrhnout algoritmus provozování krbových kamen se sníženou produkcí jemných částic.

Seznam doporučené literatury:

PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s., ISBN 978-80-214-4300-6.

RIEDLANDER, Sheldon K. (Sheldon Kay). Smoke, dust, and haze: fundamentals of aerosol dynamics. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2000, 407 s. ISBN 0-19-512999-7.

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: John Wiley, 1999, 483 s. ISBN 0-471-19410-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá problematikou jemných částic produkovaných při spalování v krbových kamnech. První část práce pojednává o rozboru atmosféry, zdravotních dopadech, tuhých znečišťujících látkách a jejich vzniku dělení, odloučení a zákonnou a vyhláškou regulací. Teoretická část práce je věnována obecnému rozboru biomasy a jejímu spalování.

V experimentální části jsou vyjmenovány jednotlivé způsoby měření částic dle veřejných vyhlášek, poukázání na možné chyby při měření a metody identifikace naměřených jemných částic. Následuje konkrétní měření vzniklých velmi jemných částic metodou SMPS (z angl. Scanning Mobility Particle Sizer) a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova

zdraví, aerosoly, emise, jemné částice, tuhé znečišťující látky, spalování, biomasa, rozbor paliva, metody měření částic, identifikace částic, krbová kamna

ABSTRACT

This master thesis deals with problematics of fine particles produced during combustion in fireplace stoves. The theoretical part is focused on the analysis of the atmosphere, health consequences, solid pollutants, the formation of particles (origin), particle separation and how they are regulated by laws. Theoretical section of the thesis addresses analysis of biomass and its combustion.

In the applied section are listed given methods of the particles measuring according to regulations, common errors during measurement and methods of identification of measured fine particles. Then follow specific measurements of the formed very fine particles produced by the SMPS method. Subsequently, the results of the measurement are evaluated and summarized in the conclusion.

Key words

Health, aerosols, emissions, fine particles, solid pollutants, combustion, biomass, fuel analysis, methods of particle measurement, particle identification, fireplace stove.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠKVAŘIL, Ondřej. *Jemné částice produkované krbovými kamny* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124735>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 98 s. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem *diplomovou práci* na téma: „**Jemné částice produkované krbovými kamny**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a také všem kteří mě podporovali ať už modlitbou nebo cennými radami.

podpis

OBSAH

ÚVOD.....	15
1 Emise.....	16
1.1 Rozbor atmosféry.....	16
1.1.1 Troposféra.....	16
1.1.2 Stratosféra.....	16
1.1.3 Exosféra.....	16
1.2 Rozbor vzduchu.....	17
1.2.1 Aerosoly původní:.....	17
1.2.2 Aerosoly antropogenní.....	17
1.2.3 Složení antropogenních aerosolů.....	17
1.2.4 Procentuální zastoupení plynů v atmosféře.....	17
1.3 Člověk a zdraví.....	18
1.3.1 Plíce.....	18
1.3.2 Názory společností na téma znečištění ovzduší.....	18
1.3.3 Cigaretový kouř.....	19
1.3.4 Smog.....	19
1.4 Emise.....	20
1.5 Imise.....	20
1.5.1 Nejsledovanější emise.....	21
1.5.2 Emise síry a dusíku (SO₂ , (NO_x)).....	21
1.5.3 Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU).....	22
1.5.4 Přízemní ozón (O₃).....	22
1.5.5 Oxid uhelnatý (CO).....	23
1.5.6 Tuhé znečišťující látky (TZL).....	23
2 Tuhé částice.....	24
2.1 Vznik TZL.....	24
2.1.1 Vznik hrubých částic TZL.....	24
2.2 Zánik TZL.....	24
2.3 Praktické Příklady vzniku TZL.....	25
2.4 Dělení TZL.....	25
2.5 Dělení PM částic.....	27
2.5.1 PM 10 (částice menší než 10 mikrometrů).....	27
2.5.2 PM 2,5 (částice menší než 2,5 mikrometrů).....	27
2.5.3 PM 1 (částice menší než 1 mikrometr).....	27
2.5.4 Ultra jemné částice (částice menší než 0,1 mikrometr).....	27
2.6 Separace částic.....	29
2.6.1 Mechanické odlučovače MO.....	29
2.6.2 Elektrické odlučovače EO.....	29
2.6.3 Látkové a keramické filtry.....	30
2.6.4 Mokrý vápencová vypírka spalín.....	30
3 Normy a zákony.....	31

3.1	Ochrana ovzduší v České republice	31
3.2	Ministerstvo životního prostředí-zákon o ochraně ovzduší	31
3.3	Protokoly o dálkovém znečišťování ovzduší	33
3.4	Příloha č. 6 vyhláška č. 480/2012 Sb.	33
3.5	Emisní norma Euro.....	34
4	Zdroje částic.....	36
4.1	Dělení Stacionárních zdrojů:	37
4.2	Dělení Mobilních zdrojů:	37
4.3	Zdroje s největším zájmem veřejnosti.....	38
4.3.1	Letadla	38
4.3.2	Auta.....	38
4.3.3	Nákladní lodě.....	39
5	Biomasa a spalování.....	41
5.1	Dělení energetické biomasy	41
5.2	Průzkum v oblasti vytápění biomasou.....	42
5.3	Obecný rozbor paliva	42
5.3.1	Palivo	42
5.3.2	Tuhá paliva	42
5.3.3	Hrubý rozbor paliva	43
5.4	Detailní rozbor složek paliva.....	43
5.4.1	Hořlavina (h).....	43
5.4.2	Popelovina (Ar).....	44
5.4.3	Voda (Wr).....	44
5.5	Spalování paliva	44
5.5.1	Výhřevnost paliva.....	45
5.5.2	Spalné teplo	45
5.6	Druhy tuhých paliv	45
5.7	Kotle	46
5.7.1	Podle použitého paliva se dělí kotle na paliva:.....	46
5.7.2	Podle způsobu spalování tuhých paliv se dělí kotle:	46
6	Experimentální část.....	47
6.1	Metody měření částic	47
6.1.1	Jak se zákon vypořádává s měřením PM částic?	47
6.1.2	Popis odběrového zařízení (sondy).....	48
6.1.3	Manuální metody stanovení TZL	49
6.1.4	Metody měření TZL zavedených US EPA	50
6.1.5	Metoda TEOM.....	50
6.1.6	Method IO-2.1	51
6.1.7	Method IO-2.2	51
6.1.8	Method IO-2.3	51
6.1.9	Method IO-1.1	51
6.1.10	Method IO-1.2.....	53
6.1.11	Method IO-1.1.....	53
6.1.12	Obecné požadavky na kvalitu monitorování.....	54
6.2	Nejčastější chyby při měření	54

6.3	Metody identifikace částic PM	55
6.3.1	Laserová difrakce	56
6.3.2	Gravitační sedimentace	56
6.3.3	Obrazová analýza	56
6.3.4	Akustická spektroskopie	57
6.3.5	Gravimetrická metoda	57
6.3.6	Optické prachoměry	58
6.3.7	Fidas-Monitor jemných částic	59
6.3.8	Elektroodlučovače (EO).....	59
6.3.9	Metoda SMPS (z angl. Scanning Mobility Particle Sizer).....	59
6.4	Popis spalovacího zařízení	60
6.4.1	Popis kamen	60
6.4.2	Regulace a proces spalování kamen.....	61
6.4.3	Porovnání s automatickým kotlem	61
6.5	Použitá měřicí metoda	62
6.5.1	Kamna	62
6.5.2	Vymrazovačka.....	63
6.5.3	Analyzátor plyných látek	63
6.5.4	Ejektorová ředička.....	63
6.5.5	Impaktor	64
6.5.6	Neutralizátor	64
6.5.7	DMA (Differential Mobility Analyzer) model 3080L	64
6.5.8	CPC (Condensation Particle Counter) model 3775.....	65
6.6	Průběh měření	65
6.6.1	Rozmístění termočlánků v krbových kamnech	65
6.6.2	Podmínky měření a měřících zařízení.	66
6.7	Měření	67
6.8	Vyhodnocení výsledků	68
6.8.1	Vyhodnocení měření teploty	68
6.8.2	Vyhodnocení měření tlaku	72
6.8.3	Vyhodnocení měření částic	74
6.8.4	Rozbor jednotlivých uzlů-počet částic	74
7	ZÁVĚR.....	87
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	94
	SEZNAM OBRÁZKŮ	96
	SEZNAM TABULEK	98

ÚVOD

Dnes žijeme v době vysokého komfortu, velikého technologického pokroku, a přesto se můžeme ocitnout v situaci, kdy se nám zhorší zdraví, přibývá alergií zároveň se otepluje planeta a mnoho ekosystémů je nabouraných a zdevastovaných, nehledě na to, že se až dramaticky mění počasí. Výrobci automobilů tvoří nemalou část globálního HDP, letecké společnosti zvětšují svoji klientelu, lodě převážejí miliony přepravních kontejnerů přes oceány, vznikají nové elektrárny spalující biomasu, jaderné a uhelné elektrárny, spalovny, továrny. Mnoho domácností je vytápěno biomasou. Všechna tato technologická zařízení zásadně ovlivňují životní prostředí, protože produkují emise. Mezi tyto spadají i tuhé znečišťující látky, které kvůli svojí schopnosti navázat na sebe karcinogenní a jiné životu nebezpečné látky, vstupují skrze plíce a plicní sklípky do celého těla a způsobují různé nemoci jako je např. rakovina.

Výhodou plic je, že do určitého průměru (10 mikrometrů), dokážou TZL zcela zachytávat a pak je i z plic odvádět ven. Díky zhoršujícím se stavu ovzduší na mnoha místech celého světa, už v minulosti, byly podniknuty některé legislativní kroky v boji proti znečištění životního prostředí, avšak ne natolik, aby byl vzduch zdravotně nezávadný, proto se emisemi zabývá legislativa, a obzvláště ministerstvo životního prostředí dodnes. Lidstvo by zřejmě asi chtělo něco, jako perpetuum mobile, které nebude vypouštět nic špatného do okolí a dá nám vše, jako je světlo, teplo, zdraví a spoustu elektřiny zdarma.

První kapitola této diplomové práce je rešeršní a zabývá se: rozbořem atmosféry, zdravotními dopady, emisemi, TZL jejich vznikem, zánikem a dělením, legislativou spojenou s měřením emisí, zdroji částic a jejich dělení, biomasou a jejím spalováním biomasy a rozbořem paliva.

Druhá část této diplomové práce se zabývá Experimentem a jeho vyhodnocením. Nejprve jsou zde zmíněny způsoby, jak lze částice měřit v Severní Americe dle US EPA, poté Metody identifikace částic, modernější a celosvětové. V další části experimentu je popis spalovacího zařízení, který byl použit v experimentu, následuje popsání použité měřicí metody a průběh měření s vyhodnocením výsledků a návrhem na ekonomičtější, a hlavně ekologičtější spalování. Na konci experimentální části je závěr, v kterém je vše shrnuto i s konkrétními výsledky.

1 Emise

Pojem emise je dnes velmi známý, avšak aby se dalo zaměřit na emise, je třeba se na celou věc podívat celostně a uvědomit si co vše je kolem nás a ovlivňuje naše životy a z globálního hlediska, co je kolem naší země a co vše obsahuje vzduch, který lidstvo vdechuje.

1.1 Rozbor atmosféry

Atmosféra je plynná substance obklopující naši Zemi a tvoří přechod od Země do meziplanetárního prostoru. Atmosféru lze rozdělit dle vzdálenosti od povrchu země na tyto části, respektive pásy:

1. *troposféra* (do 18 km)
2. *stratosféra* (do 30 km)
3. *mezosféra* (do 80 km)
4. *termosféra* (do 700 km)
5. *exosféra* (do 40 000 km)

Mezi jednotlivými pásy jsou úzké přechodné pásy zvané pauzy, které dělíme:

1. *tropopauza*
2. *stratopauza*
3. *mezopauza*
4. *termopauza*

1.1.1 Troposféra

Nejnižší část atmosféry, kde je obsaženo největší množství vzdušné složky, a to celkově asi 80 % vzduchu (v nízkých zeměpisných šířkách, tj. na rovníku, je v troposféře obsaženo 90 % celkového vzduchu a v mírných a vysokých zeměpisných šířkách 75 % vzduchu. Výška troposféry dosahuje dle vzdálenosti od pólů výšky 7 až 19 km a časově je nestálá výškově o několik kilometrů.

1.1.2 Stratosféra

Část atmosféry, která je charakterizována zvýšeným podílem ozónu a je někdy nazvána ozónosférou.

1.1.3 Exosféra

Část atmosféry, která tvoří přechod do volného meziplanetárního prostoru. Horní hranice exosféry se pohybuje mezi 2 000 až 40 000 km nad zemským povrchem.

V rámci hledání nejlepší cesty, k tomu, jak být zdraví a dýchat ideálně čistý vzduch bez nečistot, je nutné se tedy zabývat hlavně troposférou. [1]

1.2 Rozbor vzduchu

Vzduch je směsí plynů, kapalných i pevných částic, tato směs se souhrnně nazývá aerosoly. Aerosoly vytváří atmosféru Země. Aerosoly by se dali rozdělit na aerosoly původní a antropogenní (vznik těchto aerosolů je zapříčiněn lidskou činností)

1.2.1 Aerosoly původní:

- *kosmický prach* *pevné částice (TZL)*
- *vulkanický prach* *(NO_x, SO_x) a pevné částice (TZL)*
- *z požárů* *(CO, CO₂, NO_x) a pevné částice (TZL)*
- *mikroorganismy* *(CH₄, H₂S, NO_x)*
- *látky z povrchu oceánu* *slané aerosoly a pevné částice (TZL)*
- *látky z povrchu půd* *prach a viry*
- *aeroplankton* *prach, viry a pevné částice (TZL)*

1.2.2 Aerosoly antropogenní

- *látky z průmyslu*
- *látky z dopravy*

1.2.3 Složení antropogenních aerosolů

- *oxid uhelnatý (CO)*
- *oxid siřičitý (SO₂)*
- *oxidy dusíku (NO_x)*
- *těkavé organické látky (VOC)*
- *pevné částice (TZL) a aerosoly*
- *smog*

1.2.4 Procentuální zastoupení plynů v atmosféře

- *dusík N₂ (78,04 %)*,
- *kyslík O₂ (20,95 %)*,
- *argon Ar (0,93 %) a*
- *oxid uhličitý CO₂ (0,036 %)*

Roční nárůst CO₂ je 0,00016 % Dalšími plyny zastoupenými v atmosféře jsou neon Ne (0,0018 %), hélium He (0,0005 %), metan CH₄ (0,0002 %), krypton Kr (0,0001 %) a vodík H₂.

[1]

1.3 Člověk a zdraví

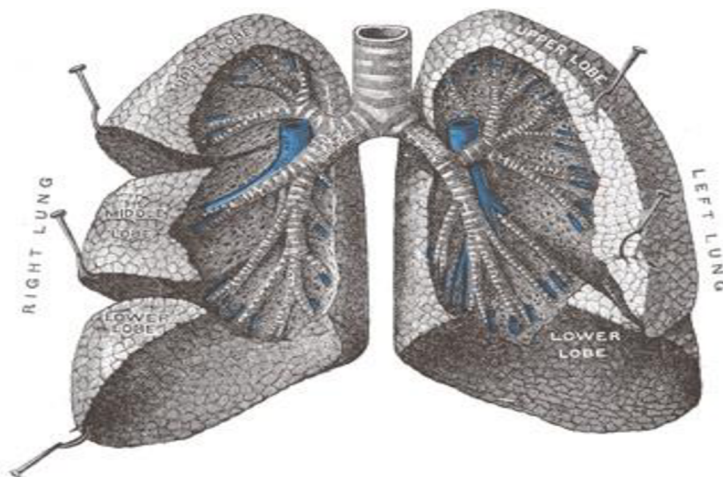
Zdraví má člověk pouze jedno a když pro to, aby byl zdravý nic nedělá a jen tak si zbůhdarma žije, dříve či později se něco v jeho těle porouchá a pak hledá někoho, případně něco, co mu pomůže. Není lepší nemocem, tedy poruchám, předcházet?

Protože však tato diplomová práce je tematicky zaměřena na emise, a to hlavně jemné částice, tak se v oblasti zdraví práce zaměří na tu část, na kterou má znečištěné ovzduší největší vliv, a to hlavně v oblasti dýchání. Dýchá se plicemi a skrze plíce prostupují do krve různé látky jako: kyslík, dusík, oxid uhličitý, oxid uhelnatý a další. Skladba plic a postupné vstupování do hloubky plic až do nejmenších částí, je jako prostup „sítí“, a tak proto by se dalo říct, že plíce jsou jeden velký systém sítí, který je zakončen těmi nejjemnějšími sítí, které se nazývají plicní sklípky.

1.3.1 Plíce

Od největších částí plic po nejmenší je tedy postup takový: „hlavní průduška, laloky, segmenty, průdušky, termální průdušinky, respirační průdušinky a plicní sklípky.“ [2] Někdy to připomíná velmi rozvětvenou korunu stromu. Nejdůležitější jsou plicní sklípky (alveoly), tenkostěnné váčky, ve kterých probíhá difúze dýchacích plynů. Jejich stěna je tvořena pouze jednou vrstvou extrémně tenkých buněk, pneumocytů I. typu. Bazální membrána, na kterou pneumocyty nasedají, přechází ve stěnu okolních kapilár, aby mohly plyny volně přecházet. Alveolární membrána je tlustá jen asi 1 μm . Dohromady v jedné plíci je přes 350 miliónů plicních sklípků a jejich celkový povrch je 40 až 100 metrů čtverečních. [2]

Plíce, jakožto párový orgán, jsou nezbytnou součástí lidského těla. Člověk vydrží bez kyslíku, potažmo bez funkce plic, jen několik minut. Tento orgán je nedílnou součástí dýchací soustavy. Plícím nejvíce škodí kouření, znečištěné ovzduší a někdy i složko průmyslově zpracovaná stravy jako jsou: barviva, konzervanty a chemické látky. [3], [2]



Obrázek 1 Řez plicemi člověka [3]

1.3.2 Názory společností na téma znečištění ovzduší

JAMA=The Journal of the American Medical Association v jednom článku píše, že vědci zjistili na základě osmnáctiletého výzkumu probíhajícího v šesti amerických městech, že pokud je člověk dlouhodobě vystaven znečištěnému vzduchu, mohou jeho plíce být stejně znečištěny, jako by denně kouřil krabičku cigaret po dobu mnoha let. U lidí vystavených vyššímu množství přízemnímu ozonu v kombinaci s dalšími znečišťujícími látkami, se zdraví během 18 let změnilo, jako by 29 let kouřili krabičku cigaret denně. [4]

WHO=World Health Organization uvádí, že 7 miliónů lidí na celém světě každoročně umírá v důsledku znečištění ovzduší. Ve vyspělých zemích se sice kvalita ovzduší zlepšuje, ale na Východě a v řadě rozvojových států se situace čím dál více zhoršuje. Nejvíce znečištěnými městy jsou Dillí, Káhira, Dháka v Bangladéši, Bombaj v Indii a Peking v Číně. Globálně se dá říct, že 90 % lidí dýchá znečištěný vzduch nebo dokonce velmi znečištěný vzduch. Míra znečištění závisí však vždy na tom, jaké prostředky boje se znečištěním do toho dá vláda, a tak více než 90% úmrtí připadá na země s nízkými či středními příjmy, především se jedná o Asii a Afriku. Zdaleka nejhůř na tom jsou města Dillí a Káhira, kde se zvětšila hustota prachových částic až desetinásobně s porovnáním bezpečné hranice, stanovené společností WHO. [5]

1.3.3 Cigaretový kouř

Když ve výše uvedeném textu JAMA a WHO, zmiňují, jak moc je zdraví člověka ovlivněno tím, co dýchá a porovnávají vše v rámci článku s kouřením cigaret anebo s okolními městy, je dobré si něco říct i o cigaretovém kouři, úmrtnosti, cenně a taky o látkách, které spadají pod pojem emise.

Na celém světě kouří až 1,3 miliardy lidí ze současné populace cca 7,7 miliardy, což je asi necelých 19% populace. Zároveň každoročně umírá 4 800 000 na následky kouření. V ČR kouří zhruba 2 300 000 lidí, z hlediska populace starší 18 let to je 26 %. V roce 2012 byla z jedné cigarety odvedena daň 2, 1 Kč. Dnes je to 2,63 Kč a dle nového zákona roku 2020 to bude 2,9 Kč. Protože se zvyšuje daň zvyšuje se i cena cigaret. Cigaretový kouř obsahuje obrovské množství škodlivých látek. [6]

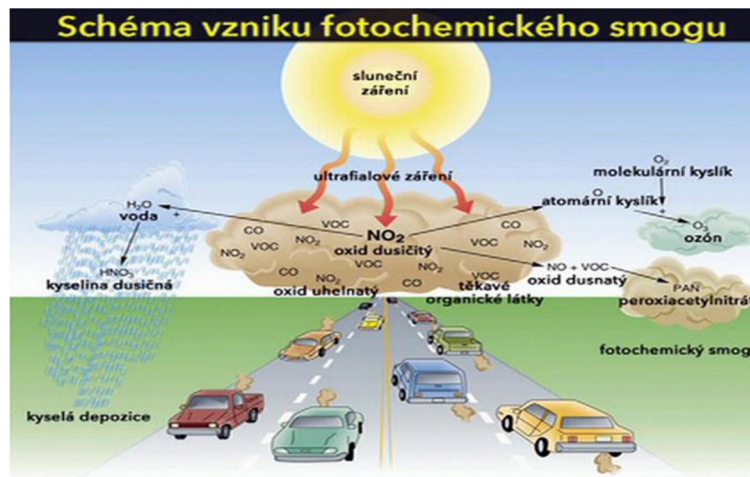
Cigaretový kouř obsahuje více než 4000 látek, které vznikají nedokonalým spalováním. dále obsahuje 43 typů karcinogenů, které jsou prokázány např: dibenzantracen, benzo-a-pyren, dimetylnitrosamin, dietylnitrosamin, vinylchlorid, hydrazin, arsen a kadmium, velké množství karcinogenů, mutagenů, alergenů a toxických látek jako oxid uhelnatý. Obsahuje i malé množství těžkých kovů, kyanovodíku a nitrosaminy. Obsahuje i radioaktivní látky jako je polonium a olovo, kvůli nimž se plíce člověka kouřícího dvě krabíčky denně, ozáří jako při rentgenu plic už po 6 dnech. [7]

1.3.4 Smog

Překročení povoleného množství měřených látek se lze dostat do stavu, který se nazývá smogová situace. Smogová situace je stav mimořádného znečištění ovzduší, kdy úroveň znečištění oxidem siřičitým, oxidem dusičitým, částicemi PM10 nebo troposférickým ozonem překročí některou z prahových hodnot (dle § 10 odst. 1 a přílohy č. 6 zákona o ochraně ovzduší). Příčinou smogových situací jsou obvykle špatné rozptylové podmínky. Často se dostaneme do této situace v zimě a za inverzních podmínek. [8] Obecně známo se rozlišují 2 typy smogu:

Smog „losangeleský“

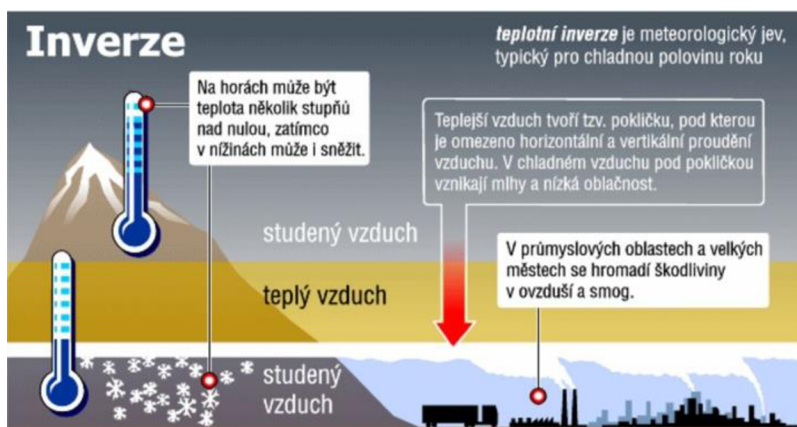
Tento smog, je typický pro letní období. Jedná se o vzduch, jehož součástí jsou hlavně vysoké koncentrace O_3 , C_xH_y , NO_x , C . Vzniká působením slunečního záření na výfukové plyny, převážně z aut.



Obrázek 2 Podmínky vzniku Los Angeleského smogu [9]

Smog „londýnský“

Tento smog je typický pro zimní období, kdy je vzduch obohacen zplodinami, např: NO_x , SO_2 , TZL (polétavý prach), vzniklými při spalování fosilních paliv (uhlí). Nejčastěji vzniká za podmínek chladu a špatného rozptylu.



Obrázek 3 Podmínky vzniku Londýnského smogu [9]

1.4 Emise

Emise je množství látek vypouštěných z daného zařízení, v případě automobilu se měří přímo u výfuku, jedná se tedy o tzv. (STK) a v případě továrny, elektrárny či jiného velkého stacionárního zdroje se často měří na ústí z komína. Měří se např: emise oxidů (oxid siřičitý, oxidy dusíku), polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) a tuhých znečišťujících látek. Emisní limity jsou stanoveny zákonem a udávají se v uvolněném množství za čas např. mg/rok. [10]

1.5 Imise

Imise se na rozdíl od emisí, neměří u zdroje znečištění, ale u jeho příjemce, tedy na konkrétním místě (lokálně), kde se pohybují lidé. Český hydrometeorologický ústav provádí měření imisí (tedy měření znečištění, resp. kvality ovzduší) pomocí 97 stanic, řadu dalších stanic provozují jiné organizace. Nejčastěji měřenými látkami jsou oxid siřičitý, oxidy dusíku a pevné částice PM_{10} . [10]

1.5.1 Nejsledovanější emise

- oxid siřičitý (SO_2)
- oxidy dusíku (NO_x)
- polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)
- oxid uhelnatý (CO)
- přízemní ozón (O_3)
- tuhé znečišťující látky (TZL)

1.5.2 Emise síry a dusíku ((SO_2) , (NO_x))

Protože oxidy dusíku, hov. noxy a oxidy síry, hov. soxy způsobovaly kyselé deště a tyto deště spálily na některých místech lesy, tak se jimi začalo lidstvo a vědci zabývat vcelku brzy a v uvozovkách zavčas, proto je silných kyselých dešťů, které byly zapříčiněny hlavně uhelnými elektrárnami, čím dál méně a vegetace se může obnovovat.

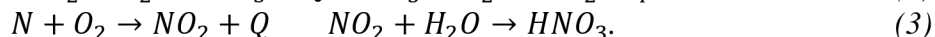
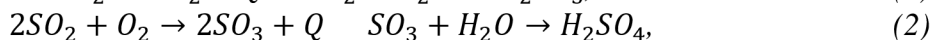
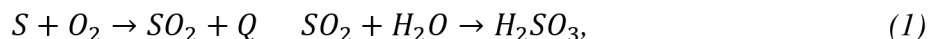


Obrázek 4 Spálený les kyselým deštěm, 03.05.2017, Středočeský kraj [11]

Kyselý déšť

Kyselý déšť je ve své podstatě déšť, který má nižší hodnotu pH, přirozené pH bývá kolem 5,6-6 a kyselé srážky mohou mít hodnotu pH 3-4. Kyselý déšť nevznikají náhodou a za jejich příčinou stojí obzvláště velké elektrárny spalující hlavně fosilní paliva, jako je např. méně výhřevné a nekvalitní hnědé uhlí s vyšším obsahem síry a dusíku. Hlavními přirozenými zdroji kyselinotvorných plynů jsou totiž emise, které vznikají v sopkách. Podobné chemické reakce ovšem vznikají také v bažinách a oceánech. [11]

Vznik kyselých srážek je tedy z chemického pohledu vysvětlitelný pomocí těchto chemických rovnic:



U antropogenního vzniku kyselých dešťů je hlavní příčinou spalování paliva (hlavně fosilní palivo). Spalováním se uvolňuje teplo a spousta dalších látek ať už hořlavých nebo nehořlavých a mezi nimi jsou i např: oxid siřičitý, oxid sýrový a oxid dusičitý, ty následně reagují s vodou, která je ve formě páry, následně pak vznikají kyseliny. Takto vzniklé kyseliny, které jsou ve skupenství plynném, mají tendenci kondenzovat, a to po ochlazení pod rosný bod. V kotlích se tedy snažíme vyvarovat podkročení tohoto bodu. (udržením spalin nad teplotou rosného bodu, ohřevem vzduchu a napájecí vody atd. aby se nezničily výměníky, stěny a další části kotle. Kyselina je velmi agresivní a reaguje s povrchem, tak že koroduje. Jde o degradaci a někdy i úbytek materiálu. Problémem je, že i samotný rosný bod se mění a například síra nebo prachové částice (PM) zvyšují teplotu rosného bodu. Teplota rosného bodu je zároveň těžko určitelná a během provozu má nestálou hodnotu (mění se). Když se tedy počítá teplota rosného bodu, tak se využívá poloempirického vzorce:

$$t_r = t_k + \frac{\beta^* \sqrt[3]{S_r}}{1,2266(x_u \cdot A_r)} \quad (4)$$

t_k = teplota sytosti vodní páry při parciálním tlaku vodní páry ve spalinách

S_r = redukovaný obsah síry v palivu

β = součinitel, volí se podle přebytku vzduchu (α = součinitel přebytku vzduchu)

A_r = redukovaný obsah popele

x_u = zbytkový obsah uhlíku v tuhých zbytcích, které uletí (ve spalinách)

Hlavní dopad kyselých dešťů je na lesy, vodní organismy, půdu, půdní organismy, a budovy, neboť reaguje s vápníkem a může zničit omítky historických budov

Odsířením elektráren v České republice došlo zejména v 90. letech 20. století, Díky odsíření došlo tak k výraznému zlepšení kvality ovzduší, a to hlavně v oblastech kde se nacházely elektrárny, popřípadě jejich okolí. [12]

Největším výrobcem energie v České republice je akciová společnost ČEZ, která od roku 1998 provozuje pouze takové elektrárny, které splňují emisní limity zákona na ochranu ovzduší. Této společnosti se podařilo mezi lety 1992 až 1998 odsířit až 6000 MW výkonu. Emise oxidu siřičitého i popílku se díky technologickým změnám snížily o 90 % a emise oxidů dusíku až o 50 %. Investice a rychlost, v jaké vše proběhlo, byly důkazem, že ČEZ je spolehlivý výrobce a poskytovatel elektřiny nejen v ČR. [13]

1.5.3 Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)

PAU, polycyklické aromatické uhlovodíky, jsou skupina více jak sta látek tvořených pouze uhlíkem a vodíkem ve formě benzenových jader a jsou běžnou součástí životního prostředí. Jsou součástí řady průmyslových produktů jako je nafta, benzín nebo asfalt. Přirozeně vznikají při spalování jakékoliv organické hmoty (doprava, elektrárny, průmysl, cigaretový kouř apod.). Ovlivňují lidské zdraví při vdechnutí, požití i kožním kontaktem. Mnoho látek PAU je řazena mezi lidské karcinogeny (rakovina plic, trávicího traktu nebo kůže). V atmosféře mohou existovat v plynné i v pevné fázi, avšak většinou se naváží na pevné částice. u některých PAU dochází ke zpětnému odparu do ovzduší. PAU charakteristicky zapáchají, páry mají dráždivé účinky na oči a kůži, působí fotosensibilizaci (Zvýšená citlivost pokožky, která reaguje na sluneční světlo alergickými projevy) a byly prokázány i negativní účinky na ledviny i játra. Mají také vliv na snížení plodnosti a vývojové vady potomků.

Rozlišuje se několik skupin PAU a ty nejzávažnější jsou: Látky poškozující hormonální systém (EDC), karcinogenní látky, mutagenní látky, látky toxické pro vodní organismy, teratogenní látky (poškozující plod), látky ohrožující rozmnožování (reprotoxické), perzistentní bioakumulující látky (PBTs), perzistentní organické látky (POPs) [14]

1.5.4 Přízemní ozón (O_3)

Přízemní ozón je jeden z mnoha emisí, které mají negativní vliv na lidské zdraví a vzniká složitou chemickou reakcí, kterou musí doprovázet intenzivní sluneční záření. Ke vzniku tohoto přízemního ozonu jsou zapotřebí i oxidy dusíku (NO_x), které vypouštějí, jak elektrárny, spalovny a rafinerie tak auta. Zvýšený výskyt fotochemického smogu se přičítá zejména rozvoji automobilismu, protože aut skoro exponenciálně přibývalo, a taky jsou nejbližší lidským plicím. Kvůli ozonu mohou mít lidé dýchací potíže, mohou je pálit oči, mohou být malátní a snižuje se i obranyschopnost organismu. Nejvíce ohroženi jsou starší lidé, děti, astmatici a alergici. [15]

1.5.5 Oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý (CO) je bezbarvý, hořlavý plyn bez chuti a bez zápachu. CO vzniká nedokonalým spalováním uhlíkatých materiálů. Na emisích CO se podílí mimo přírodu především doprava a veškeré průmyslové procesy, kde se spaluje. Toxicita CO závisí na množství a době expozice a tím že se naváže na červené krvinky tak snižuje množství kyslíku, který se nemá pak na co navázat. CO působí na srdce, cévní a nervový systém a v případě otravy se projevuje ztmavnutím kůže, křečemi, kómatem a nakonec smrtí.

Určité množství CO vzniká v atmosféře oxidací methanu. Nezanedbatelným zdrojem CO je i cigaretový kouř. [16]

1.5.6 Tuhé znečišťující látky (TZL)

TZL jsou částice různých velikostí, tvaru, původu, složení a struktury, které jsou za teploty a tlaku v komíně, výduchu, výpusti nebo při měření emisí přítomny v odpadním plynu v pevném skupenství a jsou jím unášeny. Tuhé znečišťující látky mohou vznikat jak přírodní (např. sopečná činnost, pyl nebo mořský aerosol), tak lidskou činností (spalování fosilních paliv ve stacionárních i mobilních zdrojích, otěry pneumatik, brzd, vozovek apod.) Protože TZL jsou středem zájmu této práce, budu se jím více věnovat v jedné z dalších nyní však rozeberu složení atmosféry a vzduchu se kterým se emisní látky promíchávají. [17]

2 Tuhé částice

Jak už bylo v předchozí kapitole zmíněno, tak tuhé částice mají mnoho způsobů, jak mohou vzniknout ať už přírodní cestou nebo kvůli lidské činnosti, nicméně Důvod jejich zkoumání, je jejich markantní vliv na lidské zdraví. Nejde o to, že jsou to jenom nějaké částice, které co se týče velikosti, mají od nanometrů po milimetry, ale jsou také charakteristické různorodým složením, proto jde o to, že na sebe dokážou navázat další, tělu škodlivé, látky jako: těžké kovy, karcinomy, kyselé aerosoly, perzistentní organické látky atd. Z hlediska lidského zdraví jsou nejnebezpečnější částice v rozmezí 0,25 až 5 μm , přičemž nejvíce jsou v plicích zadržovány částice o velikosti kolem 1 μm . Plíce mají schopnost samočištění řad škodlivin, které se dostávají do plic spolu s tuhými částicemi. [18]

2.1 Vznik TZL

Jemné Částice TZL vznikají ve 3 fázích

- *Nukleace* (vznik nukleačních jader)
- *Kondenzace* (růst jader=částic)
- *Koagulace* (shluk částic)

Tuhé částice, jinak taky nazývané sekundární aerosoly, vznikají jednak chemickými reakcemi látek v atmosféře, které přemění plyny na částice – tzv. konverze plynů na částice. Na začátku vzniknou **nukleační jádra**=částice do 20nm, to se odborně jedná o tvorbu stabilních zárodků kondenzované fáze za nepřítomnosti cizích povrchů, tedy pouze náhodným shlukováním molekul kondenzující složky. [19] následně rostou **kondenzací** plynů a vodní páry. Tyto částice se mohou dále **shlukovat** tzv. koagulovat neboli narůstat do větších rozměrů jako 100 nm až 2,5 μm . Růst můžou vzájemnými reakcemi anebo nalepováním se na sebe. Druhotně vznikají tuhé částice přímo při spalovacím procesu, za nedokonalého spalování a následnou kondenzací ochlazených plynů. Též zde může dojít ke koagulaci částic vzniklých nukleací. S tím, jak nám narůstá velikost částice, tím taky roste její existence a zároveň klesá její výskyt v ovzduší, protože vlivem gravitace padá rychleji k zemi. Zároveň od určité velikosti jako je 10 μm , přestává být plicím tak významně škodlivá. Složení již zmíněných částic bývá: prvky, anorganické anionty, elementární a organický uhlík (zejména saze), organické sloučeniny a další.

2.1.1 Vznik hrubých částic TZL

Jedná se o částice velikostí nad 2,5 μm . Tyto částice vznikají rozpadem, abrazí materiálu, erozí zemského povrchu, třením povrchů o sebe, z mořské vody atd. Nejsou však předmětem zkoumání, a tak se jimi tato práce detailněji zabývat nebude.

2.2 Zánik TZL

Zánik částic anebo jejich zmenšení je např. vypařováním, deštěm či gravitací. **Vypařování** probíhá z volného povrchu kapaliny za každé teploty, při níž kapalné skupenství existuje. Různé kapaliny se vypařují různě rychle (nejrychleji např. éter, pak líh, voda, rtuť, ...). Rychlost vypařování se zvýší, zvýší-li se teplota kapaliny, zvětší-li se obsah volného povrchu a odstraňují-li se vzniklé páry nad kapalinou (odsáváním, foukáním, větrem, ...). **Vodní srážky**, jinak řečeno déšť, je jedním z dalších příčin zániku TZL v ovzduší, protože na povrchu částic voda kondenzuje a při dopadu na zem kapky, zároveň dopadne i samotná částice. **Gravitace**, jednoduše řečeno, čím je částice větší, tím má i přirozeně větší váhu, a tedy je přitahována k zemi větší silou. [20], [21], [22]

2.3 Praktické Příklady vzniku TZL

Když je spalováno palivo, zejména biomasa, vznikají jemné částice, které je možno detekovat ve spalinách. Jakým způsobem vzniknou tyto částice závisí na vlastnostech paliva: (vlhkost, zrnitost, materiál), na podmínkách spalování: (Teplota, čas, turbulence, množství vzduchu) a nakonec taky na typu spalovacího zařízení.

Jedním ze způsobů, jak vznikají částice TZL je za nedokonalého spalování ve vznětovém (dieselovém) motoru. Na kapičkách vodní páry ve spalinách kondenzují sloučeniny uhlíku a vznikají saze – mikroskopické kuličky karbonu o průměru kolem 0,5 mikrometru, Pevné částice PM o průměru kolem 0,5 mikrometru, vážící na sebe i uhlovodíky a sloučeniny síry. Tyto částice, které se projevují tmavým kouřem z výfuku, se sice samy vzněcují při teplotě 550 °C, ale při nižší teplotě výfukových plynů (studený motor nebo bohatá směs) vystupují z výfuku. [23]

Proces spalování je běžně brán jako nedokonalý proces, protože se uvolňují látky jako CO, HC a NO_x, které jsou hořlavinou a mohly by ještě být spáleny. NO_x, jež jsou příčinou mimo jiné kyselých dešťů a TZL, jež jsou momentálně největším předmětem zkoumání a brzy se tak i ty nejjemnější části tzv. UFP nebo NP mohou objevit v novém zákonu nebo jeho úpravě či doplnění.



Obrázek 5 Skutečné spalování paliva [22]



Obrázek 6 Ideální spalování paliva [23]

2.4 Dělení TZL

Pojem TZL zaštiťuje obecně všechny formy výskytu těchto částic. U těchto částic záleží na způsobu vzniku nebo jejich shodných vlastnostech, proto je nutné si je rozdělit:

- **Prach**
Částice vznikající při mechanických operacích, erozích hornin, sopečnou činností. Když bychom nebrali v potaz původ vzniku, můžeme tento pojem použít obecně pro všechny formy tuhých částic.
- **Popílek**
Částice produkované spalováním pevných paliv
- **Dým**
Jemně tuhé i kapalné částice vznikající při kondenzaci a tunutí par látek.
- **Kouř**
Částice vznikající spalováním organických látek obsahujících převážně uhlík.
- **Aerosol,**

Jemně tuhé i kapalné částice v ovzduší, které setrvávají ve stavu vznosu.

- **Suspendované částice**

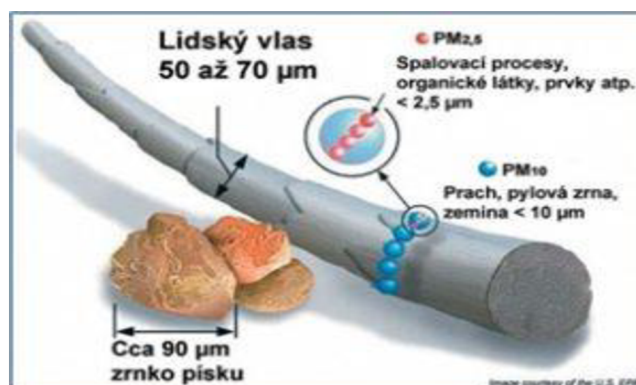
Jemné částice atmosférického prachu, které zůstávají delší dobu ve vznosu a mají předpoklady pro dálkový přenos. [24]

Tato práce, jak už bylo zmíněno výše, je cílena na částice, co se do velikosti týče, a to až na ty nejmenší možné, které je možné zachytit a detekovat, díky moderními zařízením a technologiím. Aby se dalo lépe zorientovat v problematice částic, obzvláště pak těch nejjemnějších, je nutné si stanovit další rozdělení částic, a to dle už veřejně známých zákonů a norem. V rámci zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. Je možné i dojít ke konkrétním emisním limitům, které by samotné zdroje neměli překročit a pokud je překročí, budou za to perzekuováni. Nyní je třeba jasně definovat pojem PM, který pochází z angličtiny (Particulate Matter) a jedná se o kapalné nebo směsné částice o velikosti určitého počtu mikrometrů. PM částice dělíme na: ultra jemné částice, nano částice, jemné částice (PM 2,5; PM 1;) a hrubé (PM 10).

Tabulka 1 Rozdělení částic [67]

Rozdělení částic podle velikosti		
Název	Průměr částic (nm)	Označení
hrubé částice	< 10 000	Coarse particles PM 10
jemné částice	< 2 500	Fine particles PM 2,5
submikrometrové částice	< 1 000	Fine particles PM 1
ultrajemné částice	< 100	Ultrafine particles UFP
nanočástice	< 50	Nanoparticles NP

Množství částic, a tedy jejich koncentrace v ovzduší závisí i překvapivě na ročním období. Nejvýznamnějším zdrojem částic jsou lokální topeniště (až 34 %) a zákon říká, že pokud se topí dřevem, tak nesmí být mokré, ale ideálně 1-2 roky uskladněné na otevřeném vzdušném místě. Tyto částice početně rostou v ovzduší hlavně v chladnějším období, především kvůli sezónnímu využívání tepelných zdrojů a zhoršených rozptylových podmínkách. [25]



Obrázek 7 Názorné porovnání PM částic s lidským vlasem [25]

2.5 Dělení PM částic

2.5.1 PM 10 (částice menší než 10 mikrometrů)

Částice PM10 jsou takovou hranicí – s většími částicemi si lidské tělo umí poradit. Buď je zachytí chloupky v nose, nebo je člověk vykašle atp. Člověk se jich zkrátka „zbaví“. To však již neplatí u částic pod 10 μm . Částice PM10 deponují zejména v horních cestách dýchacích (v průduškách), kde mohou např. podráždit sliznici (může se jednat o ostré krystalky). Měření částic PM10 v ovzduší má 2 výstupy: 24hodinový průměr, kde imisní limit je 50 mikrogramů na metr krychlový vzduchu, který smí být překročen max. 35x za rok. Druhý výstup je roční průměr v hodnotě 40 mikrogramů na metr krychlový vzduchu, který být už překročen nesmí. Majitelé zdrojů, které znečišťují ovzduší se musí řídit zákonem 201/2012 Sb. [25]

2.5.2 PM 2,5 (částice menší než 2,5 mikrometrů)

Tyto částice jsou menšího průměru než PM 10 a jsou i lehčí, proto vydrží ve vzduchu mnohem déle, než se dostanou vlivem gravitace na zem, proto je u nich větší pravděpodobnost vdechnutí. Částice přejdou úplně v klidu přes nosní dutiny, kde i chloupky dokážou normálně tuhé částice zachytávat, a dostanou se do plic, a to hlouběji až do dolních cest dýchacích. Je také známo, že jemné částice vyvolávají nebo zhoršují chronická onemocnění, jako je astma, srdeční infarkt, bronchitida a další respirační problémy. Koncentrace PM 2,5 se považuje za nezdavou, když stoupne nad 35,4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Zákon platný z roku 2012 udává, že částice PM 2,5 nesmí překročit za jeden kalendářní rok hodnotu 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Denní limit není stanoven jinak. [26]

2.5.3 PM 1 (částice menší než 1 mikrometr)

Tyto částice jsou velmi jemné a pronikají až do plicních sklípků. U těchto částic už je významnějším parametrem povrch a počet, ne jejich váha a jsou velmi nebezpečné a složité detekovatelné. Tyto částice český zákon dosud nereguluje, nicméně se určitě brzy, na základě probíhajících rozsáhlých studií něco změní.

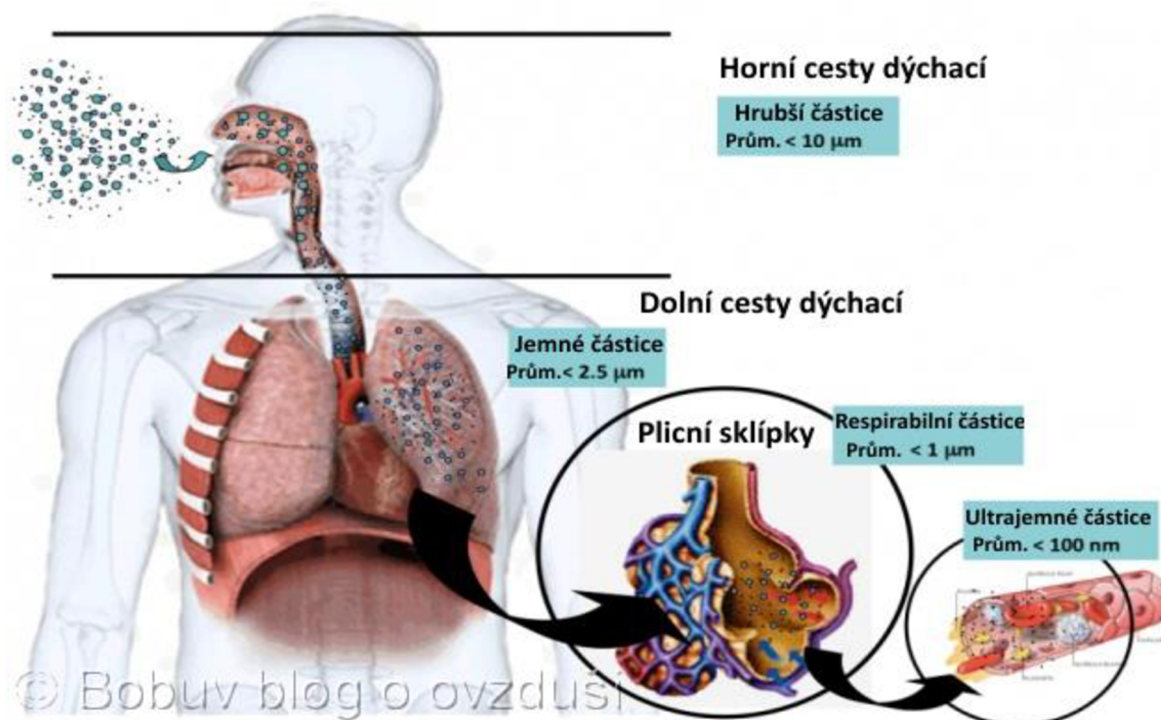
2.5.4 Ultra jemné částice (částice menší než 0,1 mikrometr)

Tyto částice mohou skrze plicní sklípky prostupovat až do krevního řečiště a před těmito částicemi je obzvláště důležité být chráněn. Částice mohou mít vliv jak na dýchací soustavu, tak na krevní oběh. Důležitá je, jak fyzikální podstata částic (tvar), tak chemická čili z čeho jsou částice složeny. Vše, co na sebe naváží, donesou skrze krevní oběh do celého těla. Tyto částice se dnes měří zatím jen v rámci výzkumu, jejich vliv na kardiovaskulární nemoci a nemoci spojené s dýcháním jsou však ověřené a při testech u zvířat, které byli v prostředí o vyšším množství ultra-jemných PM. Problém je často v tom že když roznáší krev v celém těle různé karcinogenní látky, tak se dostanou i do hlavy, kde vyvolávají degenerace a ovlivňují i centrální nervový systém. Nejvíce ultra-jemných částic vzniká ze spalovacích motorů. [26], [27]

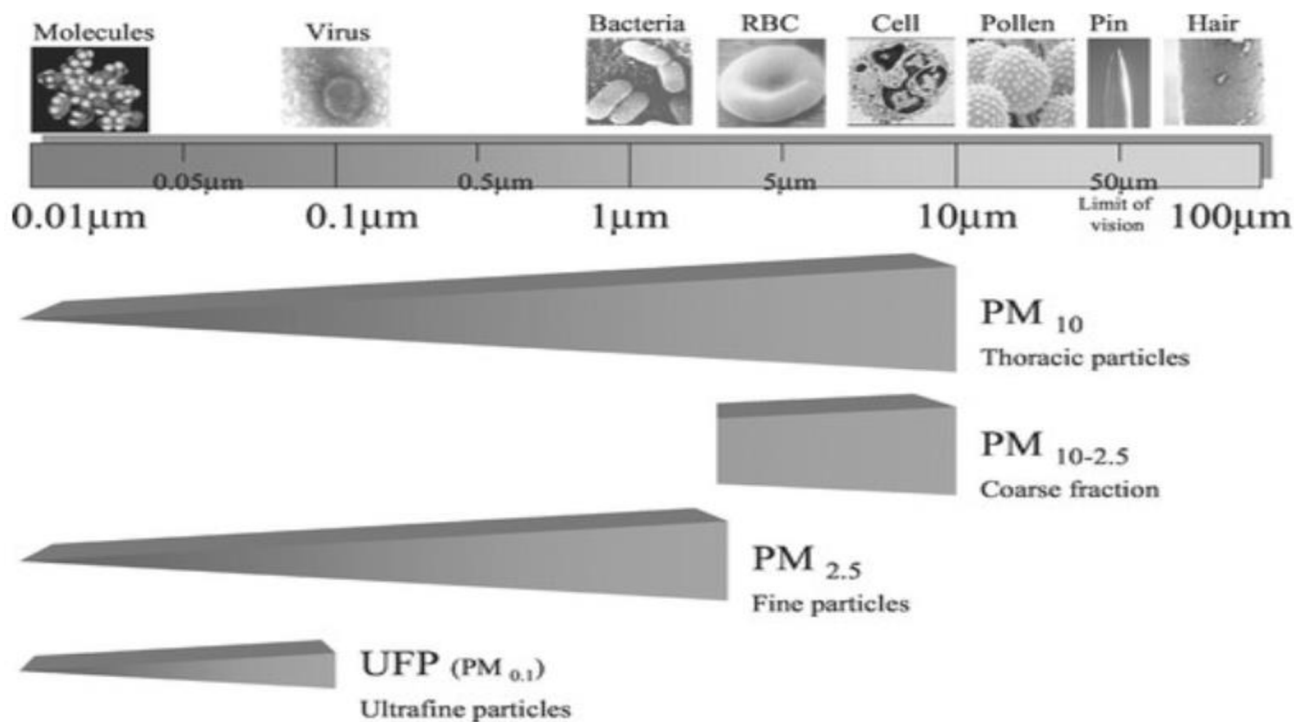
Tabulka 2 Množství vdechnutých částic vybrané velikosti [28]

Velikost částic (μm)	Částice vdechnuté denně
0,1	11 000 000 000
0,2	2 607 000 000
0,5	387 200 000

Podtrženo sečteno jsou nejmenší částice opravdu nejnebezpečnější a mají nezanedbatelný vliv na lidské zdraví i na úmrtnost. Následující obrázek přiblíží průchodnost plic částicemi PM.



Obrázek 8 Riziko vniknutí částic do plic [26]



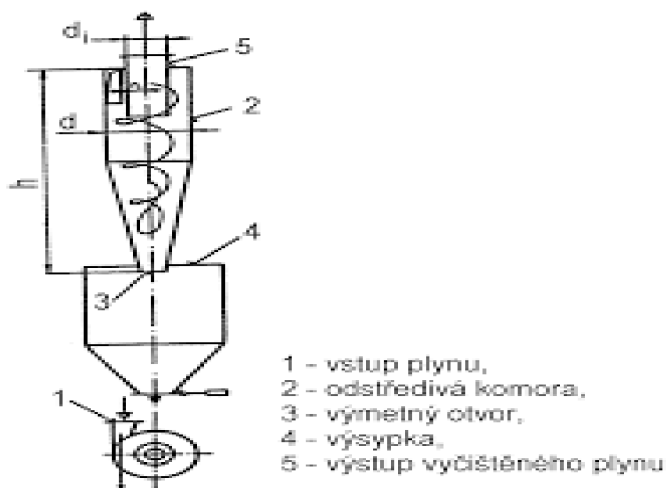
Obrázek 9 Porovnání částic TZL s biologickými buňkami [29]

2.6 Separace částic

Nejdůležitější vlastností souboru tuhých částic z hlediska jejich odlučování je specifikace jejich tvaru, zrnitosti (granulometrickém složení) a hustoty, Tvar částic se odvíjí v první řadě od způsobu jejich vzniku. Ideální tvar je koule, takové částice vznikají kondenzací a tuhnutím par látek. Složitější tvar mají částice vznikající mechanickými operacemi (drcení, mletí). Některé částice, často produkované spalovacími procesy, mohou obsahovat dutiny různých velikostí. Pro samotný proces čištění spalin, zvláště mechanických částic, lze použít různých metod. [30]

2.6.1 Mechanické odlučovače MO

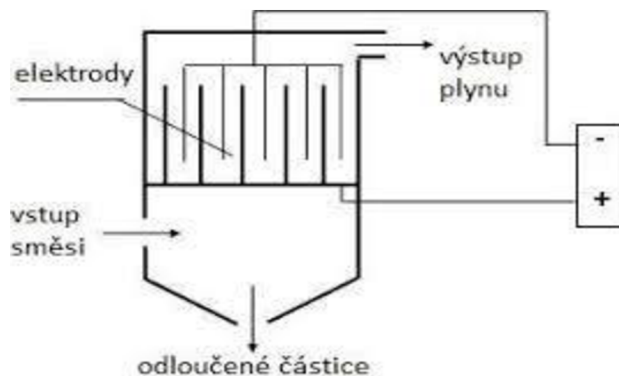
Suché cyklony a mokré cyklony, fungující na principu zpomalování částic vlivem odstředivé síly v kuželovitých zařízeních. Čím jsou větší částice tím více se zpomalují třením, a tak ztratí rychlost a padají do zásobníku. Čím je větší cyklona tím větší trasu krouží a může se tak více částic odloučit. **(Malá účinnost, skoro se nepoužívají)** [31]



Obrázek 10 Suchý mechanický odlučovač [32]

2.6.2 Elektrické odlučovače EO

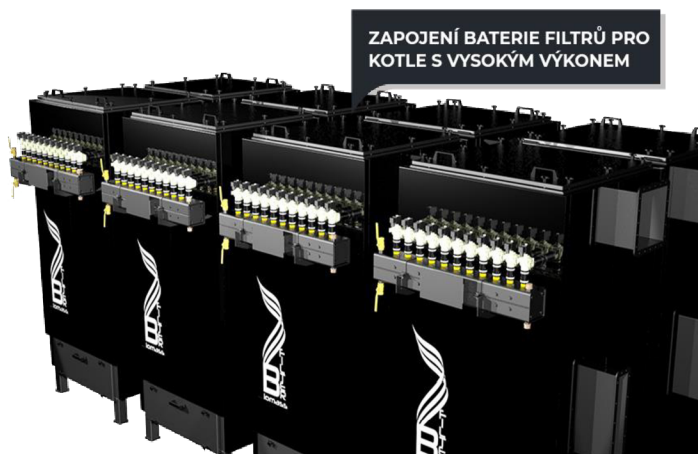
Zařízení funguje na principu odlučování TZL nebo lépe PM, pomocí přitažlivých sil mezi nabitými částicemi a opačně nabitou sběrací elektrodou. Částice se tedy záměrně nabíjí jedním nábojem a poté letí dále a pomocí opačně nabitě sběrací elektrody jsou přitahovány. [31]



Obrázek 11 Schéma elektrického odlučovače [33]

2.6.3 Látkové a keramické filtry

Filtry zachytávají částice dle velikosti jejich průměrů a využívá se i jejich schopnost adsorpce plynných složek na zachycených mechanických částicích popele či aditiva. Filtr funguje jako síto, díry v sítu propouští částice menší, než je průměr díry, a naopak větší průměry se zachytávají a následně se přesouvají volně do sběrného prostoru. [31]

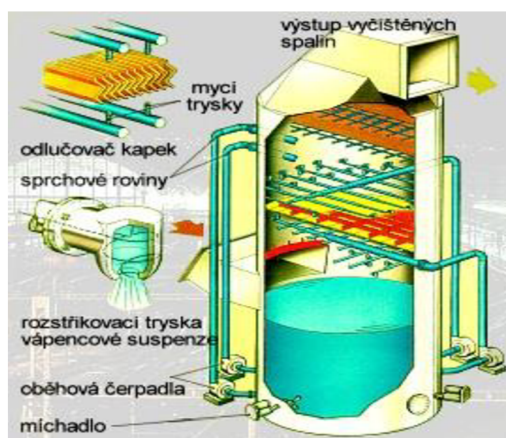


Obrázek 12 Zapojení filtrů [34]

2.6.4 Mokrý vápencová vypírka spalin

Tato metoda je nestandartní chemickou technologií, která je vhodná pro veliké jednotky, jako elektrárny, kde je vysoký požadavek na účinnost odsíření a má vysokou pořizovací cenu. Produktem odsíření je energosádrovec. Výhodou je pak vcelku levný provoz, a to že neprodukuje žádné odpadní vody. I když je tato metoda zaměřena na odsíření, tak jejím dalším velkým plusem je že dokáže velmi dobře pomocí absorbování v absorbéru odloučit i velké procento tuhých znečišťujících látek (TZL). Konstrukce absorbéru je složena z cirkulační nádrže a tělesa absorbérů po celé ploše absorbérů se rozstříkuje absorbátor a nejčastěji jím je čistá voda nebo se do vody přidává absorpční činidlo tzv. vápencová suspenze. Mezi velké výhody této metody čištění spalin patří vysoká účinnost i při kolísavém proudu spalin.

Proces: v odsiřovacím absorbéru (vstřebává látku, kterou pak předá) jsou spaliny intenzivně promývány vápencovou suspenzí (recirkulovanou). Zahuštěný vznikající sádrovcový kal, bývá míchán s popílkem a vzniká tak mokrý stabilizát. Stabilizát je mokrý anebo vlhký a má omezenou dobu skladování. Vznikající sádrovcový kal je nutno zahušťovat. [35], [36]



Obrázek 13 Mokrý metoda odsíření [36]

3 Normy a zákony

3.1 Ochrana ovzduší v České republice

Naskýtá se samotná otázka, co vše může lidstvo pro lepší ovzduší a proti vzniku jednotlivých aerosolů dělat, jak ovlivnit množství již dosud vzniklých aerosolů, a hlavně jak ochránit zdraví lidí a taky samotnou přírodu. Bez té by člověk neměl látky nezbytné k přežití jako: kyslík (O_2), Vodu (H_2O) jídlo složené z dalších látek. Naštěstí si svět, Evropská unie i Česká republika všimá míry znečištění ovzduší, ničení přírody a změny zdraví u lidí.

Česká republika má samotný orgán, který se nazývá Ministerstvo životního prostředí a zabývá se touto problematikou velice důkladně. Kupříkladu vezmeme-li historicky, co vše se začalo zákony, normami a vyhláškami radikálně omezovat, tak se dojdeme k síře, tedy množství oxidů síry, následně množství oxidů dusíku a množství **TZL=tuhých znečišťujících látek** a dalších.

Za první náznaky právní ochrany ovzduší na území ČR lze považovat nařízení ministra zdravotnictví č. 24/1954 Sb. Později přišel zákon č. 35/1967 Sb., jenž již konkrétně stanovil přípustnou míru znečišťování a způsob vyměňování poplatků za její překročení. Pojem PM₁₀, označující částice menší než 10 μ m, se v české legislativě poprvé objevuje v nařízení vlády č. 350/2002 Sb., kdy jsou v rámci příprav vstupu země do Evropské unie přijaty imisní limity zmíněné škodliviny. O devět let později jsou přijaty imisní limity také pro frakci PM_{2,5} [37]

3.2 Ministerstvo životního prostředí-zákon o ochraně ovzduší

Na stránkách Ministerstva životního prostředí lze najít řadu odkazů na zákony sepsané a týkající se omezení produkce různých typů aerosolů. Např platnou právní normu s názvem zákon o ochraně ovzduší, jehož číslo je 201 sbírky 2012, psáno 201/2012. Tento zákon je zákonem platným, a tedy dosud nebyl změněn a dá se předpokládat, že dosud nebyl ani jiný sepsán a odhlasován. Jisté však je, že v rámci členství EU, je nucena ČR jako stát, přijímat a zapracovávat některé zákony EU do vlastní legislativy. I když je tu zákon **201/2012**, tak jeho podbody a části mají v některých případech další úpravy a novely, které jsou zmíněny v jiných zákonech nebo vyhláškách.

V tomto dokumentu, který má 78 stran se píše, že se parlament České republiky usnesl, nad tím, co se rozumí pod pojmem ochrana ovzduší a co vše se jím bude regulovat a přidávat do dosavadních, již vydaných zákonů v platnost. Zároveň se zde dočteme, co je, jak definováno a na co se nevztahuje tento zákon a koho a jak zasahuje nejvíce atd. [38]

Ochrana ovzduší (dle zákona 201/2012, s.1), je definována: „Ochranou ovzduší se rozumí předcházení znečišťování ovzduší a snižování úrovně znečišťování tak, aby byla omezena rizika pro lidské zdraví způsobená znečištěním ovzduší, snížení zátěže životního prostředí látkami vnášenými do ovzduší a poškozujícími ekosystémy a vytvoření předpokladů pro regeneraci složek životního prostředí postižených v důsledku znečištění ovzduší.“ [38]

„Tento zákon zapracovává příslušné předpisy Evropské unie a upravuje:

- a) přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší. Zde nás třeba zajímají emisní limity
- b) způsob posuzování přípustné úrovně znečištění a znečišťování ovzduší a jejich vyhodnocení
- c) nástroje ke snižování znečištění a znečišťování ovzduší.“
- d) práva a povinnosti osob a působnost orgánů veřejné správy při ochraně ovzduší
- e) práva a povinnosti dodavatelů pohonných hmot a působnost orgánů veřejné správy při sledování a snižování emisí skleníkových plynů z pohonných hmot v dopravě.“ [38]

Zákon nám dokonce říká, jaká je přípustná nejen úroveň znečištění, ale i znečišťování. Rozděluje zdroje znečištění a dle výkonu udává stropní limity emisí. Dále se zabývá emisemi v rámci vymezeného prostoru a počtu obyvatel. Emise se měří anebo počítají a následně se vyhodnocují. Zjišťování a vyhodnocení úrovně znečišťování by měl dělat sám provozovatel, dle daného postupu a podmínek. Může však přijít i inspekce, která provede vlastní měření. Přípustná úroveň a emisní limity (dle zákona 201/2012 s.2, s.3) jsou definovány:

„Přípustná úroveň znečišťování je určena emisními limity, emisními stropy, technickými podmínkami provozu a přípustnou tmavostí kouře.

Emisní limity musí být dodrženy na každém komínovém průduchu nebo výduchu do ovzduší.“ [38]

V 8. odstavci zákona (201/2012 s.5) se dá zjistit Národní program snižování emisí České republiky, který obsahuje:“

- a) *analýzu úrovně znečištění a znečišťování*
- b) *scénáře vývoje úrovně znečištění a znečišťování*
- c) *cíle v oblasti snižování úrovně znečištění a znečišťování, a to 1. emisní stropy pro Českou republiku, 2. směrné cílové hodnoty pro omezení acidifikace a zatížení troposférickým ozonem, 3. národní cíl snížení expozice pro částice PM_{2,5}*
- d) *opatření ke snižování úrovně znečištění znečišťujícími látkami, které mají stanoveny emisní limity, a úrovně znečišťování a předpokládaný přínos těchto opatření, zejména emisní stropy pro skupiny stacionárních zdrojů a skupiny mobilních zdrojů*
- e) *lhůty pro dosažení hodnot uvedených v písmenu c) a harmonogram pro realizaci opatření uvedených v písmenu d)*
- f) *orgány odpovědné za realizaci národního programu*
- g) *indikátory pro hodnocení plnění národního programu zohledňující vliv na zdraví a kvalitu ovzduší.“ [38]*

Z výše zmíněného zákona je patrné že se ministerstvo vcelku výrazně zabývá emisemi a že vyhlášky i zákony se dávají v platnost v rámci ekologie zavčas a skutečně mají dopad na zlepšení kvality našeho ovzduší. Např. síra se dnes z komínů elektráren dostane do ovzduší v tak malé míře, že je to až neuvěřitelné a obsah oxidů dusíku tzv. Nox, kvůli předcházení kyselým dešťům dnes též více jak desetkrát eliminován na velmi nízkou hodnotu. Když si osobně někdo zajde na návštěvu do spalovny SAKO v Brně, tak se dozví, že po nich ekologové a ministerstvo tak “šlape“, že si nemohou dovolit téměř žádné emise pouštět do ovzduší a že by se dalo z komína v podstatě i dýchat s úsměvem, oproti tomu, co vychází z komínů domácností na vesnicích. Ano existují dnes technologie na odsíření a odstranění dusíku, a nejen proto se věda zaměřuje na další oblasti zdraví, přičemž jednou z nich jsou pevné částice obsažené ve spalínách tzv. PM a jejich další dopad na zdraví člověka, obzvláště zaměří-li se na menší částice, než dosud známé a regulované částice o velikosti do 10 μ m (PM₁₀) a do 2,5 μ m (PM_{2,5}).

Dříve se z komínů dostávaly ven spaliny více znečištěné, tmavé, a tudíž každý věděl, že to není dobré a ani zdravé pro lidstvo. Dnes z některých komínů odchází víceméně světlejší kouř, ale je opravdu zdravější i ten? A jak to zjistit? Takovou otázku si kladlo a klade spousta

lidí a někteří už svoji odpověď našli. Nyní se však tato práce zaměřuje na emisní limity a jejich maximální počet překročení viz. Tabulka 3. [38]

Tabulka 3 Částice PM. Norma 201/2012 [38]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit	Maximální počet překročení
částice PM 10	24 hodin	50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35
částice PM 10	1 kalendářní rok	40 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0
částice PM 2,5	1 kalendářní rok	25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0

Z tabulky je možné vyčíst, jak je ošetřená produkce částic konkrétních parametrů a kolikrát lze tyto hodnoty překročit za rok, či 24 hodin. Doba průměrování říká, jak dlouho se částice měří, než je porovnána s imisní limitou je vyhodnocena.

Plnění imisního limitu se vyhodnocuje na základě průměru za 3 kalendářní roky. V Normě lze i zjistit, že každý znečišťovatel platí za množství škodlivých látek. Při produkci 1 tuny, PM10 zaplatí producent v tomto roce (2020) 12 600 Kč/t a od roku 2021 to bude 14 700 Kč/t.

Jak bylo výše zmíněno, tak se částice PM uvolňují do ovzduší různými způsoby a lidé můžou ovlivnit nejvíce ty, které zapříčinili svojí činností. Momentálně lidstvo nejvíce trápí stacionární spalovací zařízení a dopravní prostředky => spalovací motory. [38]

3.3 Protokoly o dálkovém znečišťování ovzduší

V rámci znečištění, přesahující hranice státu ČR byly přijaty protokoly o dálkovém znečišťování ovzduší přesahujícím hranice států. Tyto protokoly se zabývají:

- *Protokol o dlouhodobém financování Programu spolupráce při monitorování a vyhodnocování dálkového přenosu látek znečišťujících ovzduší v Evropě (EMEP)*
- *Protokol o snížení emisí síry přecházející hranice států nejméně o 30 % (1. protokol o síře)*
- *Protokol o snižování emisí těkavých organických látek (protokol VOC)*
- *Protokol o těžkých kovech*
- *Protokol o persistentních organických polutantech (Protokol o POPs)*
- *Protokol k omezení acidifikace, eutrofizace a tvorby přízemního ozonu (Göteborgský protokol).*
- *Protokol o snižování emisí oxidů dusíku nebo jejich toků přes hranice států* [39]

3.4 Příloha č. 6 vyhláška č. 480/2012 Sb.

Tabulka 4 Emisní faktory a poměry částic PM10 a PM2,5 v TZL [40]

<i>Hodnoty emisních faktorů, pro stanovení množství emisí výpočtem, při spalování tuhých paliv ve spalovacích stacionárních zdrojích (pouze TZL)- pro vypracování energetických posudků a auditů</i>			
Druh paliva	Konstrukce kotle	TZL	Jednotka
hnědé uhlí	prohořivací	44,3	kg/t spáleného paliva
	odhořivací	17,2	
	zplyňovací	2,24	
	automatický	0,704	

černé uhlí	<i>prohořivací</i>	67,7
	<i>odhořivací</i>	6,94
	<i>zplyňovací</i>	2,25
	<i>automatický</i>	1,23
Hnědo-uhelné brikety	<i>prohořivací</i>	17,4
	<i>odhořivací</i>	1,6
dřevo	<i>prohořivací</i>	7,22
	<i>odhořivací</i>	5,78
	<i>zplyňovací</i>	2,12
dřevní pelety	<i>automatický</i>	0,264

V tabulce si lze povšimnout, že co se týče vzniku TZL v kilogramech na tunu spáleného paliva, tak vzniká nejvíce částic hlavně v prohořivacím typu kotle, a dokonce co se týče srovnání v rámci dřeva a uhlí tak TZL v prohořivacím typu kotle vznikne až desetinásobně více TZL. Nejmenší množství TZL vzniká naopak při spalování v automatických anebo zplyňovacích kotlích, zde je poměr částic dřevo vs. uhlí zřejmě zanedbatelný. [40]

- **Prohořivací kotel**

Postupné spalování a spaliny procházejí přes vrstvu nespáleného paliva. Jednoduše díky přirozeného tahu zdola nahoru, prohořívá plamen vrstvou paliva.

- **Odhořivací kotel**

Postupné spalování paliva v dolní části kotle. Spaliny odcházejí mimo nespálenou vrstvu paliva. Nespálené palivo se postupně propadá do ohniště. Díky složitějším spalinovým cestám vyžadují tyto kotle velmi dobrý komínový tah.

- **Pyrolytický (zplyňovací) kotel**

K přívodu spalovacího vzduchu je použito ventilátoru. Kotel má dvě spalovací komory, v první se spaluje palivo (dřevo, uhlí) a ve druhé dochází ke spalování těkavých látek a plynů uvolněných při hoření paliva v první komoře. K pyrolýze (zplyňování) dochází při jakémkoli spalování, ale u prohořívání a odhořívání, k němu dochází živelně.

- **Automatický kotel**

Kotel, často dotovaný vládou ČR, může být pro spotřebitele velmi výhodný. Je ekologický, splňuje nejvyšší emisní třídu, dodá komfort. Bezesporu jednou z největších výhod je přiměřené dávkování paliva a ekologičnost samotného spalování. [41], [42]

3.5 Emisní norma Euro

Jedná se o závaznou normu Evropské unie stanovující limity škodlivin ve výfukových exhalacích benzinových a naftových motorů pro motorová vozidla v závislosti hmotnosti škodliviny na ujeté vzdálenosti. Normy stanoví limity oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO_x) a pevných částic (PM);. Limity se vztahují na vozidla nově uváděná na trh.

První emisní norma začala platit v Kalifornii roku 1968. První evropskou normou byla norma EHK 15 z roku 1971. Pro osobní vozy úředně ověřené a s jasně danými vlastnostmi platí dané Normy takto:

Rok	Norma	CO (g/km)	NO _x (g/km)	HC + NO _x (g/km)	PČ (g/km)
1992	I	3,16	-	1,13	0,18
1996	II	1,00	-	0,70	0,08
2000	III	0,64	0,50	0,56	0,05
2005	IV	0,50	0,25	0,30	0,025
2009	V	0,50	0,18	0,23	0,005
2014	VI	0,50	0,08	0,17	0,005

Obrázek 14 Emisní limity pro naftové motory [43]

Z emisní normy Euro, která vznikla roku 1992 a během let byla postupně změněna, lze jednoznačně vyčíst postupné zpřísnění pevné částice, kterými se zabývá tato práce, byly stanoveny na hmotnostní emisí 0,005 g/km a od roku 2014 se tato hranice zatím nezměnila. [43]

4 Zdroje částic

Dle Kategorie a zařazování zdrojů znečišťování ovzduší (§ 4, zák. č. 86/2002 Sb.) se zdroje znečišťování ovzduší dělí na stacionární anebo mobilní.

Stacionární spalovací zařízení

Spaliny z veškerých stacionárních spalovacích zařízení obsahují polétavé částice (popílek) a škodlivé plyny. Zákon je neúprosný, a tak se do elektráren zavedlo čištění spalin (odsíření, úpravy na kotlích ke snížení NO_x, modernizace a rekonstrukce odlučovačů popílku). Některé elektrárny byly odstaveny, aby jim mohl být vyměněn jejich původní kotel za kotel fluidní.

Když se podíváme na jeden z příkladů, uvidíme, že i odsířená elektrárna na uhlí není zcela Ekologická, tedy bezemisní. [44]

Tabulka 5 Odsířený elektrárenský blok-200MW [45]

Roční produkce odsířeného elektrárenského bloku o výkonu 200 MW spalující hnědé uhlí	
elektrická energie	1,3 TWh
SO ₂	2 000 t
popílek	166 t
NO _x	2 600 t

Většina stacionárních spalovacích zařízení často spaluje cokoliv jiného než uhlí, proto je dobré si ukázat alespoň množství látek kterých se po spálení uvolní velmi mnoho. Dobré je taky zmínit že až na popel (sypké, neshořelé zbytky hořlavých tuhých látek), který je odváděn spodem a je velmi dobře zužitkovatelný, jsou ostatní produkty spalování škodlivé a vesměs nijak lidstvu neprospěšné.

Tabulka 6 Množství emisí vzniklých spálením [46]

	kg CO ₂	kg SO ₂	kg NO ₂	kg CO	kg Popele	kg Popílku
při spálení 1 tuny uhlí vzniká	4 800	6	11	4,5 až 20	220	1,4
při spálení 1 tuny topného oleje vzniká	3 100	20	6	6 až 30	0	0
při spálení 1 tuny zemního plynu (1120 m ³) vzniká	2 300	0+-	4	0,5 až 3	0	0
Spalování uranu	0	0	0	0	0	0

Z tabulky je možné vyčíst, kolik kilogramů různých oxidů a popílku s popelem se uvolní při spálení 1 tuny konkrétního paliva.

Mimo výše zmíněné palivo ve stacionárních zařízeních, se používá i jako palivo odpad. Odpad se tedy spaluje anebo, a to je horší varianta jen skladuje. V nejlepším případě by se vše recyklovalo, avšak vše souvisí se vším a není to prý tak lehké. Při zmíněném, spalování odpadu (komunální, směsný, nebezpečný atd.) vzniká spousta dalších látek a nejnebezpečnější jsou ty toxické. Spalováním se zatěžuje ovzduší, voda i půda, protože i daný spálený odpad z jedné třetiny skončí ve formě popele někde uskladněn. Množství energie z odpadu se využije cca. ze

17-22 %. Jedná se o nejdražší způsob likvidace odpadů. Nicméně v současnosti je lepší nejspíše odpad spálit než skládkovat, produkce odpadu je příliš vysoká a recyklace některých odpadních surovin je příliš drahá. Nejšetnější z hlediska výroby energie je momentálně jaderná energie. [47]

4.1 Dělení Stacionárních zdrojů:

Podle míry svého vlivu na kvalitu ovzduší na kategorie

- *zvláště velké*
- *velké*
- *střední*
- *malé*[44]

Podle technického a technologického uspořádání na

- *zařízení spalovacích technologických procesů*
- *spalovny odpadů*
- *ostatní stacionární zdroje* [44]

Spalovací zdroje se zařazují podle tepelného příkonu nebo výkonu do těchto kategorií:

- *Zvláště velké spalovací zdroje o tepelném příkonu 50 MW a vyšším*
- *Velké spalovací zdroje o tepelném výkonu 5 MW do 50 MW*
- *Střední spalovací zdroje o tepelném výkonu od 0,2 MW do 5 MW*
- *Malé spalovací zdroje, o tepelném výkonu nižším než 0,2 MW.* [44]

Spalovny odpadů patří do kategorie zvláště velkých nebo velkých stacionárních zdrojů a podle druhu spalovaného odpadu se rozlišují na:

- *spalovny nebezpečného odpadu,*
- *spalovny komunálního odpadu a*
- *spalovny jiného než nebezpečného a komunálního odpadu.* [44]

Do kategorie zvláště velkých stacionárních zdrojů se zařazují spalovny

- *podle písmena a), pokud jejich jmenovitá provozní kapacita množství odstraňovaného odpadu je větší než 10 tun za den,*
- *podle písmena b), pokud jejich jmenovitá provozní kapacita množství odstraňovaného odpadu je větší než 3 tuny za hodinu, nebo*
- *podle písmena c), pokud jejich jmenovitá provozní kapacita množství odstraňovaného odpadu je větší než 50 tun za den.* [44]

4.2 Dělení Mobilních zdrojů:

- **Dopravní prostředky**

Silniční vozidla, drážní vozidla a stroje, letadla a plavidla

- **Nesilniční mobilní stroje**

Motorové sekačky a pily, sbíječky a jiné obdobné výrobky, dále pak buldozery, vysokozdvížné vozíky, pojízdné zdvihací plošiny, zemědělské a lesnické stroje, zařízení na údržbu silnic, sněžné pluhy, sněžné skútry a jiná obdobná zařízení

- **Přenosná nářadí vybavená spalovacím motorem**

Motorové sekačky a pily, sbíječky a jiné obdobné výrobky, jako kompresory, přemístitelné stavební stroje a další. [44]

4.3 Zdroje s největším zájmem veřejnosti

Vzhledem k současnému trendu cestování ať už letadlem, lodí anebo autem, je velmi časté téma: “Ekologie dopravních prostředků“. I když tedy je tato práce zaměřená na množství TZL z konkrétního zdroje, jako jsou krbové kamna a kotel, tak je velmi důležité trochu více poukázat na emisivitu, a to hlavně množství TZL, oněch výše zmíněných dopravních prostředků.

4.3.1 Letadla

V dnešní době, kdy vzrůstá počet letadel (nárůst o 5 % ročně), a tudíž i množství přepravených lidí těmito prostředky, je čím dál patrnější, že letadla mají negativní dopad na naše ovzduší, který je měřitelný globálně. Kupříkladu jedno civilní letadlo má spotřebu 4,3 litru paliva na 100 km, což je ve srovnání s automobily jen o 2,2 litru méně. V USA je to dokonce 10,1 litru. Za zmínku stojí i přeprava tryskovým letadlem pro 6 osob, kde je spotřeba na jednoho pasažéra 80 litrů na kilometr.

V praxi to znamená, že když poletíme přes atlantický oceán např: z Prahy do New Yorku 6500 km, tak letadlo spotřebuje 27 950 litrů paliva (letecký petrolej-nejčastěji, letecký benzín) a vyprodukuje 65 216 kg CO₂ a 349 kg oxidů dusíku a 28 gramů mechanických nečistot (TZL). Ve výšce 10 km nad zemí dokonce zapříčiní vznik ozonu=skleníkový plyn a celkově tak až 4x více poškozují životní prostředí než komíny a výfuky aut při stejném objemu škodlivin. [48] [49]

Tabulka 7 Vlastnosti leteckého petroleje [48]

<i>parametr</i>	<i>Palivo JET A-1</i>
<i>vzhled</i>	<i>čirý, jasný, bez viditelné vody a mechanických nečistot při teplotě okolí</i>
<i>mechanické nečistoty mg/l</i>	<i>1,0</i>
<i>hustota kg/m³</i>	<i>775,0-840,0</i>
<i>bod krystalizace °C</i>	<i>-47</i>
<i>výhřevnost MJ/kg</i>	<i>42,80</i>

V tabulce vybraných vlastností leteckého petroleje, je dobré si všimnout, jak málo mechanických nečistot se uvolní při spálení 1 litru paliva a že je palivo lehčí než voda, má vysokou výhřevnost, ale hlavně zamrzne až při -47 °C, což je dáno aditivy. Je dobré si uvědomit, že do každého, dnes užívaného, paliva motorových vozidel se přidávají aditiva, aby se předešlo různým problémům s hořením, namrznáním, výbušností atd.

4.3.2 Auta

Celosvětově se uvádí, že v provozu je už kolem 1,3 miliardy aut. Wikipedie uvádí, že např. v roce 2010 bylo vyrobeno celosvětově 78 milionů aut. [50] Škoda kupříkladu v roce 2018 vyrobila cca 880 000 aut. V roce 2017 se prodalo přes 90 milionů aut. A stále automobilový průmysl roste. [50]

Když tedy vyjede na cesty současně 1,3 miliardy aut a ujedou průměrně 41 km denně (vypočteno z průměru kolik ujede jeden Čech průměrně denně, tak máme denně ujetu 53,3 miliardy km (za okolností, že by všichni jezdili stejně jako průměrný Čech). [51]

Pro rok 2015 byl stanoven limit emisí CO₂ pro osobní vozy na 130 gramů CO₂ na kilometr. [52]

Při ujetí vzdálenosti 53,3 miliardy a průměrné spotřebě aut 5,6 litru benzínu na 100 km, kterou by si přála Evropská Unie, se tedy spotřebuje 9,5178 miliard litrů benzínu denně. Ze spálení 1 litru benzínu by se tedy nemělo uvolnit více než 0,09 g pevných částic, dle normy Euro 2014 (dosud stále poslední platná). V normě Euro 2014 nejsou ale dále uvedeny konkrétní údaje uvolněných pevných částic, jako jsou velikost a počet částic, což se dá považovat, při současných znalostech za velmi závažné. Když tedy auta ujedou 53,3 miliardy litrů denně, tak se uvolní do ovzduší 856,6 tun pevných částic (Za předpokladu že všechny auta mají kolem spotřeby výše zmíněné a uvolňují kolem 0,09g pevných částic na 1 litr benzínu. Spalováním jich sice vzniká mnohem více, ale technologie je dokáže ve větší části zachytit..

a) Během procesu spalování snižujeme emise

- Úpravou směšovacího poměru
- Ovlivněním teploty spalování

b) Po spalování snižujeme emise

- Katalyzátory
- Filtry [54]

Tabulka 8 Euro norma (zážehové motory) [43]

<i>Euro normy pro limity emisí aut- zážehové motory (Benzin)</i>		
<i>rok</i>	<i>norma</i>	<i>Pevné částice(g/km)</i>
<i>1992</i>	<i>I</i>	<i>0,18</i>
<i>2014</i>	<i>VI</i>	<i>0,005</i>

Z tabulky se dá vyčíst, jak se během 22 let změnila norma Euro týkající se aut a jejich emisních limitů. Byl vybrán jen konkrétní údaj, změna limitu na počet uvolněných pevných částic, odcházejících z výfuku ven.

4.3.3 Nákladní lodě

Velké námořní lodě a trajekty jsou poháněny „odpadním“ materiálem z rafinérií, mazutem a dalšími produkty z těžké ropy. Během jejich spalování vzniká obrovské množství nečistot: prachových částic, sazí a oxidů síry. Z hlediska emisí sazí a oxidů síry nákladní lodě zamořují více než všechny auta na světě [53]. Ke globální změně klimatu však podstatně více přispívají automobily. V současnosti se přepravuje přibližně devadesát.

v tomto roce (2020), je dovoleno lodím z komínů vypouštět maximálně 1,5 % namísto dosavadních 3,5 %. Doprava obecně produkuje přibližně čtvrtinu emisí CO₂, z toho auta tři čtvrtiny všech emisí z dopravy a lodě přibližně 15 % [53]

Zatímco největší nákladní loď Emma Maersk vyprodukuje více než 4 000 tun sazí ročně, tak průměrný automobil, který ročně najede 15 tisíc kilometrů, vyprodukuje cca. pouhých 100 gramů sazí. Po mořích se plaví na 90 tisíc kontejnerových lodí, takže jednoduchými počty dojdeme k číslu 360 miliard tun do ovzduší vypuštěných sazí ročně. Nicméně všechny lodě nejsou tak velké, takže množství vypuštěných pevných částic je dle odhadů o třetinu až polovinu menší. [53]



Obrázek 15 Největší nákladní loď Maersk [53]

Jako perla všech nadšenců ekologie září na vrcholku výletní loď Harmony. Loď je dlouhá cca 480 m , vysoká 35m a pojala by přibližně 5500 lidí. Spaluje topný olej cca 150 t/den =450 kg/den jemného prachu (PM) denně, což by např. odpovídalo emisím 21,45 miliónů aut Značky VolkswagenPassat s naftovým motorem 2,0 TDI. [53]



Obrázek 16 Výletní loď Harmony [53]

5 Biomasa a spalování

Biomasa je obecně veškerá organická hmota na Zemi, která se účastní koloběhu živin v biosféře. Jedná se o těla všech organismů, živých i mrtvých, od největších druhů až po mikroskopické – tj. živočichů, rostlin, hub, bakterií a sinic. Přirozeně sama vzniká a zaniká rozložením v biosféře. [55]

Z energetického hlediska je významná pouze energeticky využitelná biomasa (energetická biomasa, někdy zkráceně pouze biomasa). Biomasu lze považovat za akumulované sluneční záření s nízkou účinností. Ve své podstatě je to jednoduchý proces, při kterém látky jako voda, oxid uhličitý a sluneční energie jsou přeměněny na cukr a kyslík. Cukr se ukládá a taky spotřebovává na růst bylin. [55]

5.1 Dělení energetické biomasy

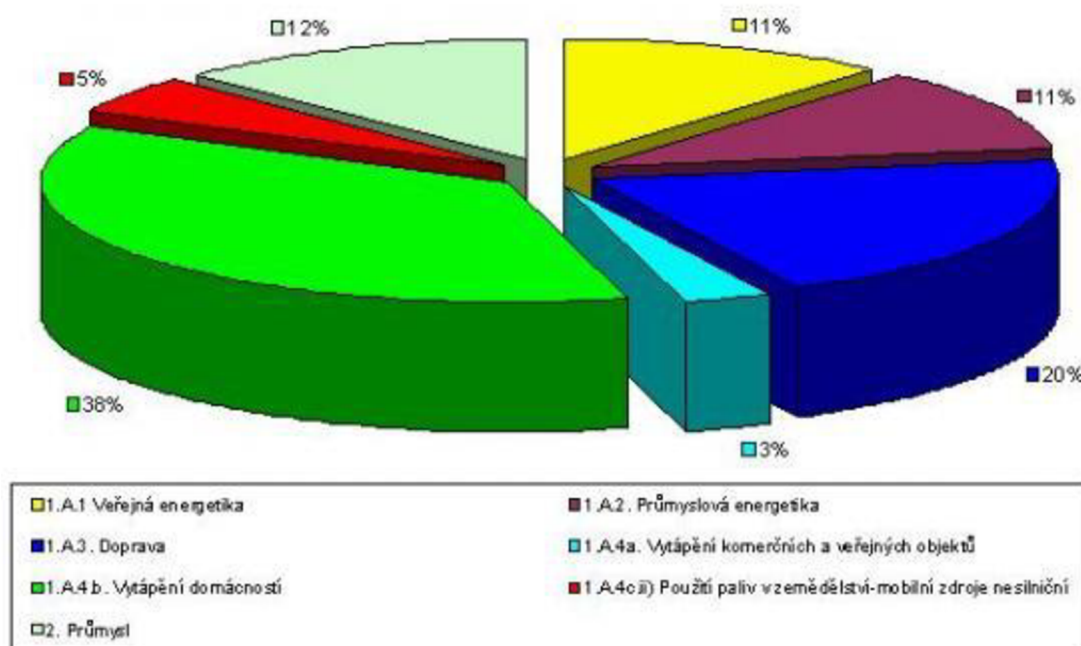
- „Fytomasa-hmota rostlin obecně
- *Dendromasa-speciálně stromy*
- *cíleně pěstovaná (energetická) biomasa-zejména byliny a rychle rostoucí dřeviny (RRD)*
- *biopaliva*
- *pevná*
- *kapalná*
- *plynná*
- *odpadní biomasa*
- *z rostlinné výroby-sláma, plevy, zbytky z čištění zrnin apod.*
- *z živočišné výroby-hmůj, kejda, močůvka*
- *z těžby a zpracování dřeva-piliny, hobliny, odřezky apod.*
- *biologicky rozložitelný odpad (BRO)*
- *komunální (BRKO) - zbytky potravin, papírové obaly*
- *průmyslový (BRPO) - odpady z výroby papíru, cukru, mouky, odpady z jatek apod.*
- *splašky z kanalizace“ [55]*

Biomasa může být před konečným využitím zpracovávána různými technologickými procesy, např. řezáním, drcením, štěpkováním, lisováním pelet nebo briket, lisováním oleje, termickými procesy, spalováním, zplynováním, rychlou pyrolýzou, chemickými procesy, esterifikací, mikrobiologickými procesy, alkoholovým kvašením, anaerobní digesí, kompostováním. [55]

Uvádí se, že spalování biomasy je z hlediska emisí oxidu uhličitého neutrální, neboť množství produkovaného oxidu uhličitého je srovnatelné s množstvím, spotřebovaným rostlinami při jejich růstu (fotosyntéza).

Při spalování biomasy se měří emisní faktory CO, CO₂, emise těžkých kovů, (PCDD/PCDF) PAU, polychlorované bifenyly (PCB) a PM₁₀-PM_{2,5}, nejvíce jsou, v rámci této práce, zajímavé opět a jenom prachové částice PM. [56]

Srovná-li se tedy v rámci zaměření na prachové částice PM, jaký podíl jednotlivých sektorů, tak vyjde takový graf, na kterém je patrné, že až 38 % částic PM₁₀ vznikne vytápěním domácností, tedy spalováním uhlí a biomasy v domácnostech.



Obrázek 17 Významné antropogenní zdroje prachu v ČR (2010) [58]

5.2 Průzkum v oblasti vytápění biomasou

Podle šetření Energo 2015 Českého statistického úřadu byl počet domácností spočítán na 4 304 173. Z tohoto čísla tvořily 24,7 % domácností využívá k vytápění tuhé obnovitelné zdroje energie (biomasu, a to nejčastěji zpracované dřevo) a pouze 6,6 % uvádí, že nevyužívají žádný jiný zdroj energie. Struktura toho, čím Češi topí nebo ohřívají vodu, se podstatně mění. Zatímco v roce 1990 pocházela skoro polovina energií z uhlí, v roce 2015 je to jen 13 %. Domácnosti upouštějí od uhlí. Na domácnosti připadá 28 % celkové tuzemské energetické spotřeby. 39 % energie, kterou Češi spotřebují tvoří spalení tuhých paliv. Pokud jde o tuhá paliva, domácnosti používající hnědé uhlí vykazaly průměrnou roční spotřebu 3,7 tuny, spotřeba uhelných briket v jedné domácnosti činila 2,4 tun, dřevěných briket se spotřebovalo průměrně 1,3 tuny na byt, Dřevěných pelet 1,8 tuny, palivového dřeva 4,7 tuny. [37], [57]

5.3 Obecný rozbor paliva

5.3.1 Palivo

Palivo je látka, která při spalování uvolní určité množství tepla, které se využívá pro lidské potřeby (vytápění domu, ohřátí užitkové vody). Paliva se v základu dělí na tuhá, kapalná a plynná. Paliva je možno také dělit podle jejich původu na fosilní (uhlí, ropa, zemní plyn), obnovitelná (především biomasa) a odpadní (odpadní plyny, komunální a průmyslové odpady, kaly z čistíren odpadních vod). Tato práce je zaměřena na paliva tuhá, a proto ostatní paliva už zde nijak rozváděna nebudou. Většina tuhých paliv, má jisté hmotové složení a standardně vychází z definice tří základních složek: hořlavina (prchavá a neprchavá), popelovina a voda. [60]

5.3.2 Tuhá paliva

Nejčastějším tuhým palivem je uhlí, dále sem patří biomasa, zemědělské, průmyslové a komunální odpady. Je nutné se zajímat také o vlastnosti tuhých paliv, které se můžou predikovat. Predikovat se dá např.: kolik a jakých látek se případně uvolní při hoření, kolik

maximálně možného tepla jsou lidé schopni z konkrétního druhu palivo dostat atd. Složení tuhých paliv se určuje hrubým rozbořem, který je znázorněn níže v tabulce. [60]

5.3.3 Hrubý rozbor paliva

Hrubý rozbor paliva je dělán z důvodu lepšího nahlédnutí do toho, co ve skutečnosti spalování přispívá a co naopak škodí. Hrubý rozbor udává celkovou skladbu paliva a skladbu produktů po spálení.

Tabulka 9 Hrubý rozbor paliva-surové uhlí [60]

	← Surové uhlí →		
přimísená voda	voda W^r	popeloviny A^r	hořlavina h
	přítěž (balast)		prchavý podíl tuhý podíl
	bezvodé uhlí (sušina)		
spálením vznikne:			
vodní pára	tuhé zbytky – škvára (struska), popílek	spaliny	

Z hrubého rozboru surového uhlí, před spálením, si lze všimnout, že každé palivo má v sobě jistý obsah vody. Voda se skládá z vody volné (přimísená, prchavá, hrubá) a zbytkové (kapilárně vázaná zůstává nejdéle v palivu) Voda obsažená v palivu se pohybuje v rozmezí 1-60 %. Dále palivo obsahuje popelovinu, minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany jílové minerály, karbonáty, sulfidy, sulfáty, oxidy a halogenní minerály a další) obsažené v palivu před jeho spálením. Voda a popelovina tvoří dohromady přítěž (balast), kterou je důležité anulovat, protože brání hoření a taky má vliv na skladbu emisí. Hořlavina je naopak něco, bez čeho by hoření vůbec neproběhlo a dá se říct, že čím více hořlaviny tím větší potenciál hoření. Hořlavina se skládá z prchavé a tuhé části. Část prchavé hořlaviny se uvolňuje na začátku spalování cca. při 250°C, což napomáhá vzněcování a stabilizaci hoření. Prchavá hořlavina se skládá z CO, H₂, CH₄ a uhlovodíků. Čím je palivo mladší, tím má více prchavé hořlaviny a může se někdy i samovznítit. Hořlavina jako taková je část paliva, která je nositelem tepla uvolněného spalováním. Jedná se o tyto prvky: C, H, S. Popelovina a hořlavina tvoří tzv. sušinu, která neobsahuje žádnou vodu. Sušina je doslova neodpařitelný zbytek látky, který zbude po zahřívání a odpařování při maximální teplotě do 105 °C až do konstantní hmotnosti. [59], [60]

Když je palivo spáleno, jsou při hoření uvolňovány tyto látky: vodní pára (voda obsažená v palivu se ohřeje a pak se vypařuje=odebírání velké množství tepla), tuhé zbytky (popílek odcházející komínem, popel + struska + škvára, odcházející spodem přes rošt=obsahuje často nespálenou uhlíkovou složku a taky odchází ještě v horkém stavu=tepelná ztráta), spaliny (veškerá vzniklé plynné produkty procesu spalování, které neshořely ani nezreagovaly a odchází z komína ven, nejhorší z nich jsou NO_x, SO_x)

Nejčastěji je počítáno pouze s informací, jakou výhřevnost má které palivo. Když tedy dodavatel paliva zaručí, že dodá palivo o určité výhřevnosti, snadno si lze pak dopočítat kolik tepla se spotřebuje za celý rok a kolik daného paliva na toto pokrytí je potřeba. Výhřevnost však zásadně snižuje voda obsažená v palivu, viz křivka grafu níže. [60]

5.4 Detailní rozbor složek paliva

5.4.1 Hořlavina (h)

Hořlavina je část paliva, která je nositelem tepla uvolněného spalováním. Jedná se o tyto prvky: uhlík, vodík a síra. Obsah síry v palivu je nežádoucí, neboť zvyšuje obsah

SO₂ ve spalinách, výrazně zvyšuje rosný bod spalin a způsobuje snížení charakteristických teplot popele, jako jsou teplota měknutí, tání, tečení. Důležitou vlastností paliv je **prchavá hořlavina (V^{daf})**, což je množství plynné látky uvolněné z hořlaviny zahříváním za nepřístupu vzduchu při 300-800 stupni celsia. Obsah prchavé hořlaviny závisí na geologickém stáří (stupeň prouhelnatění paliva), geologicky starší palivo má menší prchavou hořlavinu, uhlí s velkou prchavou hořlavinou se snadno vzněcuje, ale obtížně vyhořívá. Prchavá hořlavina se uvolňuje při začátku spalování a v podstatě napomáhá vzněcování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. [60]

5.4.2 Popelovina (A^r)

Jedná se o minerální látky (křemičitany, uhličitany, sírany jílové minerály, karbonáty, sulfidy, sulfáty, oxidy a halogenní minerály a další) obsažené v tuhém palivu před jeho spálením. Spálením vzniká z popeloviny tuhý zbytek, kterému se říká popel. Pro provoz kotlů jsou velmi důležité charakteristické teploty popele, které určují chování popele při různých teplotách. Jedná se o teplotu měknutí (t_a), tavení (t_b) a tečení (t_c). Určování těchto teplot je dáno normou ČSN ISO 540. [60]

- t_a = **teplota**, která určuje minimální teplotu, kdy začne docházet k nalepování popele na výhřevné plochy a tím ke zhoršení prostupu tepla ze spalin do media. Teplota spalin na konci ohniště (t_{ko}) musí být menší než teplota t_a .
- t_b = **teplota**, při které dochází k tavení, to znamená přechod popele z pevného do kapalného skupenství. Tělísko se roztaví v polokulovitý tvar.
- t_c = **teplota**, u které po překročení, dojde k roztavení popele. Tělísko se roztéká a tvoří se struska. [60]

5.4.3 Voda (W^r)

Voda, jakožto nechtěná složka nemá v palivu jedinou dobrou roli a vše komplikuje, a to od transportu po spálení. Snižuje výhřevnost paliva a je zdrojem řady potíží při dopravě paliva (způsobuje nalepování uhlí na dopravních cestách, v zimě zamrzá a způsobuje potíže při vyskladňování vagónů) i při samotném spalování. Voda odchází se spalinami ve formě vodní páry a zvětšuje tak objem spalin. Při poklesu teploty spalin pod hranici rosného bodu urychluje korozi kotle ze strany spalin. Čím je palivo geologicky starší, tím méně vázané vody obsahuje. Snižuje spalovací teplotu, prodlužuje dobu zapalování paliva a celkově je nechtěná, a proto se paliva často uměle suší, anebo skladují, aby se z nich voda alespoň částečně odpařila. Voda je v palivu vázaná několika způsoby:

- **povrchová voda** – zachycená voda na povrchu paliva
- **přimísená voda** – voda, která se dostala do paliva při těžbě
- **hrubá voda** – voda obsažena v palivu, odstranitelná volným sušením
- **volná voda** – součet vody povrchové, přimísené a hrubé
- **kapilárně vázaná voda** – voda obsažena v kapilárách paliva, která zůstala po odstranění hrubé vody, zjistí se úbytkem hmotnosti po vysušení na 105 °C
- **odkludovaná voda** – chemicky vázaná na hořlavinu, nevysušitelná
- **hydrátová voda** – voda vázaná v popelovinách [60] [61]

5.5 Spalování paliva

Spalování je fyzikálně chemický děj s uvolňováním tepla, kdy dochází k oxidaci paliva až na jeho konečné produkty. Spalování je, jak už bylo zmíněno výše buď dokonalé anebo

nedokonalé při nedokonalém část energie v palivu a ve spalinách zůstává, tedy neshoří vše, jak má. V důsledku toho unikají nespálené plyny kouřovodem ven nebo je více TZL. K lepšímu spalování se tedy doporučuje tzv. systém 3T: Time, Turbulence, Temperature.

Proces spalování začíná samovznícením, či jiným dodáním tepla. Dále nastává řetězový děj, kdy část tepla slouží jako iniciátor pro zapálení další nové směsi, zbytek tepla je odváděn primárně ve spalinách. Hoření končí, buď vyčerpáním hořlavé směsi, nebo pokud je intenzivním odvodem tepla přerušena řetězová reakce spalování (oxidace).

Spalování se účastní palivo (hořlavá látka s dostatečnou výhřevností) a oksličovadlo (látka obsahující kyslík – nejčastěji vzduch, moderní kotle už mají 3 různé typy přiváděných kyslíků tzv. primární vzduch, sekundární vzduch a terciální vzduch, proto je i lépe regulován proces hoření). Výstupem jsou produkty, které vznikají jako výsledek chemické reakce mezi palivem a oksličovadlem (produktem spalení jsou tedy spaliny, tuhé zbytky a teplo). [60]

- **Plynné spaliny** – směs plynů H_2O (pára), N_2 , CO_2 , SO_2 , CO , Ar , popílek, který je unášen atd.
- **Tuhý zbytek** (struska, škvára, popel, popílek).
- **Teplo**

5.5.1 Výhřevnost paliva

Množství tepla uvolněného při spálení 1 kg paliva určuje výhřevnost a je jedním ze základních parametrů paliva obecně. Tento parametr je výrazně ovlivněný vlhkostí paliva, viz. kapitola Palivo a jeho rozbor. Výhřevnost je nejdůležitější energeticko-ekonomickou vlastností paliva. Výhřevnost ($kJ \cdot kg^{-1}$) je teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na 20 °C, přičemž voda ve spalinách zůstane v plynné fázi. [60]

5.5.2 Spalné teplo

Teplo uvolněné dokonalým spálením 1 kg paliva při ochlazení spalin na teplotu 20 °C a kondenzaci vodní páry ve spalinách.

5.6 Druhy tuhých paliv

Dominantním energetickým palivem v České republice je uhlí. Základní dělení uhlí je podle stupně prouhelnění rašelina lignit, hnědé uhlí, černé uhlí a antracit a uměle vyráběný koks. V podmínkách ČR se nejčastěji využívá hnědé a černé uhlí. Porovnání vlastností nejčastěji využívaných uhlí s dřevěnými pilinami je v tabulce.

Tabulka 10 Procentuální složení paliva + vybrané vlastnosti [60]

<i>Hrubý a prvkový rozbor různých druhů paliva</i>			
	<i>dřevěné piliny</i>	<i>hnědé uhlí</i>	<i>černé uhlí</i>
<i>Vlhkost [%]</i>	16,5	23,4	5,2
<i>prchavá hořlavina [%]</i>	78,6	40,8	40,2
<i>pevný uhlík [%]</i>	0	54	50,7
<i>Popelovina [%]</i>	5,2	5,2	9,1
<i>C^r [%]</i>	51,2	72	74
<i>H^r [%]</i>	6,3	5	5,1
<i>N^r [%]</i>	1,9	0,9	1,6
<i>S^r [%]</i>	0	0,4	2,3

A^r [%]	1,5	5,2	9,1
O^r [%]	33	16,4	7,9
spalné teplo [$MJ.kg^{-1}$]	9,9	21,4	29,2
teplota měknutí popele – t_a [°C]	1120	1149	1215

Z tabulky je možné si povšimnout v rámci porovnání uhlí a dřevěných pilin významného rozdílu prchavé hořlaviny, která napomáhá vznícování paliva v ohništi a stabilizuje spalovací proces. Naopak si lze ale povšimnout, že dřevěné piliny nemají v porovnání s uhlím, žádný pevný uhlík, který je významnou čistou složkou paliva. Výhodou však na druhé straně je že dřevo a biomasa vzniklá z dřevin neobsahuje žádnou síru, která je velmi agresivní, když kondenzuje ve spalinách na povrchu nejčastěji teplosměnných ploch. Vyšší obsah kyslíku v dřevěných pilinách zase říká, že bude ono dřevo, když bude mít nízkou vlhkost, lépe hořet, jenomže vlhkost je velmi proměnlivá věc a u dřeva se pohybuje teoreticky v rozmezí 0-60 %, Nejzásadnější je však spalné teplo, které jasně říká, že ze dřeva nedostaneme nikdy tolik energie přepočítané na 1 kilogram paliva, jako z uhlí, nicméně dřevo bude vždy levnější na nákup a dostupnost, a proto od něj lidstvo nejspíš neustoupí.

5.7 Kotle

Kotel jakožto spalovací zařízení, které dodává primárně teplo do domácností a sekundárně i ohřívá vodu, je téměř nezbytnou součástí skoro všech domů na vesnicích, a tak je jisté, že nevymizí a bude třeba jej zdokonalit, aby se snížilo množství spalin, a i jejich složení bylo více příznivé pro zdraví člověka. Hlavní rozdíl mezi kamny a kotlem je kapacita interního zásobníku paliva a výkon do prostoru. [62]

5.7.1 Podle použitého paliva se dělí kotle na paliva:

- *tuhá,*
- *kapalná,*
- *plynná,*
- *směsi paliv.*

5.7.2 Podle způsobu spalování tuhých paliv se dělí kotle:

- *kotle roštové (s klasickým roštem),*
- *kotle fluidní (s fluidním roštem),*
- *kotle práškové (granulační nebo výtavné).*

Tato práce se věnuje spíše krbovým kamnům, které se situačně i procesně podobají kotli na tuhá paliva s klasickým roštem. Je nezbytnou informací, že i při spalování v kamnech a kotlích tohoto typu dochází ke ztrátám, konkrétně: ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (ζ_{mn}), ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků (ζ_f), ztráta hořlavinou ve spalinách (ζ_{cn}), ztráta fyzickým teplem spalin (ζ_k) a ztráta sdílením tepla do okolí (ζ_{sv}). Popis těchto ztrát je však mimo zadání této práce V rámci spalování konkrétního dřeva (smrk) v kotli bude měřeno množství částic v odcházejících spalinách, konkrétně těch nejmenších, které jsou schopny přístroje v laboratořích na FSI VUT detekovat. [60]

6 Experimentální část

6.1 Metody měření částic

Dnešní svět nabízí spoustu způsobů, jak poletující částice v ovzduší detekovat, ale ne všechny přístroje a zařízení zachytí i ty nejjemnější, které se v ovzduší nachází. Ještě lepší, než měřit množství a typ částic v ovzduší, je měřit tyto částice přímo na zařízeních, které tyto částice produkují.

6.1.1 Jak se zákon vypořádává s měřením PM částic?

Měření emisí musí být reprezentativní a průkazné a použitá metoda měření a odběru vzorků musí co nejpřesněji odrážet skutečnost o úrovni znečišťování. Tyto požadavky se považují za splněné, je-li postupováno podle určených technických norem podle zákona o technických požadavcích na výrobky.

Jednorázové měření emisí se provádí manuálními metodami se samostatnými odběry jednotlivých na sebe navazujících vzorků nebo přístroji pro kontinuální měření emisí.

V rámci jednorázového měření emisí se za jednotlivé měření považuje odběr jednotlivého vzorku a jeho vyhodnocení. Pro jednorázové měření emisí lze použít pouze těch měřících metod, které umožní stanovit koncentrace znečišťujících látek alespoň v intervalu od 10 do 200 % specifického emisního limitu. Při jednorázovém měření manuálními metodami se provádí měření dle vyhlášky 415/2012 Sb. s.5 takto:

- a) *„nejméně 3 jednotlivá měření u stacionárních zdrojů s neměnnými provozními podmínkami*
- b) *nejméně 6 jednotlivých měření u stacionárních zdrojů s proměnlivými provozními podmínkami*
- c) *technickými podmínkami provozu a emisními koncentracemi znečišťujících látek určený počet jednotlivých na sebe navazujících měření u stacionárních zdrojů s periodickým, přerušovaným, šaržovitým způsobem výroby tak, aby měření postihlo celý časový interval cyklu nebo šarže; doba odběru jednotlivých na sebe navazujících měření se přizpůsobí očekávaným koncentracím v souladu s technickými postupy pro jednorázové měření a požadavky této vyhlášky, technickými normami pro jednorázové měření a podmínkami stanovenými v povolení provozu,*
- d) *jednotlivé měření po dobu nejméně 30 minut a nejvýše 8 hodin v případě těžkých kovů a nejméně 6 hodin a nejvýše 8 hodin v případě PCDD a PCDF*
- e) *odlišně od ustanovení v písmenech a) a b) pouze jedno jednotlivé měření PCDD, PCDF a těžkých kovů“ [63]*

U stacionárního zdroje vybaveného technologií ke snižování emisí tuhých znečišťujících látek s výstupní koncentrací nižší než 50 mg.m⁻³ za provozních stavových podmínek a s emisním limitem stanoveným pro tuhé znečišťující látky se provádí tři jednotlivá měření koncentrace tuhých znečišťujících látek. Doba odběru dílčích na sebe navazujících vzorků se přizpůsobí očekávaným koncentracím v souladu s požadavky této vyhlášky, technickými normami pro jednorázové měření a podmínkami stanovenými v povolení provozu, minimálně však v trvání nepřetržitě 30 minut pro každé dílčí měření.

Jednorázové měření emisí se u spalovacích stacionárních zdrojů o celkovém jmenovitém tepelném příkonu nižším než 50 MW provádí při stabilních provozních podmínkách a při reprezentativní a rovnoměrné zátěži, přičemž do výsledků jednorázového měření emisí se nezapočítávají hodnoty získané v době uvádění stacionárního zdroje do provozu a při jeho odstavování z provozu. [63]

Vyhodnocení úrovně znečištění pro plynné znečišťující látky se vztahuje na standardní podmínky, tedy objem odběru vzorků přepočtený na teplotu 293,15 K a normální tlak 101,325 kPa. U částic PM₁₀, PM_{2,5} a znečišťujících látek, které se analyzují v částicích PM₁₀, se objem odběru vzorků vztahuje k vnějším podmínkám v den měření. Při vyhodnocení úrovně znečištění se používá aritmetický průměr zjištěných hodnot. Jak se určí, kde a kolik bude měřících stanic s jakými specifikacemi je dle vyhlášky 415/2012 Sb určeno takto:

- Pro oxid dusičitý, oxid uhelnatý, částice PM₁₀ a PM_{2,5} se zahrnuje nejméně jedna lokalita pro měření požadové úrovně znečištění (jedná se spíše o globální jev, tak jako kyselý déšť způsobený průmyslovými emisemi z vysokých komínů. Strukturálního snižování emisí ve větším měřítku je dosahováno pomocí stanovení národních emisních stropů) a jedna lokalita orientovaná na měření vlivu dopravy, pokud se tím nezvýší počet lokalit. Měřicí lokality, kde byl v posledních třech letech překročen emisní limit pro částice PM₁₀, jsou zachovány, pokud není nutné tyto lokality ze zvláštních důvodů změnit.
- 2) Počet stacionárních měření částic PM_{2,5} a stacionárních měření částic PM₁₀ se nesmí lišit o více než dvojnásobek.
- 3) V aglomeracích a dalších městských oblastech s počtem obyvatel vyšším než 100 000 se zřídí alespoň jedna měřicí lokalita na milion obyvatel pro stacionární měření částic PM_{2,5}. [64]

6.1.2 Popis odběrového zařízení (sondy)

Vstupní otvor odběrové sondy se zpravidla umístí ve výšce mezi 1,5 m (dýchací zóna) a 4 m nad zemí, za určitých okolností může být zapotřebí vyšší poloha (až 8 m). Vyšší umístění může být rovněž vhodné, je-li stanice reprezentativní pro velkou oblast, a jakékoli odchylky jsou řádně zdokumentovány

Zajistí se, aby vstupní sonda byla umístěna v dostatečné vzdálenosti od stacionárních zdrojů, jako jsou vysoké pece a spalovny, tak aby jimi nebylo měření významně ovlivněno, a více než 10 m od nejbližší silnice, přičemž tato vzdálenost roste úměrně intenzitě dopravního provozu.

Tabulka 11 Měření částic [65]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Horní mez pro posuzování	Dolní mez pro posuzování
Částice PM ₁₀	24 hodin	28 µg.m ⁻³	20 µg.m ⁻³
Částice PM _{2,5}	24 hodin	17 µg.m ⁻³	12 µg.m ⁻³

V tabulce si lze všimnout, že se částice označované jako PM₁₀ a PM_{2,5}, v rámci zjišťování, kde má smysl a za jakých podmínek měřit, posuzují dle jistých horních a dolních mezí pro posuzování. Tyto specifikace a jakési rozhraní jsou více popsány ve vyhlášce 330/2012 Sb.

6.1.3 Manuální metody stanovení TZL

Měření emisí tuhých znečišťujících látek (TZL) patří mezi nejkomplicovanější metodiky analýzy odpadních plynů. Zachovává klasickou posloupnost operací.

- *rekognoskace (průzkum) vzorkovacího stanoviště*
- *odběr vzorku*
- *úprava vzorku před analýzou*
- *analýza vzorku.*

Prvním krokem analýzy je shromáždění reprezentativního vzorku tuhých částic (často se separuje pevná složka aerosolu od kapalné). Druhým krokem je stanovení celkové hmotnosti. Dále je možné i stanovení jednotlivých analytů (látky, prvky, iony) ve shromážděné hmotě částic, a případně určení distribuce velikostí částic, jejich morfologie, původu apod.

Základní metodou stanovení TZL je gravimetrická metoda. Vzorkování tuhých částic patří mezi složitější analýzy ovzduší. Je to dáno vlivy jako jsou:

- *charakter proudění v uzavřeném profilu a ve volném ovzduší*
- *charakter tuhých částic*
- *vliv gravitace a dalších faktorů spojených s velkou hmotností částic.*

Chování tuhých částic aerosolu závisí na charakteru silového pole, v němž se nacházejí. Jednodušší případ je, když je toto pole shodné s gravitačním polem. Při proudění aerosolu uzavřeným profilem má na výslednici sil působících na částici vliv větší počet faktorů a tomu musí být přizpůsobena i technika vzorkování. Tuto techniku ovlivňuje rozhodující měrou fenomén tzv. izokinetický odběr vzorku aerosolů, kdy rychlost částic v ústí odběrové sondy je shodná (s odchylkou $\pm 10\%$) s rychlostí proudících částic v okolí ústí. Pro stanovení obsahu TZL v uzavřených profilech se používá některé z dvou mezinárodně přijatých gravimetrických metod. [66]

První metoda

Metoda může být použita k určení hmotnostních koncentrací v rozsahu **od 5 mg/m³ do 10 g/m³**. Pro hmotnostní koncentrace menší než 50 mg/m³ je nejistota této metody větší než $\pm 10\%$ (ČSN ISO 9096). Pro spalovací procesy je celkový odhad nejistoty asi $\pm 20\%$. Obecně vzato je správnost metody tím vyšší, čím větší je počet vzorkovacích (měřicích) bodů. Pokud však jejich počet převyšuje 16, nedochází již ke zvýšení správnosti. V tomto případě lze správnost zvýšit zvětšením počtu vzorkovacích (měřicích) přímek (tři místo dvou) v potrubí kruhovém průřezu. Ke snížení hodnoty nejistoty přispívá i delší doba vzorkování. [66]

Druhá metoda

Metoda je určena pro stanovení nízkých hodnot hmotnostní koncentrace prachu v plynech proudících potrubím při hmotnostních koncentracích **menších než 50 mg/m³** po přepočtu na normální stavové podmínky.

Obě varianty představují především referenční metodu pro stanovení pevných částic emitovaných stacionárními zdroji. Používá se rovněž pro ověření automatizovaných systémů monitoringu TZL. Není vhodná pro účely měření ventilačních nebo klimatizačních systémů, vnitřního ovzduší nebo plynů nesoucích kapičky. [66]

V průběhu izokinetického vzorkování se měří rychlost plynu (aerosolu) ve vzorkovacím (měřicím) bodě v potrubí a na základě takto získané hodnoty se vypočítává a upravuje příslušný průtok vzorku. Pro měření rychlosti plynu v potrubí se zpravidla používá tzv. Prandtlova trubice. Vzorkování se provádí dvěma možnými způsoby, kumulativním a přírůstkovým vzorkováním. Měření rychlosti proudění plynu a odběr vzorků je dobré provádět současně, jinak se musí opakovat měření a dostat se do podmínek odlišných o max. 10 %. [66]

Metody měření TZL

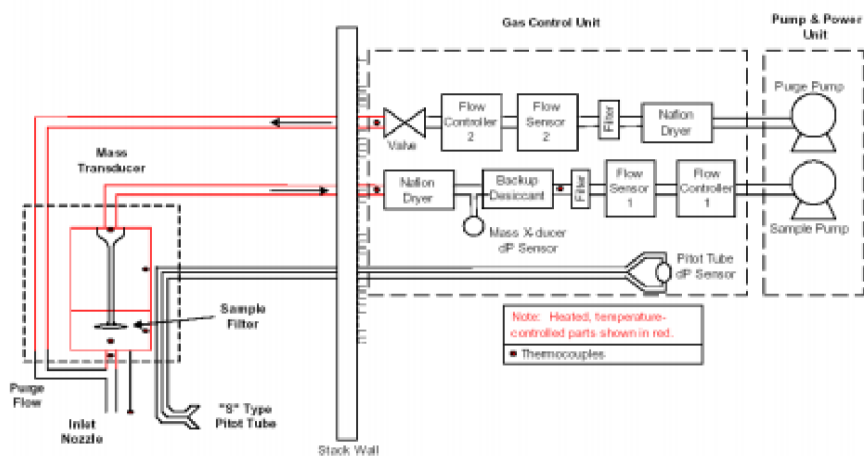
6.1.4 Metody měření TZL zavedených US EPA

US EPA (United States Environmental Protection Agency) zavedla pro stanovení prachu pomocí vzorkování v odpadních plynech ze stacionárních zdrojů metody:

- *Method 5 – Determination of particulate matter emissions from stationary sources (Code of Federal Regulations US EPA 1999)*
- *Method 5I – Determination of low level particulate matter emissions from stationary sources (Code of Federal Regulations US EPA 1999).* [66]

6.1.5 Metoda TEOM

Často označována jako velmi perspektivní metoda pro stanovení TZL v odpadních plynech. Tato metoda využívá frekvenčního snímače hmotnosti depozitu (zachycené částice) s kmitajícím kuželíkem a je založena na principu měření změny frekvence kmitání dutého kuželíku osazeného miniaturním filtrem za podmínek konstantního průtoku vzorku, teploty vzorku a dodržení mezní tlakové ztráty na filtru, která závisí na hmotnosti depozitu na filtru. Charakteristiky metody, např. mez detekce $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ při 24 -hodinovém odběru vzorku nebo $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, při 30minutovém odběru vzorku.



Obrázek 18 Měřicí systém TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance).

Jak již bylo uvedeno, pro hodnocení kvality volného ovzduší (tj. venkovního, vnitřního a pracovního ovzduší) se používá mj. i údajů o hmotnostní koncentraci thorakální frakce aerosolových částic (PM₁₀). Pro stanovení thorakální frakce aerosolových částic (PM₁₀) (hmotnostní frakce vdechovaných částic pronikajících za hrtan). [66]

Měření TZL zavedených US EPA pro venkovní ovzduší.

6.1.6 Method IO-2.1

Metoda Method IO-2.1 (Sampling of ambient air for total suspended particulate matter). je určena pro stanovení celkového obsahu aerosolových částic (SPM) a thorakální frakce těchto částic (PM10) ve venkovním ovzduší za použití vysokoprůtokového (Hi-Vol) vzorkovacího zařízení s typickým průtokem vzorku $(1,13 \div 1,70)$ m³ /min a plochých filtrů z křemenných nebo skleněných vláken. Provedení odběru vzorků závisí na cílech měření. Pro záchyt thorakální frakce se používá vstupních hlavic. [66]

6.1.7 Method IO-2.2

Metoda Method IO-2.2 (Sampling of ambient air for PM10 using an Andersen dichotomous sampler) je určena pro stanovení thorakální frakce těchto částic (PM10) ve venkovním ovzduší za použití membránových PTFE filtrů. Pro separaci thorakální frakce se používá dichotomních vstupních hlavic. [66]

6.1.8 Method IO-2.3

Metoda Method IO-2.3 (Sampling of ambient air for PM10 concentration using the Rupprecht and Patashnick (R&P)) je určena pro stanovení thorakální frakce těchto částic (PM10) nebo respirabilní frakce PM_{2,5} ve venkovním ovzduší za použití membránových PTFE filtrů nebo skleněných filtrů s vrstvou PTFE pomocí nízkoprůtokových vzorkovacích systémů (průtok asi 16,7 l/min). Pro stanovení různých složek prachu v ovzduší se používá různých metod s danou specifikací, proto si lze některé zde pro představu zmínit. [66]

- Pro stanovení celkového obsahu aerosolových částic v pracovním ovzduší v rozsahu 0,1 mg až 2 mg na vzorek se používá metody založené na záchytu částic na membránových filtrech (např. PVC) průtokem do 2 l/min (NIOSH method 0500 1994).
- Pro stanovení respirabilní frakce aerosolových částic v pracovním ovzduší v rozsahu 0,1 mg až 2 mg na vzorek se používá metody založené na záchytu částic na membránových filtrech (např. PVC) (NIOSH method 0600 1994).
- Pro on-line stanovení TZL v odpadních plynech se používá řady metod založených na různých principech (turbidimetrie, absorpce elektromagnetického záření v různých oblastech spektra aj.).
- Pro on-line stanovení thorakální frakce aerosolových částic (PM10) ve venkovním ovzduší je určen soubor metod zavedených US EPA, alespoň některé z nich budou popsány trochu více v následující kapitole. [66]

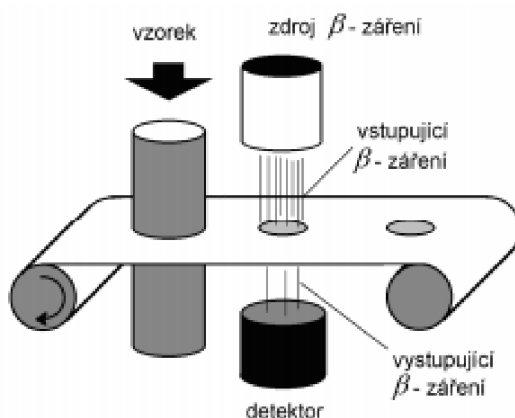
Metody US EPA-stanovení thorakální frakce pro PM10

6.1.9 Method IO-1.1

Metoda Method IO-1.1 (Determination of PM10 in ambient air using the Andersen continuous beta attenuation monitor) je určena pro stanovení thorakální frakce aerosolových částic (PM10) ve venkovním ovzduší za použití nízkoprůtokového vzorkovacího zařízení s typickým průtokem vzorku 16,7 l/min a pásky vyrobené ze skleněných vláken. Provedení odběru vzorků závisí na cílech měření. Pro záchyt thorakální frakce se používá vstupních hlavic znázorněných na obrázku. [66]

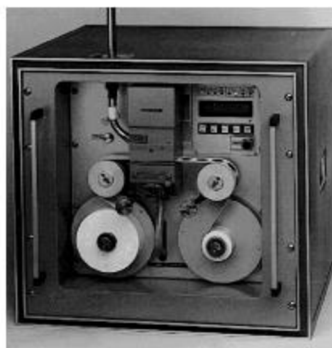


Obrázek 19 Příklady konstrukce vstupních hlavic vzorkovacích zařízení PM10 [66]



Obrázek 20 Princip analyzátoru využívajícího absorpce β -záření [66]

Tato radiometrická metoda stanovení je založena na měření změn intenzity záření částic ^{210}Po (tj. β -záření), procházejících vrstvou částic zachycených na vhodně upravených filtrech. Proud aerosolu se přivádí do detektoru, kde je prosáván páskovým filtrem vyrobeným ze skelné tkaniny. Filtr se pohybuje v určených sekvencích tak, aby se na filtru nahromadilo dostatečné množství částic. Pohyb pásku je řízen procesorem tak, aby záření vyzařované zářičem procházelo postupně exponovanou a neexponovanou částí filtru. Tímto způsobem je eliminován vliv pozadí. Absorbance β -záření depozitem se měří zpravidla měří Geiger Müllerovým počítačem. Fotografie systému je uvedena na obrázku níže. [66]

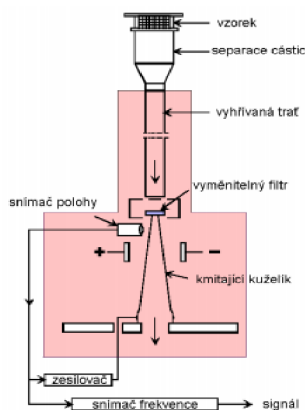


Kontinuální analyzátor na principu absorpce β -záření (Compendium of methods for Organic Compounds US EPA 1999)

Obrázek 21 Geiger Müllerův počítač [66]

6.1.10 Method IO-1.2

Metoda Method IO-1.2 (Determination of PM10 in ambient air using the Thermo Environmental Instruments) je určena pro stanovení thorakální frakce aerosolových částic (PM10) ve venkovním ovzduší za použití nízkoprůtokového vzorkovacího zařízení typickým průtokem vzorku 18,9 l/min a pásky vyrobené ze skleněných vláken. Provedení odběru vzorků závisí na cílech měření. Pro záchyt thorakální frakce se používá vstupních hlavic stejných jako u předchozí metody. [66]

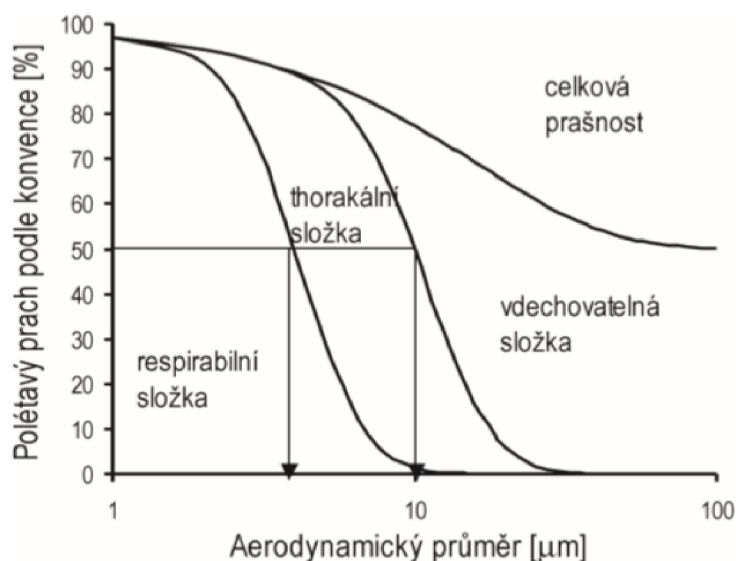


Kontinuální analyzátor TEOM (Compendium of methods for the determination of inorganic compounds in ambient air US EPA 1999)

Obrázek 22 Vstupní hlavice pro záchyt thorakální frakce [66]

6.1.11 Method IO-1.1

Metoda Method IO-1.1 (Determination of PM10 in ambient air using a continuous Rupprecht and Patashnick (R&P) TEOM® particle monitor) je určena pro stanovení thorakální frakce aerosolových částic (PM10) ve venkovním ovzduší v rozsahu od 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ až několika g/m^3 . Provedení odběru vzorků závisí na cílech měření. Pro stanovení thorakální frakce se používá systému znázorněného na následujícím obrázku. [66]



Obrázek 23 Frakce prachu v pracovním prostředí k posouzení míry prašnosti.[67]

Z obrázku je možné vyčíst, jak se mění procentuální zastoupení složek prachu v závislosti na aerodynamickém průměru a je velmi pozoruhodné sledovat, jak se až skokově změni procentuální rozložení složek při přechodu z $1\mu\text{m}$ na $10\mu\text{m}$. Na tomto grafu je vyznačeno, že 50 % polévatého prachu o průměru $4\mu\text{m}$ je v respirabilní frakci. Co znamenají jednotlivé složky?

- **Vdechovatelná frakce** = hmotnostní frakce polévatého prachu, která je vdechnuta nosem a ústy.
- **Thorakální frakce** = hmotnostní frakce vdechovaných částic pronikajících za hrtan.
- **Respirabilní frakce** = hmotnostní frakce vdechovaných částic, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasinkový epitel. [67]

Když už je tedy známo, jakými metodami se odebírá vzorek hlavně dle Amerických metod US EPA, zejména z pohledu, dnes už historického. Dále se zaměřím na monitorování částic, možné chyby, ke kterými při měření častokrát dochází a následně na identifikaci částic.

6.1.12 Obecné požadavky na kvalitu monitorování

Pro zajištění platných výsledků, musí měřicí zařízení podle Ing. Petra Brauna být:

- „ve specifikovaných intervalech nebo před nasazením kalibrováno nebo ověřováno podle etalonů navázaných na mezinárodní nebo národní etalony.
- justováno nebo podle potřeby opakovaně justováno.
- identifikováno tak, aby bylo možné určit stav kalibrace.
- zabezpečeno před takovými seřizenými, která by zrušila platnost výsledku měření,
- chráněno před poškozením a znehodnocením v průběhu manipulace, údržby a skladování.
- Kromě toho musí organizace posoudit a zaznamenat platnost předchozích výsledků měření, když se zjistí, že zařízení neodpovídá požadavkům. Musí se udržovat záznamy o výsledcích kalibrace a ověřování.
- Pokud se při monitorování používá počítačový software, musí být potvrzena jeho schopnost plnit zamýšlenou funkci. Toto potvrzení musí být provedeno před prvním použitím a podle potřeby se musí opakovat.“ [68]

6.2 Nejčastější chyby při měření

Při měření výše zmíněnými způsoby jsou chyby a problémy kontinuálního měření různého původu a charakteru, proto je lze rozdělit do několika skupin:

Chyby spojené s neplněním požadavků QAL1

- problémy prostorového uspořádání (délky úseků TZL)
- problémy umístění (vibrace, atm. podmínky, vlhkost, prach, koroze, sonda mimo měřený profil)
- nízká kvalita nebo nedostatečná kondiciace vzorku
- problémy s požadovanou nejistotou měření (nízké koncentrace TZL)
- chyby vzájemnou interferencí nebo reakcí (neznalost matrice)

Chyby spojené s neplněním požadavků QAL2

- nemožnost nebo neprovádění kalibrace AMS (nedostupnost nebo překážky v odběru, účinnost konvertoru)

- *Chyby linearity, nekompensované drifty*

Chyby spojené s neplněním požadavků QAL3

- *Špatná nebo žádná údržba*
- *Nedodržování justačních intervalů*
- *Používání kalibračních plynů po expiraci*

Chyby vyvolané změnami v měřené technologii

- *Změna velikosti, tvaru a barvy TZL*
- *Vzájemné reakce složek emisí*

Chyby v použitém materiálu

- *Vysoká teplota (trubice sondy, filtry)*
- *Odolnost proti korozi*

Chyby nastavení zpracování signálu

- *Chyby nastavení analyzátoru*
- *Chyby v software-přepočtu, jednotky*

Poruchy vybavení

- *Teploty a kondenzace [68]*

6.3 Metody identifikace částic PM

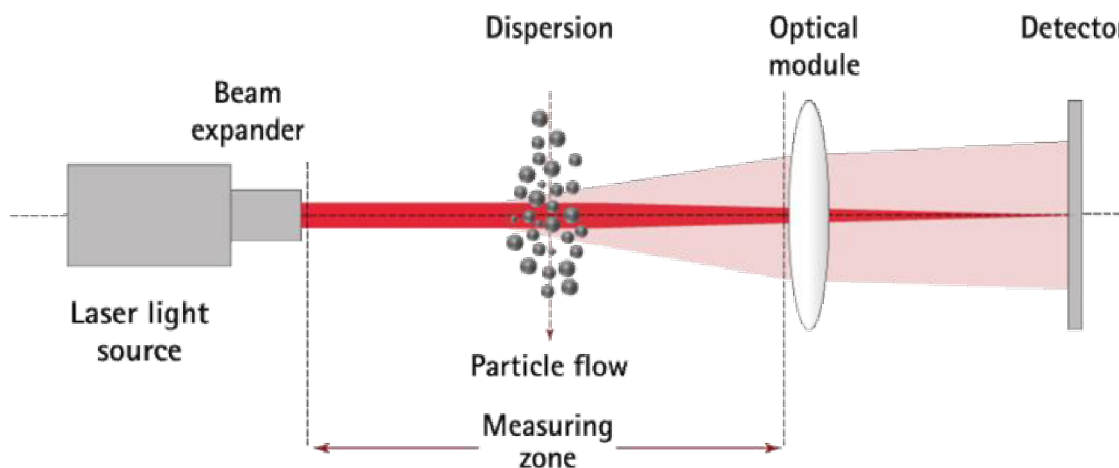
V předchozích kapitolách bylo zmíněno, jak a kde vznikají částice, limitní množství, velikost částic, rozdělení částic a jejich vliv na naše zdraví. Z hlediska vlivů na zdraví člověka, nebo v souvislosti s legislativou, či v souvislosti se samotným dělením částic by bylo dobré doplnit jisté informace: je nainstalováno 120 měřících stanic v České republice a nejnovější informace zveřejněné 10.1.2020 z Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), kde je přímo zaznamenáno, ukazují, že na 10 stanicích za rok 2019 byl překročen denní imisní limit pro PM₁₀ a roční imisní limit PM_{2,5} na dvou stanicích. Díky těmto čím dál kvalitnějším měření se dá také zavčas vyhlásit smogová situace za rok 2019 stalo tak pětkrát v zimě a šestkrát v létě. Dvakrát se vyhlásila i regulace =nejvyšší stupeň smogové situace. Nejvíce PM částic je dle statistik v ostravském regionu. Tato kapitola se však dále bude věnovat více způsobům, jak identifikovat částice od hrubých až po ty nejjemnější. [69]

Historie měření, ať už rozměrů, hmotnosti anebo počtu částic je dlouhá a stále více se vyvíjí s pokračující dobou, jak stoupají požadavky na přesnost měření. Jak bylo zmíněno výše, u PM mluvíme o částicích menších než „x“ mikrometrů. Je tedy jasné, že použití starších a technologických zaostalých zařízení na změření velikosti těchto částic by bylo k ničemu. Některé z metod, používaných pro měření velikosti částic, budou uvedeny níže.

Obecně se neměří velikost právě jedné částice, ale spíše distribuční závislost těchto velikostí, která se pak pomocí počítačových programů vyhodnocuje a zobrazuje jako distribuční graf, či distribuční křivka velikostí částic atd., k tomu však je nutné nejprve částice identifikovat, a to lze mnoha způsoby.[70]

6.3.1 Laserová difrakce

Tato metoda má široké uplatnění a v mnoha odvětvích průmyslu se jedná o základní metodu měření velikosti částic a s tím spojenou kontrolou jejich produkce. Lze s ní měřit velikost částic ve velkém rozsahu, udává se interval $0,2\mu\text{m}$ -2 mm a tato metoda může být použita jak pro měření částic ve formě suchého prášku, tak ve formě aerosolů či emulzí. [71]



Obrázek 24 Schéma laserové difrakce [72]

Obrázek ukazuje princip laserové difrakce. Dispergovaným proudem částic, který obsahuje částice o různé velikosti, prochází laserový paprsek. Tato metoda je založena na schopnosti částic ohýbat (rozptylovat) světlo podle jejich velikosti. Větší částice ohýbají světlo pod menším úhlem vzhledem k laserovému paprsku, menší částice naopak světlo ohýbají pod větším úhlem. Tuto skutečnost pak zachycuje detektor. Údaje o rozptylu světla z detektoru se pak analyzují a pomocí těchto dat se dále určuje velikost částic podle Mieho teorie o rozptylu světla, respektive distribuční graf velikosti částic. [71]

6.3.2 Gravitační sedimentace

Princip této metody spočívá v schopnosti usazování částic v kapalném médiu vlivem gravitačních sil. Rychlost sedimentace se určuje měřením rentgenového přenosu v kapalném médiu, a to ve specifických intervalech tak, aby měření bylo, co možno nejpřesnější. Použitím Stokesova zákona o odporu prostředí pak lze na základě této rychlosti usazování určit hmotnost částic.

Existují však komplikace, které tato metoda přináší. Pro určení velikosti částic musí být známa hustota částic, která se ovšem liší podle původu částic. Metoda také předpokládá, že částice jsou dokonale kulaté, což samozřejmě v praxi není pravda. Samotné měření pak není vhodné pro částice o velké hustotě, které se usadí velmi rychle, nebo naopak částice o velmi malé hustotě, které se v kapalném médiu neusadí vůbec. [70]

6.3.3 Obrazová analýza

Metoda spočívající ve vytvoření velmi kvalitních snímků vzorku částic, především pomocí elektronových mikroskopů, ať už transmisního elektronového mikroskopu (TEM), či

rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM), které mají velmi vysokou rozlišovací schopnost. Takto lze velmi přesně částice nejen měřit, ale také určovat jejich tvar.[70]

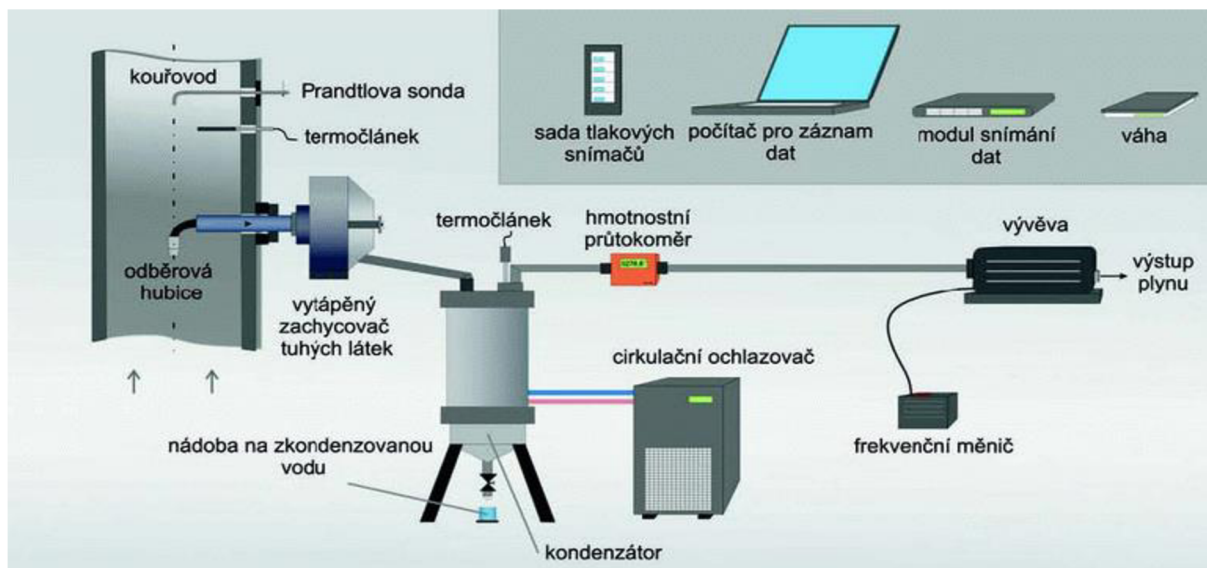
6.3.4 Akustická spektroskopie

Tato metoda, podobně jako je tomu u laserové difrakce, využívá k měření velikosti částic světlo, k tomuto měření lze ale použít také i zvuk. Princip metody spočívá ve vysílání ultrazvukových vln ve vzorku částic, které se nachází v kapalném médiu. Podobně jako je tomu u světla, i u zvuku jsou částice schopny různým způsobem rozptylovat zvukové vlny. Data jsou následně vyhodnocována a podobně jako je tomu u metody laserové difrakce, získává se distribuční graf velikosti částic. Měření koncentrací Imisních limit je udáváno v mikrogramech na metr krychlový nebo pomocí počtu částic v určitém objemu, zpravidla centimetru krychlovém. A v neposlední řadě lze měřit koncentraci pomocí plochy povrchu.

Přístroje, které měří koncentraci částic PM v ovzduší, jsou zpravidla vybaveny také nástroji, které jsou schopny měřit velikost částic. Existují také indikátory, které jsou schopny uživatele pouze informovat o tom, zda jsou v ovzduší částice PM, nicméně nic neříkají o jejich velikosti. To představuje problém, protože pro zjištění, zda dochází k překročení imisních limitů, potřebuje uživatel vědět, jak velké částice měří, aby by schopen údaje o jejich koncentraci porovnat právě s imisními limity. Další metody zaměřené více na koncentraci částic jsou uvedeny v podkapitole níže.[70]

6.3.5 Gravimetrická metoda

Jedná se o základní metodu, kterou se dá měřit hmotnostní koncentrace částic v ovzduší, nebo také ve spalínách, které vznikají při spalování paliv v kotlích.



Obrázek 25 Schéma gravimetrické metody [73]

Princip gravimetrické metody

Odběrová trubice nasává vzduch, který obsahuje částice PM a tento vzorek prochází přes vytápěný zachycovač tuhých látek, jak je zobrazeno na obrázku výše. Zde se nachází filtr (často ze skleněných vláken), který zachytí částice PM. Vzorek vzduchu dále pokračuje přes kondenzátor, zde zkondenzuje voda, která je ve vzorku odebíraného vzduchu. Za

kondenzátorem je se nachází hmotnostní průtokoměr, který určuje množství odebraného vzduchu, a vývěva, kterou pak vzduch proudí zpět do okolního prostředí. Koncentrace částic PM je pak dána hmotností částic, které se zachytí na filtračním materiálu ve vytápěném zachycovači tuhých látek. [73]

6.3.6 Optické prachoměry

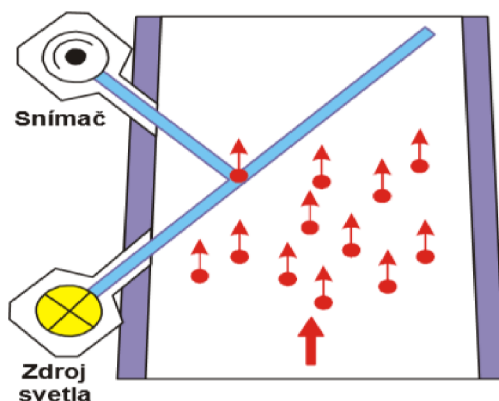
Obecně se jedná se o přístroje spadající pod optické metody, které využívají určité schopnosti částic, především však schopnost ohýbat či rozptylovat světelné záření. Optické prachoměry slouží k měření hmotnostních koncentrací v intervalu od 0,1 mg/m³ do 1000 mg/m³, což jsou velmi vysoké hodnoty, které se v běžném ovzduší příliš nevyskytují, proto není příliš použitelná. Tyto přístroje se spíše využívají pro koncentraci dýmových plynů, pro určování viditelnosti v tunelech navržených pro cestování a taky např. pro monitorování úniku TZL z výrobních procesů.



Obrázek 26 Optický prachoměr OPI [74]

Princip optických prachoměů

Princip této metody spočívá v tom, že vysílač vysílá paprsky světla ze zdroje, kterým může být LED dioda, laser anebo jakýkoliv jiný zdroj světla s širokým spektrem vlnových délek. Tento paprsek je vlivem prachových částic v ovzduší špatně odražen a zachycen vysoce citlivým snímačem. Porovnáním množství vycházejícího světelného záření a zachyceného světelného záření je určena koncentrace částic v ovzduší. [74]



Obrázek 27 Schéma podstaty optických prachoměů [74]

6.3.7 Fidas-Monitor jemných částic.

Imisní monitor jemných částic značky Fidas®, spadající pod optické metody je jeden z modernějších způsobů a umožňuje kontinuální měření a současné určení hmotnostní koncentrace frakcí PM₁, PM_{2,5}, PM₄, PM₁₀, a také velikostní distribuci částic.

Analyzátor sestává z odběrné hlavy Sigma-2, která umožňuje reprezentativní odběr vzorku také při silném větru a z inteligentní kompenzace vlhkosti (IADS), která zabraňuje znehodnocení měření kondenzačními efekty (IADS vypaří těkavé složky v odebraném vzorku vzduchu).

Co se týče aerosolového senzoru, jedná se o optický aerosolový spektrometr, který pomocí optického rozptylu rozpozná velikosti jemných částic. Částice se pohybují skrze opticky vymezený měřený objem, který je rovnoměrně nasvícen bílým světlem.

Když se částice nasvítí, vydává optický impuls, který se pak pod úhlem 85° až 95° detekuje. Množství jednotlivých částic se měří dle počtu optických impulsů na objemový tok. Síla těchto optických impulsů je také měřítkem průměru částic. Fidas má výrazně lepší optiku, vyšší světelnou hustotu díky LED diodě, emitující bílé světlo a výrazně lepší elektroniku pro vyhodnocování světelných impulsů, a proto dokáže detekovat i částice do 180nm. Zařízení má také vyšší citlivost analyzátoru v porovnání s obdobnými optickými spektrometry. Čím je vyšší přesnost klasifikace částic a rozlišovací schopnost měřícího zařízení, tím přesnější může být určení velikostní distribuce částic. [75]

6.3.8 Elektroodlučovače (EO)

Metoda, kterou je popsána v kapitole Separace nečistot. U této metody je nutné použít hmotnostní průtokoměr, který se umístí za elektroodlučovač. Po určení hmotnosti částic, které se zachytí na sběracích deskách, se při známém objemu vzduchu, který během měření prošel EO, získá hmotnostní koncentraci částic PM v ovzduší. [70]

6.3.9 Metoda SMPS (z angl. Scanning Mobility Particle Sizer)

Tato metoda se řadí mezi nejnovější a nejpokročilejší metody měření a identifikace částic. Jedná se o systematicky propojené více zařízení, které dohromady dokážou velice dobře detekovat částice na škále od 2nm do 1000nm a následně tyto částice zpracují jejich parametry: velikost, objem, povrch, počet atd.

Princip

Částice jsou nejprve odebírány v komínu, kde proudí ve formě polydisperzního aerosolu (spaliny), spaliny se dále zachovávají na konkrétní teplotě díky nahřívání hadic, kterými putují dále. Následně po zředění a jiných úpravách se na impaktoru odloučí částice větší, než 10 μm. Odloučení probíhá tak, že částice letí a najednou se před nimi objeví pravouhlá zatáčka, a protože částice 10 μm a větší mají větší setrvačnost a nedokážou tedy zahrnout, aniž by narazily, tak narazí a tím se odloučí. Poté tento polydisperzní aerosol (bez částic větších 10μm) prochází bipolární nabíječkou. Částice mají buď kladný, záporný anebo neutrální náboj. V neutralizátoru se nejprve neutralizuje náboj částic a následně se částice nabijí na jednu polaritu. Dalším krokem je vstup částic do DMA, kde se částice oddělí dle elektrické mobility. Požadovanou velikost monodisperzních částic, které vychází z DMA, je možné zvolit pomocí nastavení velikosti napětí na elektrodách. Následně jsou částice v klasifikátoru pomocí butanolového roztoku (nasyčené páry butanolu, které na částicích kondenzují) zvětšeny a tím se tak dají detekovat, protože příliš malé částice nejde opticky detekovat. Detekují se optickou laserovou metodou. Klasifikátor má 2 režimy:

- **podtlakový** (průtok polydisperzních částic je nastaven předem pomocí CPC)
- **přetlakový** (průtok určuje polydisperzní aerosol vstupující do klasifikátora). [80]

Sestava SMPS

- **Impaktor** = zařízení pro odloučení částic větších než PM_{10}
- **Neutralizátor** = zařízení pro přerozdělení elektrického náboje částic
- **DMA** (Differential Mobility Analyzer) = zařízení sloužící pro klasifikaci částic podle elektrické mobility, skládá se z 2 elektrod válcovitého tvaru. jsou 2 typy tohoto zařízení **Long DMA** (pro částice 10nm -1000nm) a **Nano DMA** (pro částice 2nm - 150nm)
- **CPC** (Condensation Particle Counter) = Kondenzační počítadlo, které detekuje počet monodisperzních částic. [80]

6.4 Popis spalovacího zařízení

6.4.1 Popis kamen

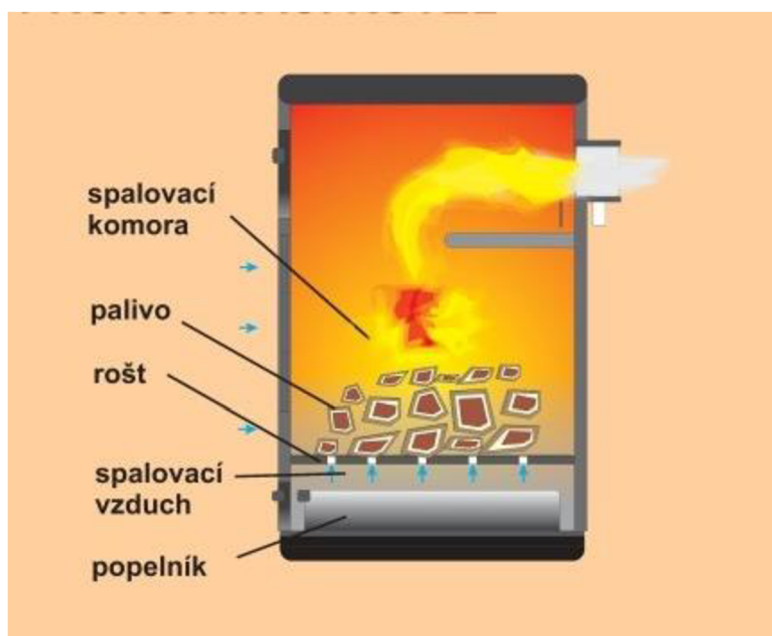
Krbová kamna, značky Grönland, model 4673-6, která jsou na energetickém ústavu VUT Brno, mají černý korpus a jsou opláštěná pískovcem včetně horní desky. Kamna jsou bez zásobníku paliva a s ručním přikládáním na spalování dřeva či dřevouhelných briket a disponují tepelným výkonem **3-8 kW s účinností 82,7 %**. Kamna mají prohořívající systém a ten zaručuje velice dobré spalovací podmínky. Přívod vzduchu je zajištěn primárně spárami v roštu. Sekundární vzduch se pak přivádí otvory v horní a dolní části skla a ofukuje sklo zevnitř. Terciální vzduch je přiveden zadní částí spalovací komory, přesněji dírami v zádech kotle a zadní vyzdívce. Palivo se do kamen přikládá, po otevření prosklených dvířek, ručně na dohořívající vrstvu, což ubírá na komfortu. Kamna se dají použít pro vytápění domácích prostor, dílen, či jiných účelových prostor do maximálního objemu prostoru **160 m³**. Rozměry kamen jsou: **výška 1025 mm, šířka 503 mm a hloubka 430 mm**. Kamna mají **centrální přívod vzduchu o průměru 100 mm**, který zajišťuje lepší a účinnější spalování. Přiváděný vzduch je dále rozdělen na primární, sekundární a terciální, který jako jediný nelze ovládat. Kouřovod ke kamnům se napojuje shora. Výrobce uvádí, že **spotřeba paliva je 1,6-2 kg/hod** a spaliny odcházející do **kouřovodu** (průměr 150 mm a umístění v horní desce) budou mít 205-223 stupňů celsia. Minimální tah komína je 12 Pa. Tyto krbová kamna váží okolo **158 kg** a cena kamen se pohybuje kolem **+/- 20 000 Kč**. Kamna splňují limity norem ČSN EN 13240:2002/A2:2005 [76] [77]



Obrázek 28 Krbová kamna Grönland 4673-6 [77]

6.4.2 Regulace a proces spalování kamen

Částečná regulace výkonu probíhá ovládním klapky přívodu primárního spalovacího vzduchu a sekundárního spalovacího vzduchu a této regulaci přispívá komínový tah, který také výrazně ovlivňuje spalovací proces. Jedná se o nejstarší a také nejjednodušší konstrukci kotle či kamen, což je doprovázeno nižší účinností transformace chemické energie paliva na tepelnou energii. V tomto případě mají kamna účinnost až 82,7 %, což dokazuje, jak kamna technologicky postoupila vpřed. Průběh spalování je u těchto kamen periodický, a proto nám kolísá i výkon. Pro plynulejší chod kotle je vhodné přikládat menší dávky paliva v pravidelných, krátkých intervalech (např. 30 min), což je nekomfortní. K ohřevu vzduchu v místnosti je dosaženo převážně konvekčním teplem, částečně i teplem sálavým. Řez prohořivacím kotlem je znázorněn níže na obrázku. Zde však ještě chybí sekundární a terciální přívod vzduchu, odvod spalin je v našem případě horní deskou, a ne v zadní části, jak je vidět na obrázku, avšak princip to splňuje.[78], [79]



Obrázek 29 Schéma prohořivacího kotle [78]

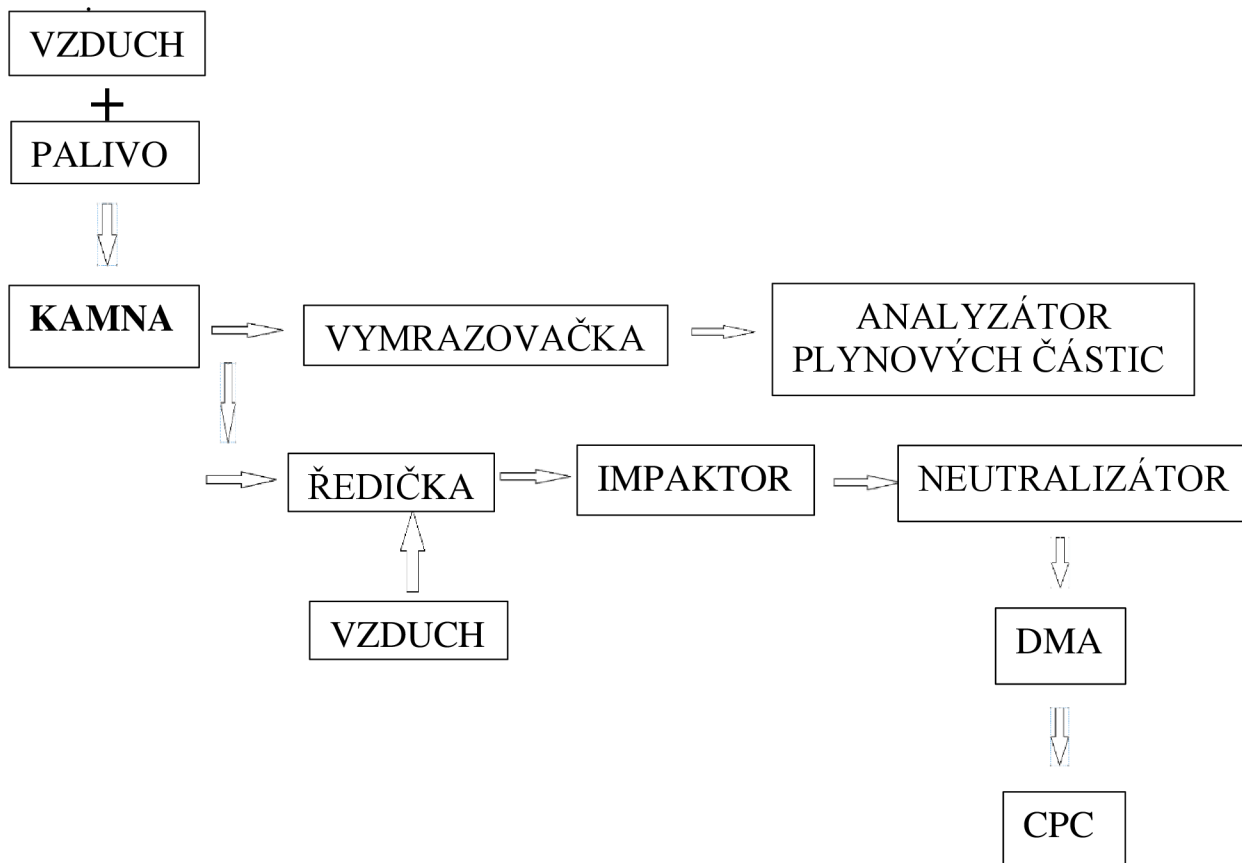
6.4.3 Porovnání s automatickým kotlem

Nevýhodou u těchto kamen či kotlů je jejich minimální komfort z hlediska uživatele, který musí přikládat v určitých časových intervalech na rozdíl od automatických kotlů, kde se palivo vsype do násypky. Dále je u automatických kotlů palivo dopravováno dopravníkem v určitých intervalech. A je i automaticky dávkováno do komory dle nastavení výkonu.

Nespalitelné zbytky paliva částečně zůstávají na roštu a částečně propadávají roštem do tzv. popelníku. Popelník se musí opět vysypávat ručně v určitých časových intervalech, když je plný. Automatický kotel má často i automatické vysypávání do větších nádob, které se po delším čase už vynášejí ale ručně. Nastavení automatických kotlů je s dobou čím dál dokonalejší a některé kotle mají i aplikaci v mobilu, či dálkový ovladač. Otázkou je pak poruchovost a životnost technologií. Jednou z výhod je prostor, který kamna zaujímají, protože spousta komponent a doplňků počínaje zásobníkem odpadají. Další výhodou by se našla třeba v možnosti sledovat oheň přes sklo těchto kamen, což dodává mnoha lidem pocit klidu a pohody. [78]

6.5 Použitá měřicí metoda

K experimentálnímu měření jemných částic v krbových kamnech se použila metoda SMPS, která byla obecně popsána už v předchozích kapitolách. Tato bude níže popsána detailněji i s konkrétní náhledem na celou sestavu nachystanou k měření. Schéma zapojení jednotlivých zařízení s hlavními vstupy je možno vidět zde:



Obrázek 30 Blokové schéma SMPS

6.5.1 Kamna

Popis kamen je uveden výše a jediné co je dobré dodat je, že v rámci měření je do kamen vmontováno několik termočlánků (pro sledování teplot spalín), a to tak aby nebyl zničen vysokou teplotou a zajistily všechny stěžejní oblasti vnitřního prostoru.

- **Vstup**

Celá sestava začíná u samotných kamen Grönland 4673-6, do kterých je přiváděn vzduch z okolí, který obsahuje kyslík, bez něhož by se proces hoření neobešel. Tento přívod vzduchu je centralizovaný a vstupuje do kamen ze zadní části otvorem o průměru 100 mm, poté je dále rozdělen na primární, sekundární a terciální, který se jako jediný nedá regulovat. Druhý vstup do kamen je palivo, v tomto případě se jedná o smrkové dřevo s vlhkostí cca 7 %. Dřevo se přikládá ručně a jak je obecně známo, tak jeho vlhkost se pohybuje od 0 do 60 % a čím je tato vlhkost nižší, tím je vyšší výhřevnost, viz. Rešerše. Dřevo do kamen je nutné tedy mít vysušené a pro měření navíc i zvážené, doporučená příložená dávka je cca 2 kg/h. [77]

- **Výstup**

Z kamen odchází spaliny o určité teplotě a pod určitým tlakem, tento tlak (cca 12 Pa) podtlak v komíně, vyvolávající rozdíl teplot venkovní a vnitřní teploty, zajišťuje tah, tedy proudění spalin komínem ven. V komíně, přesněji v ústí z kamen do kouřovodu jsou tři termočlánky, které měřili teplotu spalin. Asi metr nad kamny je umístěn odběr (běžně bývá odběrová sonda). Odebíráme tedy spaliny v kouřovodu metr nad nejvýše položenou částí kamen, tedy nad horní deskou. Odběr je zajištěn zahnutou trubicí, která má jeden konec ve středu proudu spalin, tak aby samovolně spaliny do ní proudily, a druhý konec vede kolmo stěnou roury ven, kde dál pokračuje pomocí hadičky až k ejektorové ředičce. Hadička je ohřívána na cca. 250 °C, aby se spaliny nezchladily pod teplotu kondenzace.

Druhý výstup je taktéž pomocí zahnuté trubice a pokračuje opět hadičkou, nicméně je zde z důvodu měření oxidu uhelnatého (CO) a kyslíku (O_2), proto jsou v cestě trubice umístěny dva filtry na pevné částice, které jsou běžně použity u aut, aby se přístroj, vysoce citlivý na větší množství částic, nezničil.

6.5.2 Vymrazovačka

Do vymrazovačky vstupuje, už částečně vyčištěný od pevných částic, vzorek spalin. Ve vymrazovačce je nutné tento vzorek zchladit neboli vymrazit, aby se z něj kondenzací dostala ideálně všechna vlhkost. Po zkondenzování se vlhkost odloučí a suchý plyn, který není nebezpečný pro přístroje pokračuje dál do analyzátoru plynných látek.

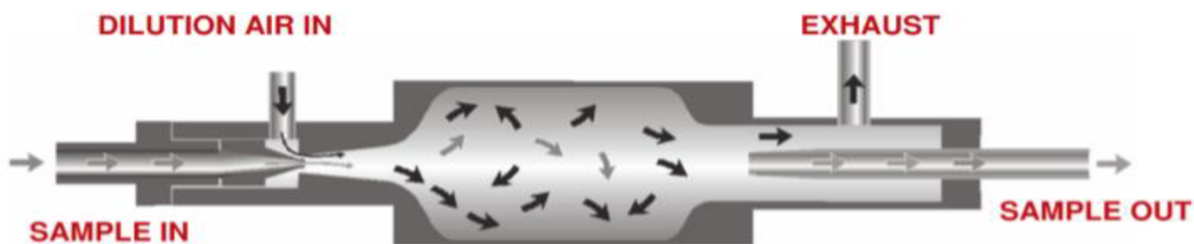
6.5.3 Analyzátor plynných látek

Zařízení, které snímá, jak bylo výše uvedeno primárně množství kyslíku a oxidu uhelnatého. Zařízení zachytává nejen okamžitou hodnotu ale i vytváří základní grafy, které ukazují patřičné změny během měření. Samotné množství kyslíku je velice důležité snímat, aby se mohlo případně ubírat nebo přidávat primárního a sekundárního vzduchu, a to zejména při rozhořování paliva.

6.5.4 Ejektorová ředička

Ejektorová ředička je zařízení, které ředí spaliny na principu ejektorového zařízení. Protože v reálné situaci vzniká velké množství částic, a to by rychle ucpalo zařízení, které by následně přestalo měřit skutečné množství částic, je nutné je výrazně ředit. Navíc při přímém odběru by často došlo k překročení horní hranice možné měřené koncentrace. Z oněch dvou výše zmíněných důvodů je tedy nutné spaliny ředit čistým vzduchem o určitém poměru, který je v tomto případě 1:8,44, tedy jsou spaliny ředěny tak, aby jich bylo 8,44krát méně než přiváděného vzduchu. Ejektorová ředička připravuje vzorek na vstup do další části sestavy, tedy do zařízení DMA (Differential Mobility Analyzer), což je zařízení sloužící pro klasifikaci částic podle elektrické mobility.

První vstup do ředičky jsou spaliny udržované při teplotě cca. 250 °C, viz. výše. **Druhý vstup** je vzduch přiváděný do ředičky. Vzduch je kompresorem tlakován a následně seškracen na 2-3 bary. Než vstupuje seškracený vzduch do ředičky, je ohříván na teplotu cca. 250 °C. [81]



Obrázek 31 Ejektorová ředička Dekati – princip [81]

Dilution air in – vstup ředícího vzduchu; Sample in – vstup vzorku spalin; Exhaust – výfuk; Sample out – výstup naředěného vzorku

6.5.5 Impaktor

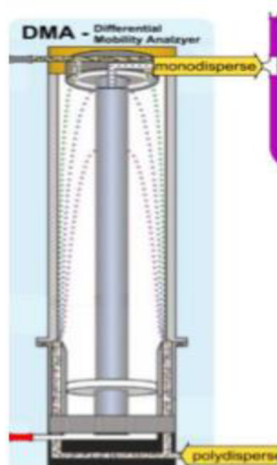
Impaktor je část zařízení, jež slouží k odstranění největších, a tedy i nejhmotnějších částic, které by normálně ucpávaly přístroj a výsledky by byly zkreslené a s velkou odchylkou. Impaktor se skládá z trysky o průměru (0,0457 mm), která zvyšuje rychlost proudu, a pravouhlé zatačky, která zajistí ono odloučení největších částic. Částice nad určitou velikost nejsou díky setrvačnosti schopny změnit svůj směr, a proto se usadí na vazelínou namazané ploché stěně. Vazelína je třeba měnit, aby se dodržely stabilní podmínky a měření se nezkreslovalo.[37]

6.5.6 Neutralizátor

V neutralizátoru se nejprve neutralizuje náboj částic a následně se částice nabijí na jednu polaritu, takto nabitě částice vstupují do DMA. [80]

6.5.7 DMA (Differential Mobility Analyzer) model 3080L

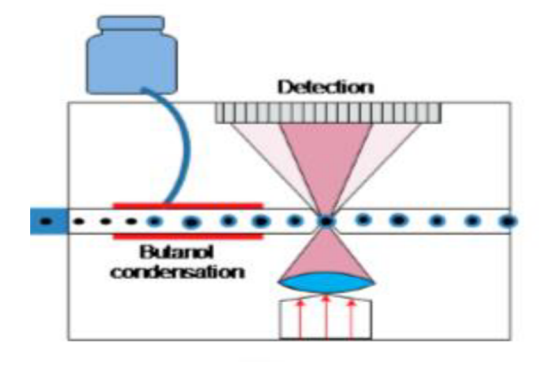
DMA je zařízení, které třídí částice dle elektrické mobility, aby mohly být pak spočítány. Třídí je díky elektrické energii, protože částice jsou nabitě a po tom co vletí do meziprostoru jsou na základě velikosti elektrického napětí a druhu náboje ovlivňovány, tak je jejich trajektorie měněná a tím se už roztřídí. [80]



Obrázek 32 Princip DMA [80]

6.5.8 CPC (Condensation Particle Counter) model 3775

Kondenzační počítadlo, které detekuje počet monodisperzních částic. Samotné částice jsou totiž velmi malé na to, aby byly detekovány nějakou optickou metodou, proto částice uměle zvětšujeme, když je necháme procházet nasycenými parami butanolu. Butanolové páry díky zchlazení kondenzují na částicích a ty díky těmto parám rostou až na velikost 1 μm . částice o velikosti 1 μm už lze velmi dobře detekovat optickou laserovou detekcí. [80]



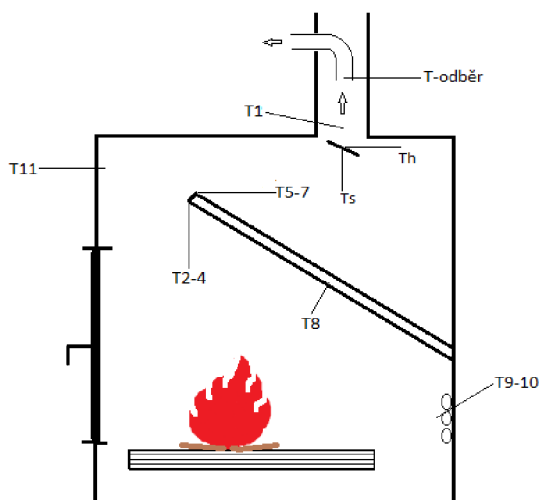
Obrázek 33 CPC-princip [80]

6.6 Průběh měření

Aby se dalo lépe představit, co se kde a jak měřilo, je nejprve důležité si alespoň ilustračně ukázat kam se tzv. nainstalovaly termočlánky, a jak se zhruba vnitřní prostor musel uzpůsobit (instalace termočlánků + instalace konstrukčních prvků z vermikulitu), aby bylo možné pokrýt všechny stěžejní místa nejen v krbových kamnech. Obložení ohniště je z Vermikulitu, =velmi odolného materiálu.

6.6.1 Rozmístění termočlánků v krbových kamnech

V krbových kamnech, které jsou pořízena k experimentálnímu měření do laboratoří VUT, jsou nainstalovány termočlánky, a to přesně na 9 míst, které jsou zobrazeny níže na obrázku odpovídajícím dané věci.



Obrázek 34 Rozmístění termočlánků v krbových kamnech

Každý termočlánek obsahuje nějaké čidlo, které snímá teplotu a ta je následně měřena a vyhodnocena. Pro jednoduchost a následný popis měření se všechny teploty označily zkratkami, kde každý index (cokoli mimo velké tiskací T) odpovídá počtu nainstalovaných termočláneků, případně místu (h, s, odběr), kde se termočlánek lokačně nachází.

Tabulka 12 Popis zkratk teplot na termočláncích

<i>T1</i>	<i>Teplota na začátku kouřovodu</i>
<i>T2-4</i>	<i>Teplota na spodní straně desky nad ohništěm</i>
<i>T5-7</i>	<i>Teplota na horní straně desky nad ohništěm</i>
<i>T8</i>	<i>Teplota uprostřed desky nad ohništěm</i>
<i>T9-10</i>	<i>Teplota terciálního vzduchu do krbu (měřeno uvnitř ohniště)</i>
<i>T11</i>	<i>Teplota ve slepém místě „Roh, mezi 1 a 2 tahem“</i>
<i>Th-Ts</i>	<i>Teplota před výstupem z kamen „na konci druhého tahu“</i>
<i>T-Odběr</i>	<i>Teplota v místě odběru vzorku spalín</i>

6.6.2 Podmínky měření a měřících zařízení.

Aby se mohlo měření případně opakovat, je nutné si stanovit za jakých podmínek, jaké zařízení pracuje a tím tak předejít spekulacím a nemožnosti si výsledky dalšími měření ověřit.

Tabulka 13 Nastavení zařízení pro měření

<i>Parametry SMPS</i>	
<i>Průtok CPC</i>	<i>0,3 litru za minutu</i>
<i>Sheat flow</i>	<i>3 litru za minutu</i>
<i>Průměr trysky</i>	<i>0,0457 mm</i>
<i>Parametry Dekati ředičky</i>	
<i>poměr ředění</i>	<i>8,44</i>
<i>Parametry Dekati Impaktoru</i>	
<i>Teplota hadice do ředičky</i>	<i>250 °C</i>
<i>Teplota předehřevu vzduchu</i>	<i>240 °C</i>
<i>Teplota ředičky</i>	

6.7 Měření

Na začátku, před možným měřením se nachystaly dle schématu přístroje potřebné k měření. Přístroje byly propojeny a některé části predehřaty na požadované hodnoty. Před samotným zápalom už byl zapnutý přístroj na detekci částic a vložili jsme do krbových kamen nasekané smrkové dřevo o hmotnosti 2,82 kg. Zápal probíhal za maximálního otevření přívodu vzduchu, a to jak primárního, tak i sekundárního a terciálního (nelze regulovat). Nasekaná polena se zapálila pomocí plynové pistole s hořákem, aby se neovlivňoval experiment a hodnoty týkajících se měření byli odpovídající realitě. Zápal tedy započal v **9 hodin 24 minut a 30 vteřin**.



Obrázek 35 Zápal

Přibližně 7 a půl minuty po zápalu se nastavila klapka, kterou se ovlivňuje tah komína na 12 Pa. Klapka je umístěna v komínové rouře tzv. v kouřovodu, v dané výšce. Tato diference tlaku (12 Pa) se snažila zachovat po celou dobu měření klapkou v požadované poloze. Ovládání klapky je manuální přes řetízek. Jak se zatáhne, tak se dle zatažení natočí klapka a tím se tak mění diference tlaku mezi venkovním a vnitřním prostorem tedy mezi vzduchem venku a v místě vyústění spalin z krbu do kouřovodu.

Cca 10 minut po zapálení se stáhl přívod primárního vzduchu na 25 % a dokorigoval se klapkou komínový tah.

10:00:32 bylo přiloženo nasekané smrkové dřevo o hmotnosti 2,02 kg chvíli poté změřena rychlost nasávaného vzduchu centrálním přívodem vzduchu do kotle, který se nachází v zadní části kotle s otvorem 100 mm umístěným ve spodní třetině výšky kotle. K měření byl použit anemometr a rychlost nasávaného vzduchu činila 0,65 m/s, následně se trochu korigoval komínový tah klapkou.

10:54:14 bylo přiloženo nasekané smrkové dřevo o hmotnosti 2,0 kg, přeměřila se rychlost nasávaného vzduchu a korigována klapka na tlakovou diferenci 12 Pa.

11:09:09 zapojeny plyny, protože byly ideální podmínky pro měření už ustáleného stavu.

11:50:59 přiloženo 2,10 kg nasekaného smrkového dřeva a vyčištěna tryska impaktoru + vyměněna vazelína na záchytné plošce, kde se odlučují největší částice=částice větší nebo rovny 10 mikrometrů. Doladil se tak tlakový rozdíl (diference) a změřila se rychlost centrálního přívodu vzduchu, která činila 0,66 m/s.

12:45:09 přiloženo 2,12 kg nasekaného smrkového dřeva a vyčištěna tryska impaktoru + vyměněna vazelína na záchytné plošce. Tlaková diference se opět dle výchytky doladila klapkou na 12 Pa. Rychlost centrálního přívodu vzduchu, činila 0,67 m/s.

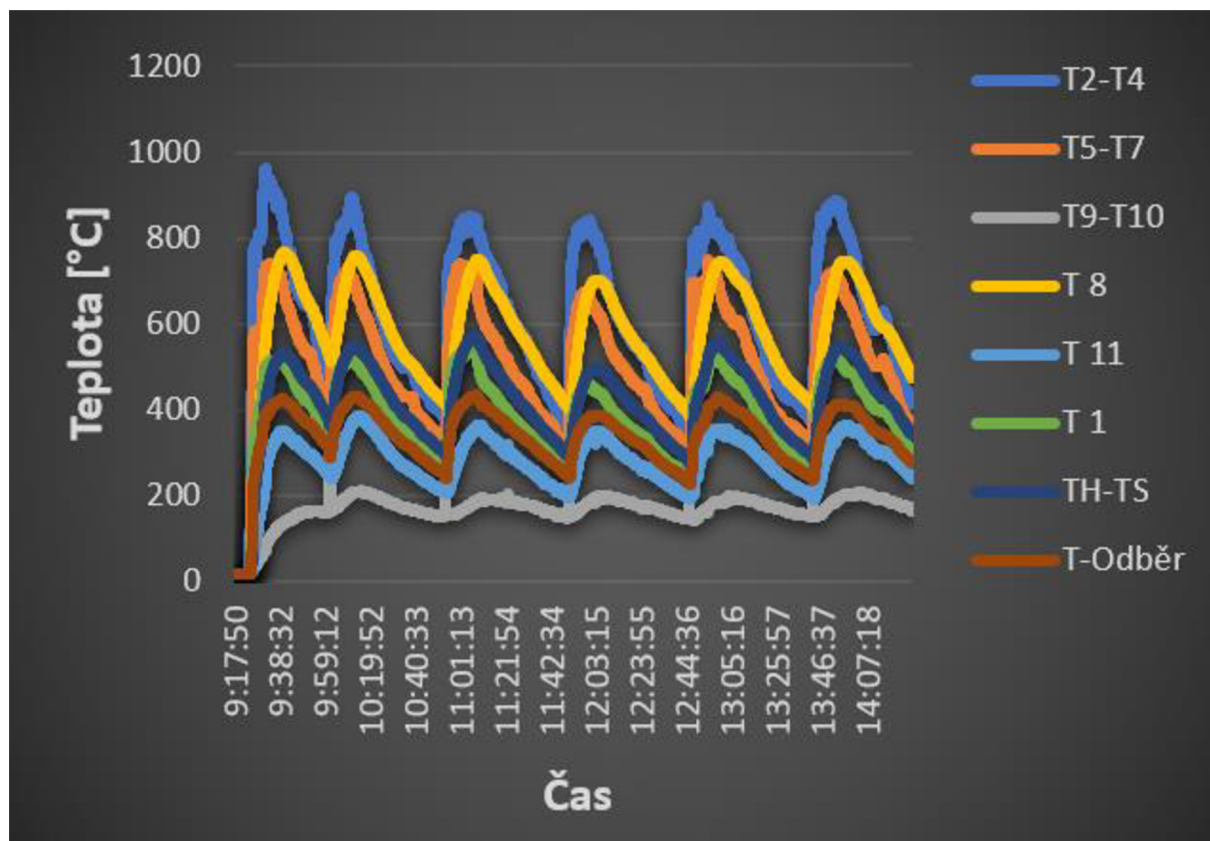
13:41:50 přiloženo 1,94 kg nasekaného smrkového dřeva a vyčištěna tryska impaktoru + vyměněna vazelína na záchytné plošce. Tlaková diference se opět dle výchytky doladila klapkou na 12 Pa. Rychlost centrálního přívodu vzduchu, činila 0,65 m/s.

6.8 Vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení naměřených výsledků je nejdůležitější částí této práce, a tak je třeba aby bylo podrobné a taky doplněné a přehledné grafy, obrázky a tabulky. Vzhledem k tomu, že prostřednictvím zařízení byly naměřeny a vygenerovány hodnoty: teploty termočlánků v závislosti na čase, difference tlaku (tah komína) v závislosti na čase, částice jednotlivých frakcí na škále 17,8nm až 532,6nm a jejich: počet, povrch, objem, hmotnost v závislosti na čase, tak se jimi dále tato práce zabývá.

6.8.1 Vyhodnocení měření teploty

Teplota, jako velmi důležitý parametr pro jakýkoliv spalovací proces, se dá měřit různými způsoby, ať už klasicky rtuťovým teploměrem nebo termokamerou či v našem případě termočlánky. Vždy nám rozložení teplot v daném zařízení prozradí spoustu informací o tom, kde jsou stěžejní kritická místa a kde naopak není třeba vůbec brát onu teplotu v úvahu. Z naměřených teplot termočlánky, během celého měření, se získaly data a ty je možné vidět v grafu jako závislost teplot na čase z různých částí krbových kamen.



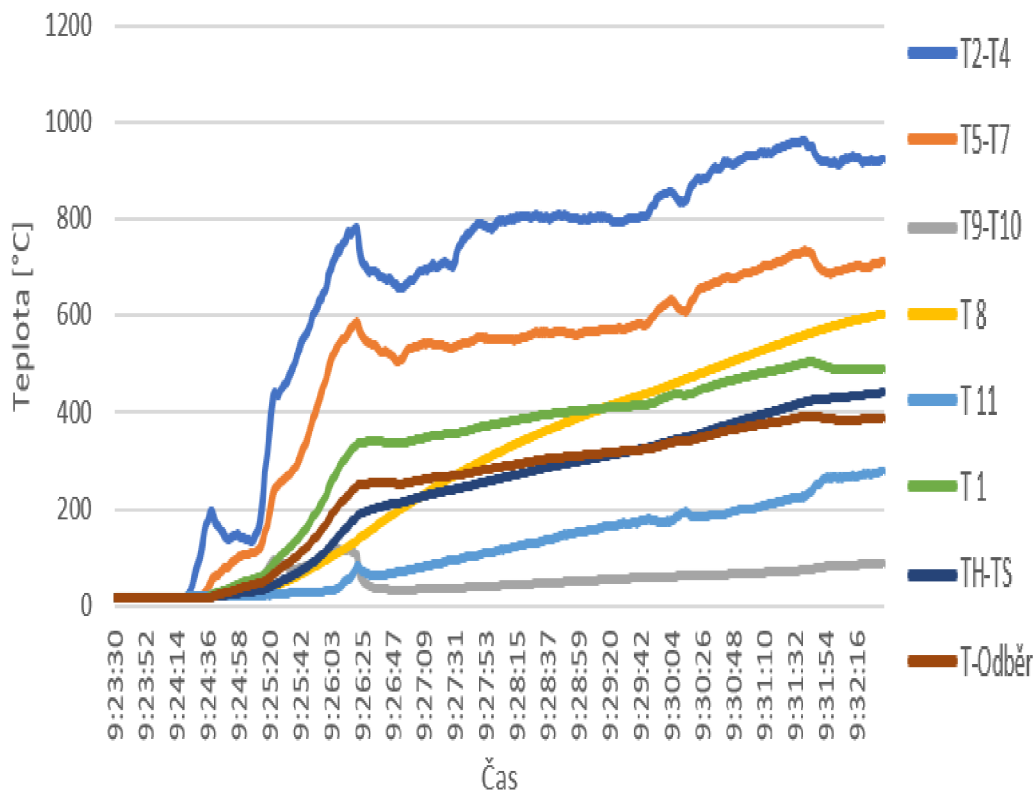
Obrázek 36 Závislost teplot na čase v průběhu měření

Na tomto grafu je možné vidět, jak se pohybovaly teploty termočlánků, které byly rozmístěny systematicky uvnitř krbových kamen, aby se pokrylo co nejvíce stěžejních lokací. V legendě je napsané pouze označení, jak se teploty značily a vysvětlení, co která teplota znamená, je možné najít výše v tabulce podkapitoly *Rozmístění termočlánků v krbových kamnech*.

Je dobré si všimnout, že všechny píky odpovídajících teplot (naměřených termočlánky), až na píky, kdy se krbová kamna výrazně zahřívaly (od zápalu 9:24:30 po druhé přiložení v 10:54), se v průběhu celého měření měnily, dle přiložení nasekaného dřeva do krbu, skoro

identicky. Nejdůležitějším momentem je čas zapálení, po kterém začaly teploty velmi rychle růst. Teplota T2-4 (Teplota na spodní straně desky nad ohništěm) rostla nejstrměji a cca 14 minut po zápalu dosáhla maximální teploty 962 °C, zatímco teplota T5-7 (Teplota na horní straně desky nad ohništěm) dosáhla svého maxima o 2 minuty dříve. Teplota T8 (Teplota uprostřed desky nad ohništěm) dosáhla maximální hodnoty 765 °C 16 minut po zápalu. Tyto tři teploty, po dosažení svého vrcholu se už více nezvětšovali, ale začali klesat, a to až k hodnotám pro horní a spodní stranu desky nad ohništěm (300 °C) a pro střed desky nad ohništěm (507 °C). Teploty termočlánků, které byly umístěny mimo spalovací prostor (T1, T11, Th-Ts, T-odběr) dosahovaly svých maxim řádově o stovky méně, a to v čase 13 až 16 minut po zapálení. Teplota termočlánku umístěného u přívodu terciálního vzduchu v ohništi T9-10, dosáhla na své maximum (165 °C) až 32 minut po zápalu, tedy 4 minuty před dalším přiložením. Tato teplota, T9-10, se celkově nedostala nikdy výše než 207 °C a té dosáhla až v 14:03:00. Zároveň je nutné podotknout, že příčina takto nízké teploty byla ve stabilním chlazením venkovním studeným vzduchem. Teploty T2 až T8, v průběhu dalších příkládání, svá maxima oproti zápalu postupně snížila o pár desítek stupňů na hodnoty T2-4 (850 °C), T5-7 (750 °C), T8 (760 °C). Nejnižších Maxim tyto Teploty dosahovaly po třetím přiložení. Zatímco maxima průměrně maximální dosažené teploty pro T2 až T8 malinko klesla oproti zápalu, tak ostatní teploty přirozeně s prohříváním celých krbových kamen rostly, a to o více než pár stupňů. Celkově bylo dosaženo nejnižších piků teplot po třetím přiložení, zřejmě došlo k rychlejšímu vyhoření paliva, a tak se celá krbová kamna o něco více zchladily, též v tom mohla hrát roli struktura naskládaných polének, doba příkládání (lidský faktor) a intenzita hoření. Teplota T-Odběr (Teplota v místě odběru vzorku spalin), která je velmi podstatná pro vyhodnocování částic při odběru vzorku spalin z kouřovodu, měla např průběh takový, že dosahovala vždy maximální teploty okolo 425 °C s tím že nejvyšší teplotu měla 434 °C a to celých 14 minut po druhém přiložení. Minima v jednotlivých uzlech dosáhla naopak těsně před třetím přiložením, a to se teplota pohybovala okolo 225 °C.

Z grafu je názorně též vidět, že po zapálení, rozehřátí krbu a prvních dvou přiloženích, kdy se ještě stabilizovaly podmínky pro měření, a zároveň připojení přístrojů na měření plynů, se maxima teplot až na uzel třetího přiložení, moc nemění a drží si výšku v rámci malých výkyvů. Teploty všech termočlánků výrazně reagují na množství hořlaviny v palivu a intenzitě spalování, a tak je jasně znát, že zhruba mezi druhou a osmnáctou minutou od každého přiložení dochází k největšímu uvolňování tepla a všechny teploty se zvedají a drží kolem svého maxima.

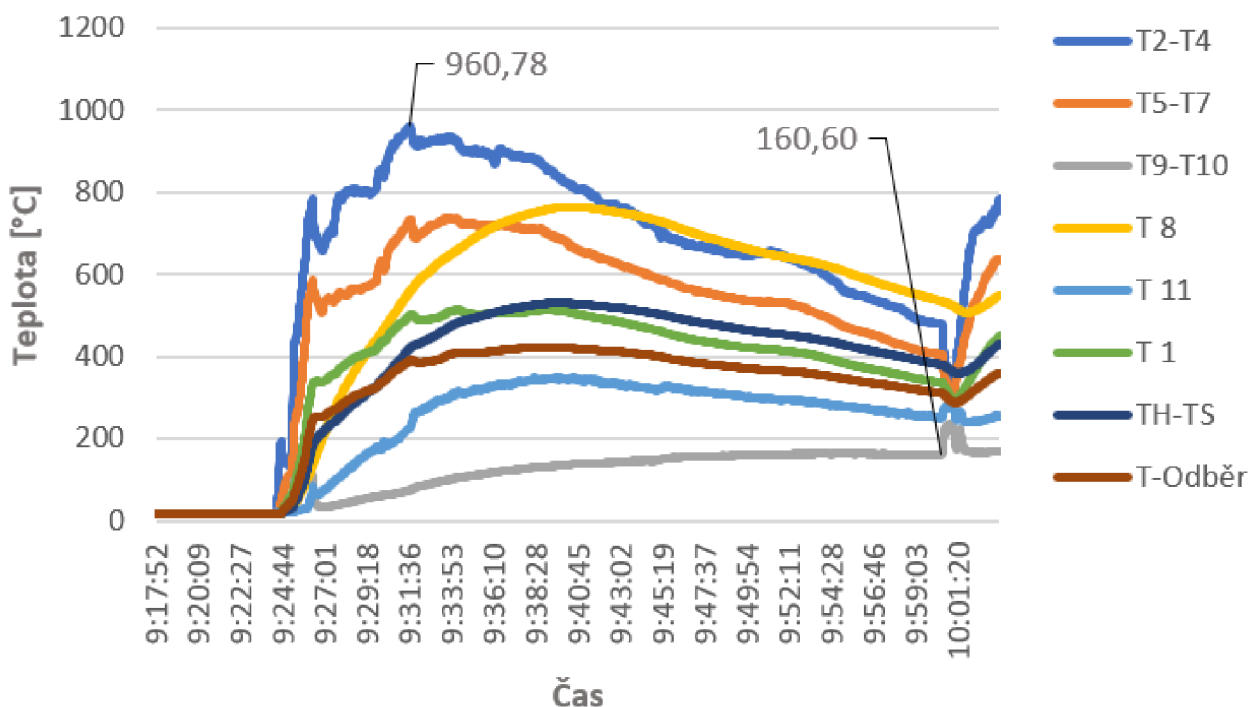


Obrázek 37 Změny teplot v závislosti na čase uzel-zápal

Z výše znázorněného grafu lze vyčíst, že teploty krátce po přiložení dřeva do krbu, rapidně rostou nahoru, a to s největším gradientem po dobu prvních dvou minut. Teplota T2-4 = Teplota na spodní straně desky nad ohništěm se nejprve chvíli zdrží na teplotě kolem 200 °C a následně opět roste, až se pak dostane k teplotě okolo 800 °C. Od 800 °C už roste pomaleji až se vyšplhá k teplotám okolo 950 °C a na vysoké teplotě se chvíli drží a pak padá v důsledku snižujícího se obsahu hořlaviny, změny tahu a odhoření největšího podílu prchaví hořlaviny. Prchavá hořlavina se začíná uvolňovat okolo 300-800 °C a velmi rychle vyprchá s tím, že se pak uvolňuje v zanedbatelném množství dále. Teplota T2-T4 má umístěný termočlánek v podstatě nad ohništěm v přímé linii na desce z vermikulitu, a tedy i logicky dosahuje nejvyšších hodnot => nejvíce kolísá. U každé naměřené teploty záleží na umístění odpovídajícího termočlátku. Termočlánek umístěn k přívodu terciálního vzduchu do ohniště (T9-T10) nikdy nedosáhne vyšších teplot než ostatní místa.

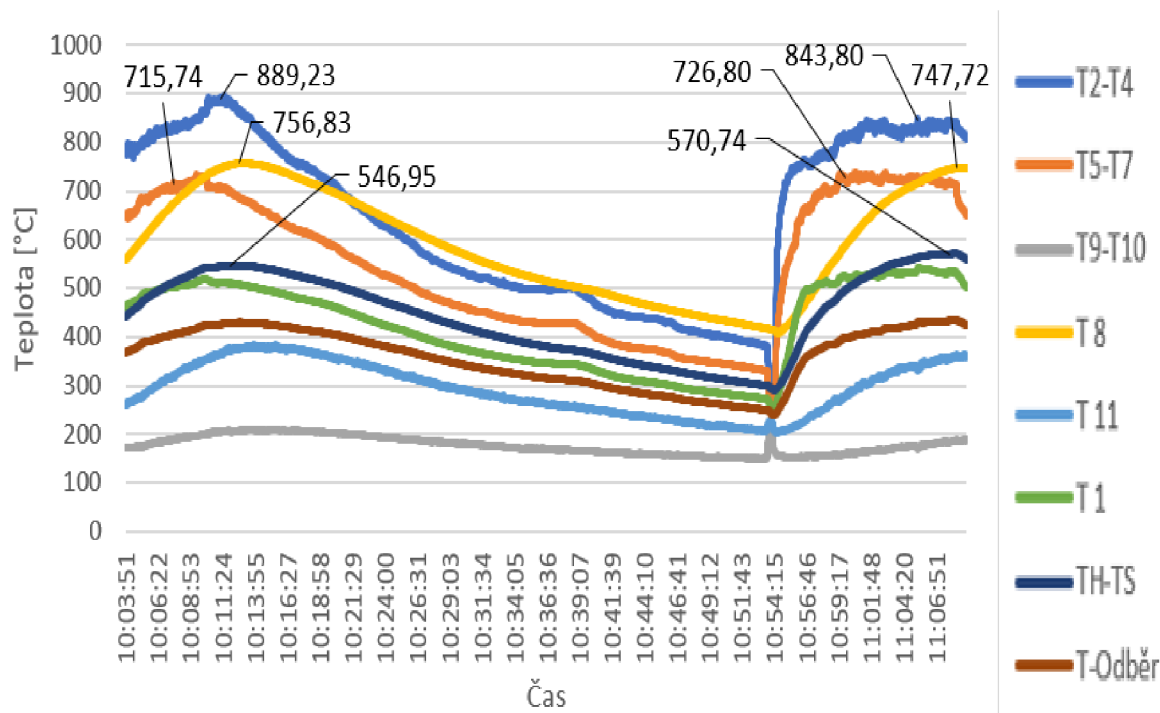
Teplota T5-T7 (teplota na horní straně desky nad ohništěm) má podobný růst jako T2-4 přičemž logicky dosáhne nižších hodnot, jak v průběhu, tak i při vrcholu, protože je snímána za deskou, a tudíž je už v uměle vytvořeném druhém tahu, kde jsou spaliny přirozeně chladnější, ale zároveň je ohřívána díky vedení tepla tzv. kondukcí přes desku ze spodní strany. Teplota v místě odběru spalin (T-Odběr) má umístěn termočlánek v kouřovodu u hrdla odběrové zahnuté trubky a logicky je jeho teplota nižší ruku v ruce s délkou trasy spalin, a taky je závislá na množství hořlaviny. Teplota T11 (teplota ve slepém místě „Roh, mezi 1 a 2 tahem“) je teplota ukazující, že i v takovém krbu jsou zákoutí, které se prostě ohřejí pomalu a málo, protože přes ta místa teplý proud spalin skoro vůbec nejde. Tato teplota má tedy nárůst malý a nedosahuje vysokých hodnot. Teplota T8 (teplota uprostřed desky nad ohništěm) roste velmi idealisticky a pozvolna, skoro by se dalo říct „Podle přímky“, protože není v přímém směru spalin, ale ani v žádném slepém místě a místě ochlazování. Teploty T1 (teplota ústí ze spalinovodu) a Th-Ts (teplota před výstupem z kotle „na konci druhého tahu) mají velmi

podobný průběh jako teplota T-Odběr, jen se malinko liší hodnotou, protože jsou umístěny za sebou, a tedy jejich největší rozdíl je v trajektorii, kterou urazí spaliny, než se dostanou k termočlátku, tedy v tom, jak moc se přirozeně cestou ochladí, viz ztráty kotle v rešeršní části v jedné z předchozích kapitol.



Obrázek 38 Změny teplot mezi uzly zápal a první přiložení

Teploty od zápalu po první přiložení se pohybovaly následovně: 9:24:30 proběhl zápal a po pár vteřinách nastal růst teplot nahoru, který se až po dvou a půl minutách zmínil, dalo by se předpokládat, že došlo k velmi intenzivnímu hoření prchavé hořlaviny a uvolněných hořlavých plynů, kterých pak následně s časem výrazně ubývalo, a proto je zde k povšimnutí výrazné lokální maximum, při kterém teplota spalin v horní části spalovacího prostoru dosáhla hodnoty okolo 775 °C, teplota při ústí z kamen 340 °C, Teplota v místě odběru vzorku spalin 252 °C a teplota před ústím z kamen (termočlánek je upevněn na destičce před ústím) 204 °C. V čase 9:31:36, tedy 4 a půl minuty po lokálním maximu dosáhla teplota ve spalovací komoře svého maxima, které se u jiných termočlávků projevilo až následně. Od svého maxima začaly teploty velice zvolna klesat až pod 500 °C. V čase 10:00:32 byli všechny teploty na svém minimu mimo a bylo podruhé přiloženo. Teploty opět po přiložení rostly rychle vzhůru vlivem uvolňující se prchavé hořlaviny a jejím prudkým zahořením se teploty rychle dostaly k podobným maximálním hodnotám, jako při prvních maximech od zápalu. Zatímco teplota spalin v horní části spalovacího prostoru po zapálení dosáhla během 7 minut svého maxima 960 °C (ze spodní strany desky) a 730 °C z horní strany desky, tak teplota spalin ve středu desky dosáhla svého maxima (765 °C) až v 16. minutě po zapálení, tedy s jakýmsi časovým zpožděním. Stejně jako teplota v oblasti ústí do kouřovodu a odběru vzorku spalin. Teplota T9-T10 (Teplota terciálního vzduchu do křbu uvnitř ohniště) se po zápalu začala pomalu zvedat a těsně před přiložením byla na svém maximu 160,60 °C.

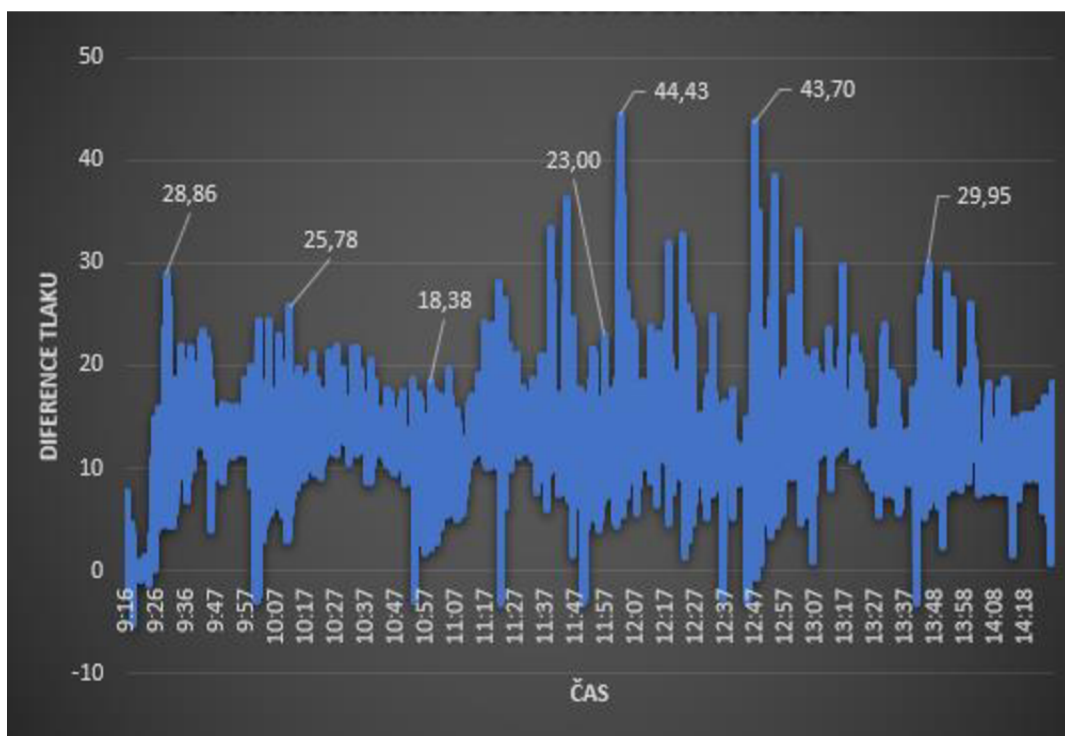


Obrázek 39 Změny teplot - uzel druhé příložení

Od prvního příložení (10:00:32) po druhé příložení (10:54:14) byly krbové kamna více prohřáté a tak jednotlivé Teploty nerostly z pokojové teploty, ale z teploty výrazně vyšší. Díky už rozehrátému obložení a konstrukce kotle jsou všechny teploty v průměru vyšší, nicméně svá maxima nikdy nepřekročily více, jak o pár desítek stupňů, proto nedochází k výrazné synergii tepla (hlavně kvůli tepelným ztrátám do okolí), ale spíše k pozvolnému stoupání průměru teplot. Zatímco po prvním příložení vystoupala teplota na spodní straně desky ve spalovací komoře na 889°C, tak po druhém příložení už pouze na 843°C. Horní strana této desky z vermikulitu dosáhla maximální teploty 715°C a po druhém příložení 726°C. Za povšimnutí stojí i teplota těsně před vstupem do komína (TH-TS), která dosáhla, po prvním příložení, svého maxima 547°C a po druhém příložení 571°C. Dále by šlo sledovat každý další teplotní uzel se závěrem, že už se jedná o opakující se změny s malým zvýšením průměru teplot, což je v tuto chvíli pro tento experiment zanedbatelné. Zajímavé je, že teploty po dosažení maxima tak rychle nepadají dolů, ale klesají volněji.

6.8.2 Vyhodnocení měření tlaku

Ač se to nezdá být na první pohled důležité, tak změna tlaku je jedním ze zásadních faktorů, které se podílí na kvalitě a intenzitě spalování. Díky ohřátí vzduchu při zapálení dochází ke stoupání teplého vzduchu a samotných spalin kouřovodem směrem vzhůru. Tím že vzniká proudění teplého vzduchu se vytváří v krbu podtlak a ten tak vyvolává nasávání vzduchu do krbu. Rychlost nasávání se měří anemometrem a z hlavního přívodu průměru 100 mm je vzduch dále rozdělen na primární, sekundární a terciální vzduch s následným rozvedením konstrukcí do míst, dle návrhu konstruktérů. Standartně u primárního vzduchu pod rošt a sekundárního vzduchu někde do druhé poloviny ohniště, aby se lépe a kvalitněji spálili uvolněné hořlavé plyny a tuhé částice, které obsahují hořlavinu.



Obrázek 40 Změna difference tlaku během měření

Graf 40, který je zobrazen výše, na první pohled vypadá, jako směs chaotických skoků hodnot tlaku od -4 do 44 Pa, ale je třeba si uvědomit, že nejen spalování v krbu ale i venkovní tlak a rychlost vzduchu má velký vliv na tah, a tedy na tlakovou diferenci mezi venkovním prostředím a vnitřním prostředím. Pokud tedy některé teploty výrazně uskočili, není třeba se obávat toho, že by to mělo zásadní vliv na měření, obzvláště pak, když se v dalších časech skokově vrací k tlakové diferenci kolem (12-15) Pa. Medián difference tlaku je 12,83 Pa což je vcelku uspokojivé. V grafu jsou vyznačené konkrétní body s naměřenou hodnotou cca 6-7 minut po přiložení a lze si tudíž všimnout, že právě v tuhle dobu (6-7 minut po přiložení) dosahují nejvyšších hodnot. Má to samozřejmě spojitost s teplotami, které, jak bylo výše v podkapitole měření teploty zmíněno, stoupají rychle po přiložení v časovém horizontu cca 2-6 minut.

Dalším faktorem, který by se neměl opomenout je vliv samotné chyby měření, chyby přístroje + případné špatné jednorázové podmínky spalování a náhlé okamžikové poryvy větru.

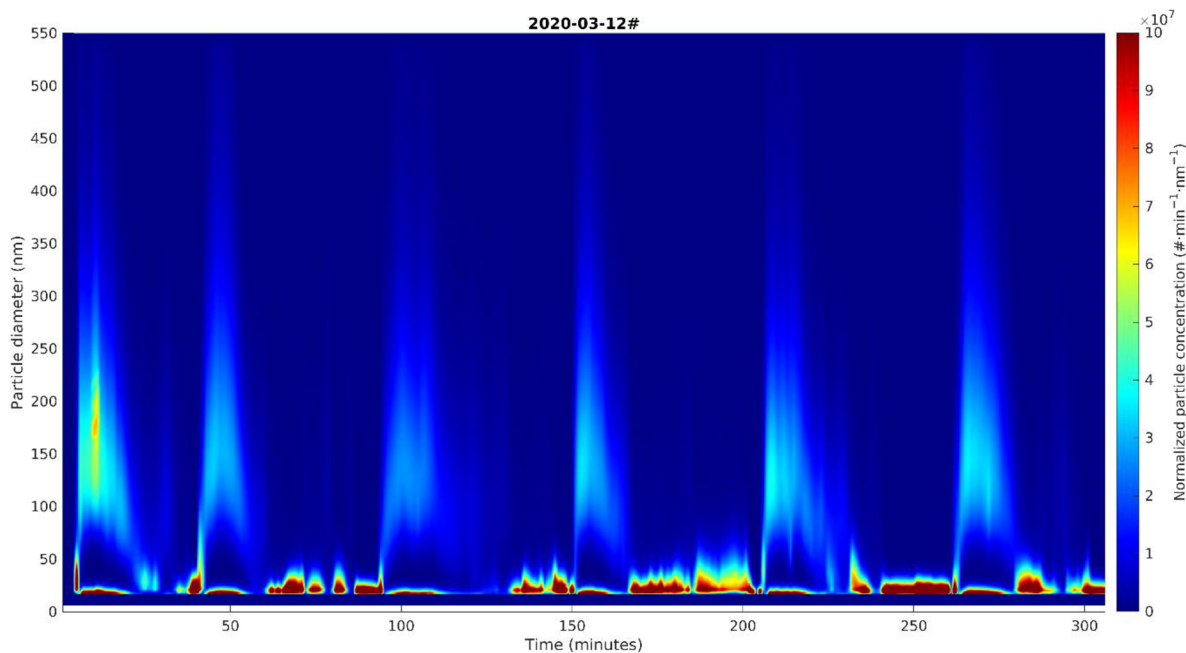
Jedním z důležitých vlivů je taky člověk, protože se obsluhující člověk stará o údržbu tlakové difference, tak může snadno zapomenout popotáhnout klapku v kouřovodu nebo v případě špatného tahu přidá vzduch a pak už neubere nebo ubere později. Množství vzduchu je dalším zásadním faktorem spalování a jde ruku v ruce s přirozeným podtlakem vyvolaným tlakovou diferencí. Více vzduchu, ale zvyšuje v případě pálení dusíkatých paliv množství vzniklých oxidů dusíku, což je nežádoucí. Zároveň čím více vzduchu, a tedy kyslíku vstupuje do ohniště tím se ochlazuje prostředí, a tedy to ovlivňuje i kvalitu spalování obzvláště prchavé hořlaviny, u kotlů se tak využívá ohřevu přicházejícího vzduchu spaliny pomocí výměníku. Je dobré hledat optimální řešení, a tedy na základě predikce a zjištěných experimentálních poznatků navrhnout automatický systém, který by proces hoření v krbových kamnech alespoň nahrubo korigoval.

Míno méně důležitý tlak se však tato diplomová práce zabývá mnohem důležitějším tématem, jako je množství vzniklých částic spalováním biomasy, v tomhle konkrétním případě

množstvím vzniklých jemných částic spalováním smrkového dřeva a dalšími parametry těchto vzniklých částic. Další podkapitola se týká vyhodnocení naměřených částic.

6.8.3 Vyhodnocení měření částic

V rámci měření jemných částic produkovaných krbovými kamny jsou výsledky zaměřeny hlavně na **počet, hmotnost, povrch, objem a průměr** těchto částic. Metodou SMPS se tedy dosáhlo výsledků sledovaných částic ve škále od 17,5 do 532,8 nanometrů. Tyto částice jsou klasifikovány jako **submikrometrové částice <1000 nm, ultrajemné částice <100nm, nanočástice <50 nm.**



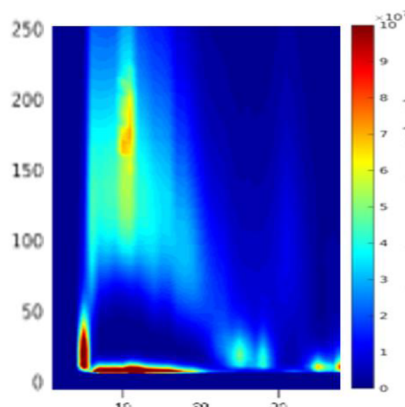
Obrázek 41 Počet částic různých frakcí vzniklých v čase

2-D barvený graf 40 se třemi osami zahrnující množství částic v závislosti na čase a rozměru jasně ukazuje, že se jedná opět o cyklický proces vzniku částic, tedy se dá říct, že má i tzv. uzlové body, kterými je každé přiložení a tím začíná nový cyklus. Levá osa zobrazuje škálu ultrajemných částic, které jsou detekovány, během procesu hoření, jedná se o částice v rozmezí od 17,5nm do 532,8nm. Dolní osa zobrazuje okamžitý čas v minutách (0-306), ve kterém měřicí přístroj každou minutu generoval (zobrazoval) naměřená data. Pravá osa zobrazuje hustotu jednotlivých frakcí částic, jinak taky řečeno koncentraci částic, a to barvami, přičemž od tmavě modré (=0) až po tmavě červenou ($=10 \times 10^7$).

6.8.4 Rozbor jednotlivých uzlů-počet částic

9:24:30 Zápal

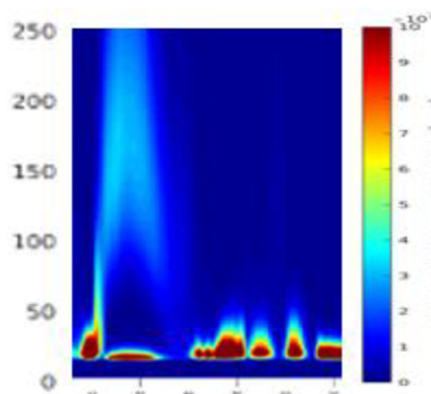
Nastal zápal dřeva a chvíli na to, co se první částice v rámci proudících spalin dostaly přes odběrovou trubici a ředičku až do oblasti detekce a sčítání, se začaly objevovat první výsledky počtu vzniklých částic. Měřilo se spektrum částic od 17,8 nanometrů až po 532,8 nanometrů. Během pár desítek vteřin po zapálení ihned skočilo vzhůru množství vzniklých nejmenších částic (nanočástic do 50nm), a to až k hodnotám 10^8 . Kolem 6. minuty po zapálení se celkový počet částic dostal na maximální hodnotu a pak tento počet padal až do 20. minuty po zapálení. Během růstu počtu částic se změnilo i spektrum a nejmenších částic, tzv. nanočástic násobně ubylo, vznikaly však v hojném počtu ($3-4 \times 10^7$) částice od 100 do 250 nanometrů, přičemž nejvíce jich bylo kolem průměru 180nm ($5-6 \times 10^7$). Od zapálení až po 20. minutu tedy vznikalo veliké množství částic pokrývající spektrum v celém rozsahu s tím, že nejvíce vznikalo stále nejjemnějších částic od 17 do 21nm. Po 20. minutě už vznikalo menší množství částic, a hlavně co se týče do velikosti frakce, tak spíše jen ty pod 250nm. Nejmenší množství částic vznikalo logicky těsně před přiložením, tedy když už dohořivaly zbytky hořlaviny, v tuto dobu byla logicky všude nižší teplota.



Obrázek 38 Zápal

10:00:32 První přiložení

Krátce po prvním přiložení, které proběhlo manuálně 36 minut po zapálení, se opět množství vzniklých částic násobně zvýšilo. Nárůst množství částic přirozeně nastává s přiložením palivem, které uvolňuje prchavou hořlavinu, zbavuje se vlhkosti a dalších látek které později, při dohořívání v palivu nelze nalézt v nějaké významné míře. K maximální hodnotě ($7,77 \times 10^9$) počtu vzniklých částic) vystoupil graf přibližně kolem 6. minuty po přiložení a pak už celkový počet vzniklých částic klesal až do 21. minuty po prvním přiložení. Vrchol ukazující nejmenší množství částic se opět nachází logicky těsně před dalším přiložením. Co se týče spektra vznikajících částic, tak ihned po přiložení opět narostlo množství nejmenších nanočástic (17,8-55), a to až na hodnoty 10^8 částic jednotlivých frakcí.

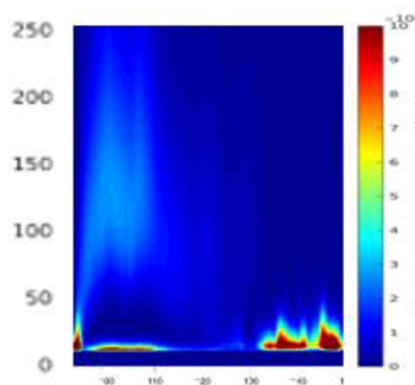


Obrázek 42 1.přiložení

Vznik nanočástic (spektra 17-50 nm) se později (během 2-3. minut) od přiložení smrškl na spektrum do 21nm, avšak začal se zvedat počet částic o větším průměru a spektrum vzniklých částic se roztáhlo co se týče do počtu a průměru během 3 dalších minut na celou škálu 17 - 530nm, obzvláště mezi 5 a 9 minutou po přiložení. Po 21. minutě po přiložení se opět spektrum i množství vzniklých částic zmenšilo na spektrum do 250nm, přičemž to rozhodně neznamená, že by ostatní frakce nevznikaly, jen jich je násobně méně, a tak nejsou tolik podstatné. Pozoruhodné je že po snížení spektra na 250nm se opět násobně zvětšil počet nanočástic (17,8-50) na stejné hodnoty, jako na začátku přiložení a cyklicky se tyto nanočástice, co se týče počtu mění od 2×10^7 do 10×10^7 . Nejširší spektrum je tedy opět od přiložení do výrazného poklesu, a tedy do stavu pomalého hoření, někdy i do dohořívání a největší celkový počet opět okolo 6 minut po přiložení.

10:54:14 Druhé přiložení

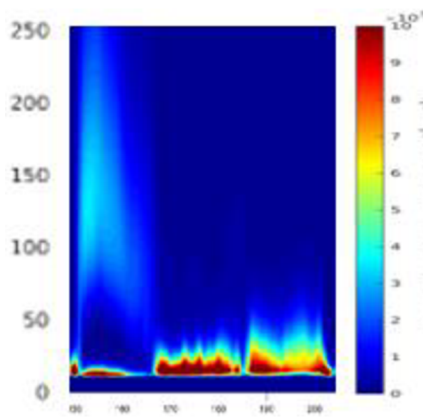
Vše se ohřálo a už jsou nastavené stabilní podmínky, chvíli na to připojené i přístroje na měření množství plynů atd. Krátce po přiložení opět vzniká pík, který nám ukazuje že se zvedlo množství nejjemnějších nanočástic a po dvou minutách se opět rozrůstá spektrum vzniklých částic až na celou škálu. Množství nanočástic se ve stejném čase jako rozšíření spektra (škály) vysoce početných frakcí částic, smrskává na oblast 17 - 20nm, ale stále vykazují jednotlivé frakce těchto nejmenších částic, že jich je početně až 10^8 . Maximálního celkového počtu částic je dosaženo opět cca. šest minut po přiložení a pak se spektrum nejpočetnějších částic smrsklo po 20 minutách na klasických 17-250 nm. Zhruba mezi 112 a 132 minutou měření tedy 19 minut po druhém přiložení se ovšem množství nanočástic velmi snížilo, a to až na počet $2-3 \times 10^7$. Lze tedy přepokládat, že se jedná o dobu kdy dřevo dohořívá povrchově, ale jakmile se trochu odhořením pohne a kyslík se dostane k další vrstvě nastává opět výraznější spalování hořlaviny, a tedy vzniku většího množství částic, zároveň je dost možné že i tah komína (diference tlaku) klesl, avšak lze se pouze domnívat a bylo by třeba i uměle tyto všechny faktory mít plně pod kontrolou, abychom věděli proč se tomu tak děje, protože téměř celých 20 minut je množství vzniklých částic násobně menší a pak nastává skok a nanočástice se početně změni až čtyřnásobně a pokrývají spektrum 17-23 nm s menšími výchyly až do dalšího přiložení.



Obrázek 43 2.přiložení

11:50:59 Třetí přiložení, stabilní měření

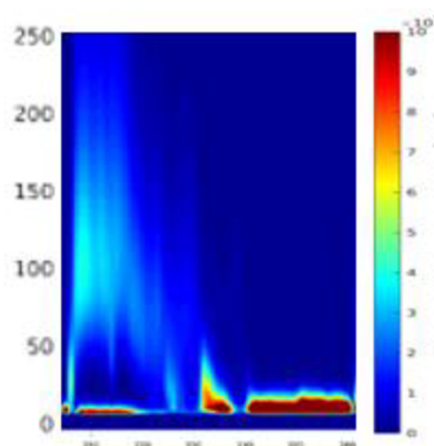
Krátce po třetím přiložení opět narostl počet nejjemnějších nanočástic na počet 10^8 , avšak už se to týkalo menšího spektra těchto částic (17-26 nm), přičemž po minutě se opět počet snížil a spektrum nejpočetnějších částic se rychle zvětšilo, avšak dosahoval třikrát menších koncentrací v porovnání s nanočásticovými frakcemi. Maximální celkové množství částic ukázal pík ve 4. minutě měření po přiložení. Je také velmi pozoruhodné, jak se s dalším a dalším přikládáním rychleji zvětšuje spektrum frakcí jemných částic v celou škálu, kterou měříme, tedy od 17nm po 532nm, zároveň se však během růstu spektra nejpočetnějších frakcí částic násobně zvětšil počet nanočástic (17 - 21nm) a jejich počet opět dosahoval k hodnotám 10^8 částic. Rozšířené spektrum zvýšeného počtu částic nad $2-3 \times 10^7$ je až do 18. minuty po přiložení. Spektrum mezi 100nm a 250nm je oproti svému okolí obsahově 2x bohatší na množství částic. Sotva se však snížilo spektrum nejpočetnějších částic, tak narostl počet i spektrum nanočástic. Spektrum těchto vzniklých nanočástic už pokrývalo rozmezí 17 - 29nm a počet byl opět kolem 10^8 částic každé frakce. 35 minut po přiložení množství nejpočetnějších frakcí vzniklých částic klesl asi na minutu o 70 % a pak opět stoupl, a dokonce se spektrum nepatrně zvětšilo a už pokrývalo frakce od 17nm do 45nm. Počet těchto částic se už i malinko lišil, a to od 4×10^7 po 10^8 částic na frakci. Pochopitelně těch nejjemnějších byla větší koncentrace a čím byli frakce o větším průměru tím bylo částic až po průměr 75 méně. Větší částice, než 75 nm už byly ve velmi malém zastoupení (násobně menšího počtu) aby se brali v nutnost zmínění.



Obrázek 44 3.přiložení

12:45:09 Čtvrté přiložení, stabilní měření

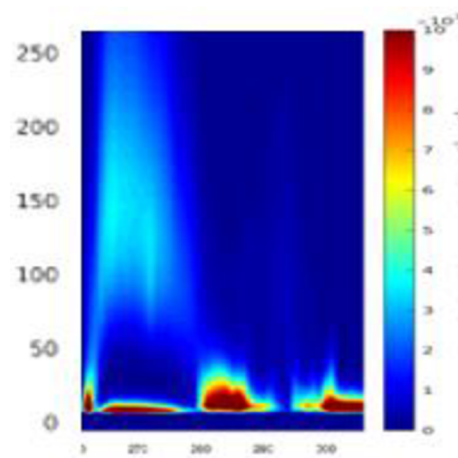
Krátce po čtvrtém přiložení, kdy se na malou chvíli (asi 1 minutu) zvedl dočasně pik frakcí nanočástic (17-23 nm) se opět začalo zvětšovat spektrum nejpočetnějších nanočástic, kdy největšího celkového počtu vzniklých částic bylo dosaženo zase 4 minuty po přiložení a celkový počet klesal i se spektrem z původní celé škály na spektrum do 250nm do 14 minut od přiložení. Během největšího nárůstu a klesání spektra i počtu částic se drželo opět i spektrum nanočástic (17 - 20nm) kolem hodnoty 10^8 částic na frakci. Tyto nejjemnější nanočástice však po 11 minutách snížili svůj počet až pětinasobně. Ovšem nic netrvalo dlouho a proces hoření a vzniku jemných částic dal za vznik vyššímu počtu nanočástic od 17nm do 27nm s malou výchytkou, kdy proces spalování v 34.-36. minutě po přiložení nevykazoval skoro žádné výrazné množství vzniklých částic. Od 36. minuty se však něco změnilo zřejmě vzplála část dřeva a začaly se uvolňovat další nanočástice ve vysoké koncentraci 10^8 částic na frakci, a to v celém spektru (17-32 nm) tyto koncentrace vydržely v takovém rozsahu spektra bez nějakých výchytek a skokových piků až do 1 minuty před dalším přiložením, a to je velmi zvláštní oproti předchozím přiložením.



Obrázek 45 4.přiložení

13:41:50 Páté přiložení, stabilní měření

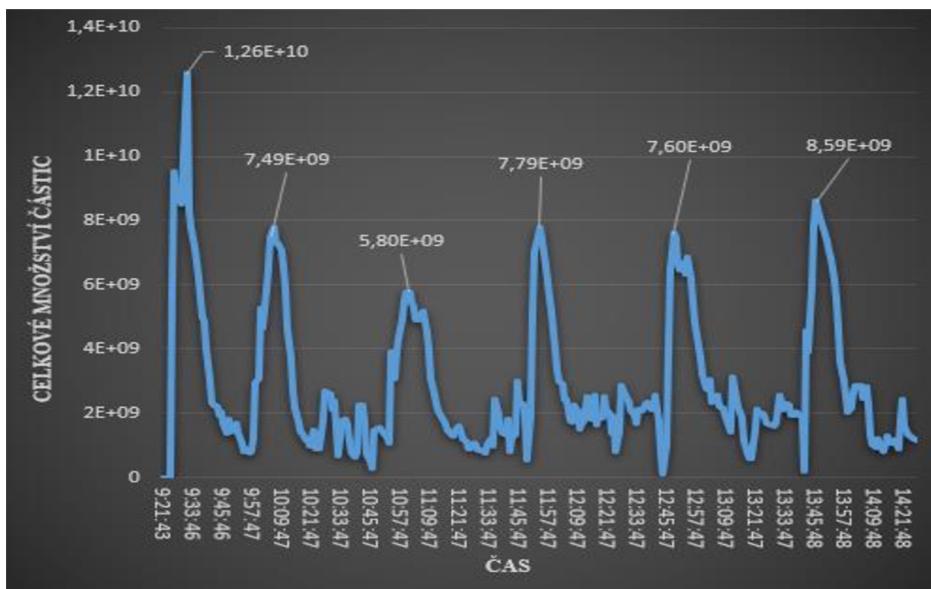
Krátce po pátém, tedy posledním přiložení, kdy se opět zvedl počet nejjemnějších částic ve spektru (17-30 nm) do 2 minut se zvedal i celkový počet částic a spektrum celkového počtu částic pokrylo celou škálu, tedy 17-530 nm, do 4 minut od přiložení. Maximální celkové koncentrace bylo dosaženo zhruba 5 minut po přiložení, přičemž nejpočetnější zastoupení bylo z frakcí částic nejjemnějších, tedy do 23nm a opět dosahovaly tyto částice koncentrace 10^8 , dále bylo výrazně vyšší zastoupení částic ze spektra 100-250 nm, kde jednotlivé frakce dosahovaly koncentrací v rozmezí $3-4 \cdot 10^7$ částic. Celkové množství částic, a i spektrum nejpočetnějších frakcí opadlo po 18 minutách od přiložení. Poté se zdálo že se 2-3 minuty produkuje výrazně málo částic. Dá se předpokládat, že dohořivala vrchní vrstva paliva a že prchavá hořlavina i uhlík byly v daném čase ve výrazně malém množství, co se týče stavu hoření. Vzápětí, po těchto klidných 3 minutách se opět výrazně zvedla koncentrace nejjemnějších frakcí (17-33 nm), a to opět až ke koncentraci 10^8 částic na frakci. Co se týče celkového počtu, tak pik klesal a v 29. až 37. minutě se celkový počet částic dostal na výrazně nízkou hodnotu. To je oblast mezi minutami 290 a 298, tedy se jedná o výrazný pokles nejjemnějších frakcí částic a malinké zvětšení spektra nejpočetnějších částic až do 250nm. Dalo by se předpokládat, že se v tuto dobu opět snížilo výrazně množství hořlaviny, která hořela (oxidovala) v rámci daného stavu. Také je dobré si uvědomit, že i samotná tlaková diference byla nízká, tedy nebyl vyšší odvod spalin kouřovodem



Obrázek 46 5.přiložení

ven a teploty na termočláncích padaly celkem rychle dolů. Celkově se zdálo, že už bude celkový počet částic klesat a frakce částic s největší koncentrací se budou nacházet ve spektru 17-35 nm a taky že budou postupně mizet. Po malé prodlevě ale přišel opět nárůst koncentrací nejjemnějších částic (nanočástic ve spektru 17-25 nm) a opět se jejich koncentrace dostala až k hodnotě 10^8 částic na frakci. Tato koncentrace se už držela, mimo malý pík, až do konce měření.

V Rámci malého shrnutí by se dalo říct, že celkové množství vzniklých částic roste ihned po zápalu i po každém přiložení a po 5 až 6 minutách se dostane do svého maxima. Na tomto maximálním počtu částic se ale podílí celá škála částic nejen ty nejjemnější, kterých po každém přiložení, a i po zápalu vzniká velké množství v rámci nejčastějšího spektra (17-50 nanometrů). Škála, a i celkový počet vzniklých částic upadá téměř automaticky po 16-17 minutách po přiložení (i po zápalu) na minimum. Poté už se množství drží v minimech a dle rozpadu polen a tlaku sem tam vyskočí nějaký pík počtu částic nahoru anebo klesne dolů. Nejjemnější částice se však skoro pořád uvolňují, a to ve velmi velkém počtu až k 10^8 částic. To že se po zápalu uvolňuje rychle (v rámci pár minut) tolik částic a jejich spektrum pokrývá celou škálu kterou měříme je dáno tím, že se na začátku rychle začnou uvolňovat všechny možné látky, a hlavně prchavá hořlavina a voda ve formě páry. Pára, když kondenzuje tak zvětšuje radikálně průměry částic a prchavá hořlavina zase přispívá k vyšším teplotám tedy většímu tahu, a tedy i hoření, z toho tedy vyplývá, že se přirozeně během prvních pár minut uvolňuje tolik různě velkých částic ať už se stihnou spálit nebo ne, Každá látka má svůj čas, který potřebuje ke shoření a pokud je moc velký tah, tak se nestihne spálit, tak jak by mohla a odchází ve spalinách, ne zcela spálená, pryč. Koncentraci celkového množství vzniklých částic na centimetr krychlový je možné vidět zde na tomto grafu.



Obrázek 47 Celkové množství vzniklých částic v čase

Z výše zmíněných popisů, a následného pohledu na graf výše, je zcela zjevné, že celkové množství vzniklých částic za jednotku času je největší v tzv. uzlu zápal a dosahuje maxima $1,25 \times 10^{10}$ částic, a to 7 minut po zápalu. Problémem je, že toto množství je jen část toho, co opravdu vzniká, protože se jedná o množství částic, které přístroj na detekci a sčítání nasává. Aby se spočítalo skutečné množství částic, musel by být znám průtok celým

kouřovodem. Nyní je možné se i podívat na celkové množství vzniklých částic v rámci každého uzlu.

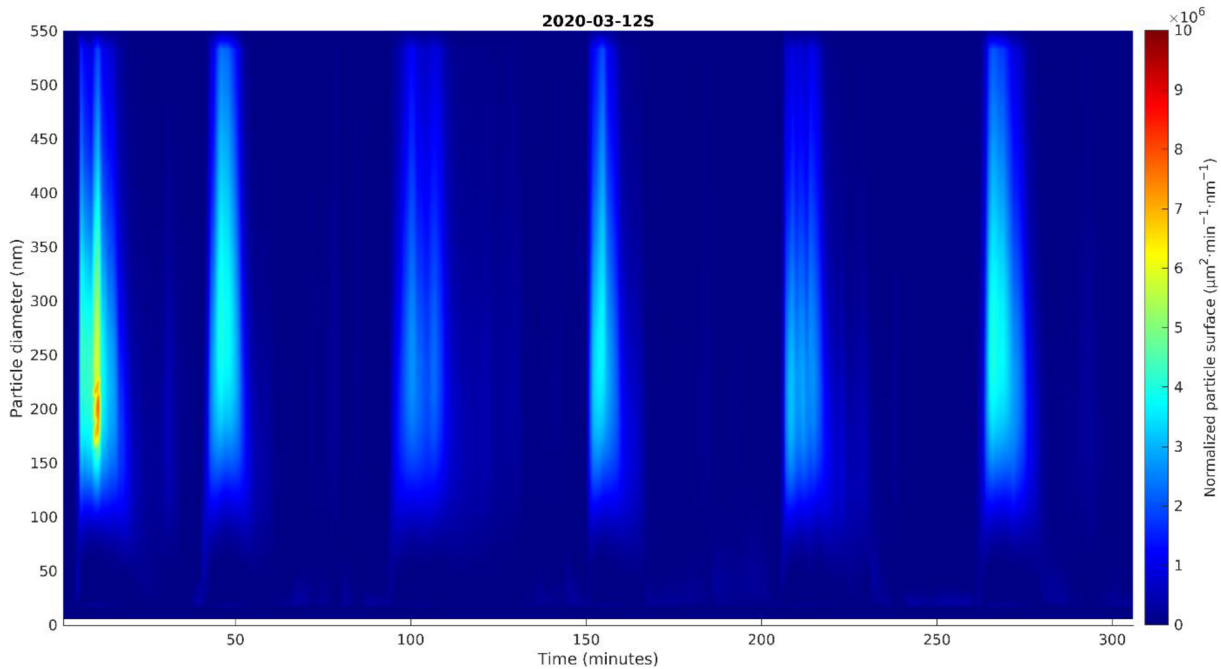
Tabulka 14 Celkové množství částic

Celkové množství vzniklých částí v jednotlivých uzlech						
uzel	zápal	první přiložení	druhé přiložení	třetí přiložení stabilní měření	čtvrté přiložení stabilní měření	páté přiložení stabilní měření
časové pásmo	9:23:46- 9:59:47	10:00:47- 10:53:47	10:54:47- 11:50:47	11:51:47- 12:44:47	12:45:47- 13:41:47	13:42:47- 14:26:48
celkový počet částic	$1,483 \times 10^{11}$	$1,424 \times 10^{11}$	$1,389 \times 10^{11}$	$1,522 \times 10^{11}$	$1,664 \times 10^{11}$	$1,482 \times 10^{11}$

Jak je možno vidět, tak ač je časové pásmo zápalu kratší o cca 15-20 minut tak i přesto, vznikne během tohoto uzlu obrovské množství částic dosahujícího hodnoty $1,483 \times 10^{11}$. Důležité je zmínit, že měřicí přístroj ukládal celkové hodnoty vždy za celou naměřenou minutu, a tak není možné přesněji vyhodnotit množství částic jinak než přiblížením se k času, kdy se zapalovalo nebo kdy se přikládalo. Dále je taky vidět, že každý uzel netrval stejný počet minut, a i to může ve výsledku být důvod proč by bylo dobré tento experiment provést vícekrát a za různých podmínek a se stejným intervalem přiložení a na gram stejným množstvím dřeva.

Rozbor povrchu částic

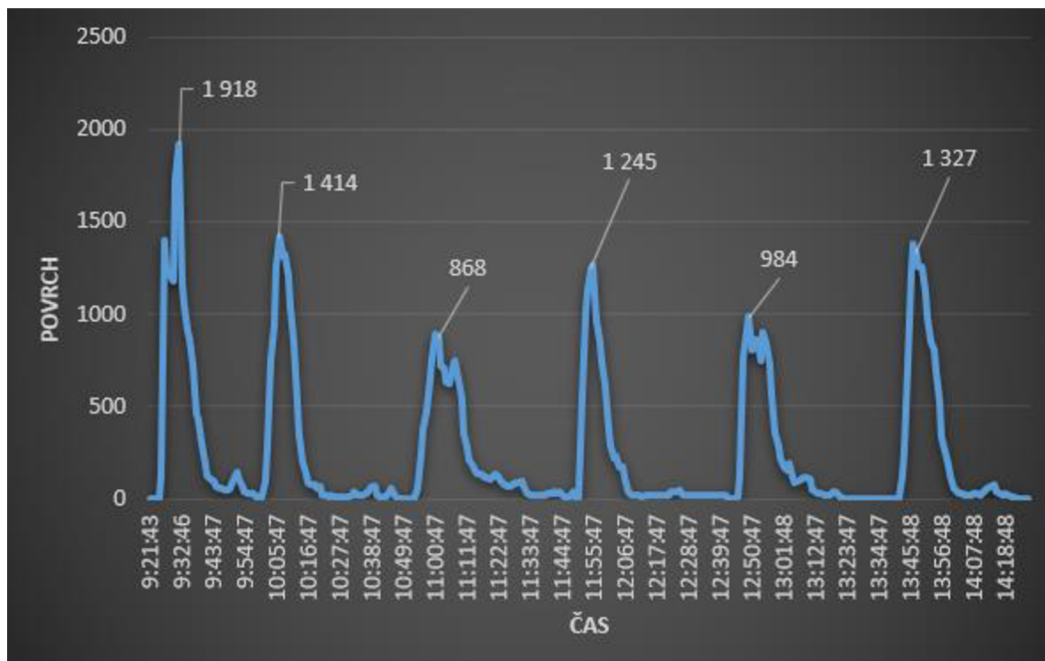
Protože u částic dochází k tzv. navázání škodlivých látek na povrch a částic nejjemnějších vzniká v poměru ku větším mnohonásobně více, je důležité zkoumat i jejich povrch, a tedy na jak velkou plochu se celkově můžou např. těžké kovy nebo jiné karcinogenní látky zachytit. Je nutné pak brát v potaz, že velký povrch vzniklých částic může přenést velké množství nežádoucích a velmi nebezpečných látek do těla člověka skrze plíce, přesněji skrze plicní sklípky.



Obrázek 48 Povrch částic různých frakcí vzniklých v čase

Na tomto grafu si lze všimnout, jak velký povrch zaujímají částice frakcí v čase, přičemž levá osa znázorňuje průměr částic v nanometrech, spodní osa čas v minutách (každá minuta=povrch všech částic, které za minutu vznikly) a pravá osa ukazuje, barevně, povrch částic v mikrometrech čtverečních za minutu. Velmi krásně lze vyčíst, že největší celkový povrch všech částic byl vždy v rozmezí od přiložení po cca 17. minutu hoření, přičemž maxima bylo dosaženo mezi 5. a 7. minutou, a pak tento celkový povrch částic klesá razantně dolů.

Na dalším grafu lze pozorovat závislost součtu povrchů všech vzniklých částic na čase. Lépe se tak dá sledovat průběh a vytyčit maxima, kterých v každém uzlu bylo dosaženo.



Obrázek 49 Proměna celkového povrchu částic v čase [mm^2/min]

Na tomto grafu je možné sledovat, jak se mění celkový povrch všech vzniklých částic v čase, a i když je uzel „zápal“ nejkratší a částic v něm vznikne srovnatelně jako v ostatních uzlech, tak výrazně přesahuje ostatní uzly, co se týče do maxima, a to až o 500 mm². Pro další porovnání se lze podívat do tabulky, kde jsou celkové povrchy částic sečteny v rámci, již výše zmíněných uzlů.

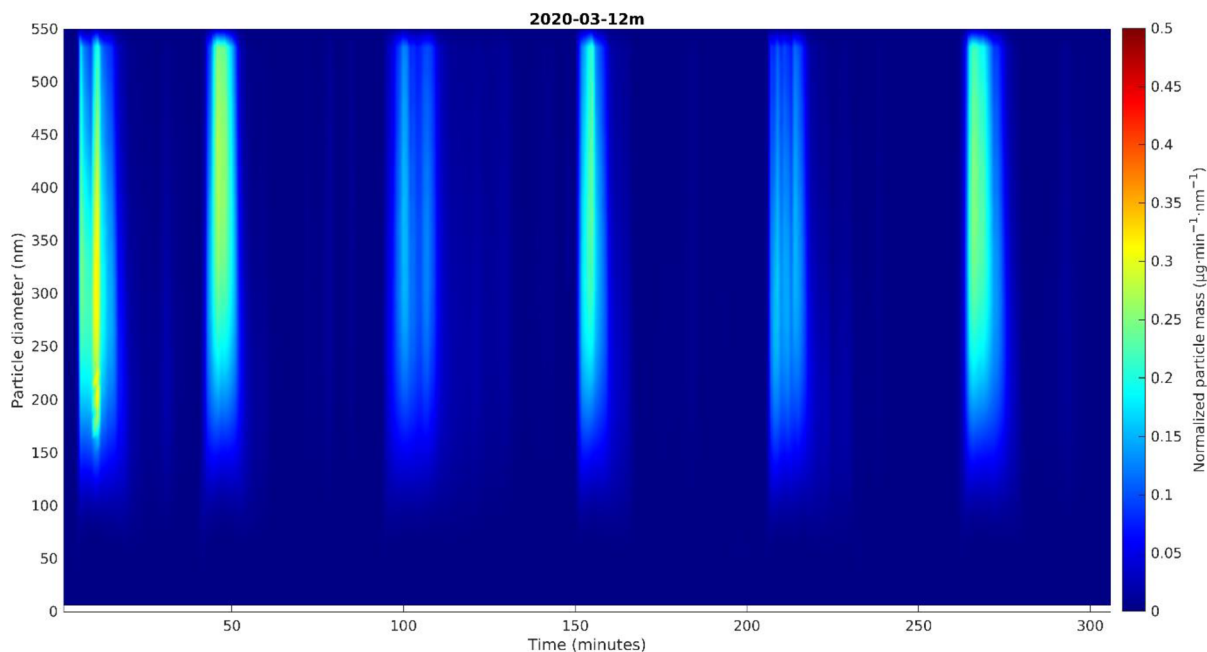
Tabulka 15 Celkový povrch částic

Celkový povrch vzniklých částic v jednotlivých uzlech						
<i>uzel</i>	<i>zápal</i>	<i>první přiložení</i>	<i>druhé přiložení</i>	<i>třetí přiložení stabilní měření</i>	<i>čtvrté přiložení stabilní měření</i>	<i>Páté přiložení stabilní měření</i>
<i>časové pásmo</i>	9:23:46- 9:59:47	10:00:47- 10:53:47	10:54:47- 11:50:47	11:51:47- 12:44:47	12:45:47- 13:41:47	13:42:47- 14:26:48
<i>celkový povrch částic[mm²]</i>	16151	12806	12901	10772	11686	14204

V této tabulce je možné vidět, v rámci celkového povrchu všech vzniklých částic, jak velký povrch by zaujímal součet všech povrchů částic jednotlivých uzlů. Je možné si všimnout, že v uzlu zápal zaujímal celkový povrch všech částic v součtu 16151mm², což je asi o 3350mm² více než během prvního a druhého přiložení a o 5400mm² více než při třetím přiložení. Výrazně více pak celkový povrch narostl v posledním uzlu při posledním přiložení, což je překvapivé, protože v tomto uzlu bylo měřeno o cca. 10 minut kratší dobu než v ostatních uzlech, mimo uzel zápal.

Rozbor hmotnosti částic

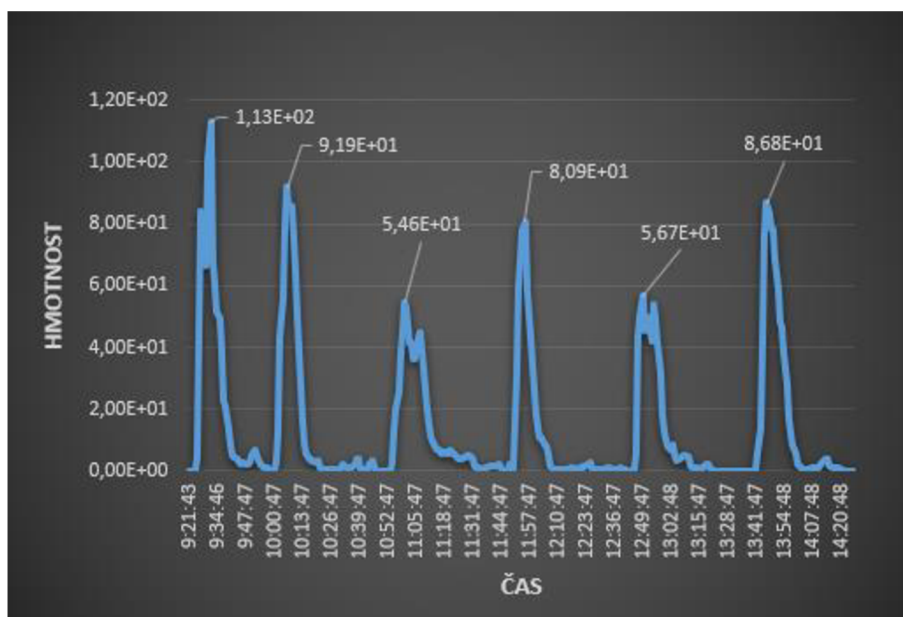
Hmotnost, obecně známá vlastnost objektů, je někdy velmi komplikovaná veličina. Co se týče detekovaných nejjemnějších částic z jakéhokoliv spalování, tak to platí dvojnásob. Z krbových kamen proudí ve spalinách mnoho částic a každá je jiné velikosti, dalo by se říct i malinko rozdílné hustoty. Hmotnost, jak už se učí na základní škole, je rovna součinu hustoty a objemu, a objem je v podstatě, co se týče částic, zvláště pak těch nejmenších, velmi náročný na výpočet, proto se uvažuje kulovitý tvar každé částice. Hmotnost je ve své podstatě tíhový ukazatel, a tedy čím je částice hmotnější tím se lépe odlučuje. Hustota v tomto případě byla stanovená na základě jistých předpokladů, které mi nebyly řečeny na 1200 kg/m³.



Obrázek 50 Hmotnost částic různých frakcí vzniklých v čase

Na tomto grafu si lze všimnout hmotnostního rozložení frakcí částic v čase, přičemž levá osa znázorňuje průměr částic v nanometrech, spodní osa čas v minutách (každá minuta=hmotnost všech částic, které za minutu vznikly) a pravá osa ukazuje, barevně, hmotnost částic v mikrogramech. Lze z grafu velmi jasně vyčíst, jak se celková hmotnost frakcí částic v časovém rozmezí 5-18 minut po zapálení a každém přiložení, rapidně zvýšil a pak opět vždy klesne na nízké hodnoty. Maxima bylo dosaženo cyklicky mezi 5. a 7. minutou po přikládání.

Na dalším grafu lze pozorovat závislost součtu hmotnosti všech vzniklých částic na čase. Lépe se tak dá sledovat průběh a vytyčit maxima, kterých v každém uzlu bylo dosaženo.



Obrázek 51 Celková hmotnost částic v závislosti na čase [$\mu\text{g}/\text{min}$]

Z výše zobrazeného grafu lze vyčíst, jak se pohybovala celková hmotnost vzniklých částic v závislosti na čase. Opět je možné vidět, že v uzlu „zápal“ dosahovala celková hmotnost

ve svém maximu počtu částic $1,13 \times 10^2 \mu\text{g}$, což je od $2,1 \times 10^1 \mu\text{g}$ po $5,84 \times 10^1 \mu\text{g}$ více v porovnání s ostatními uzly a jejich maximálními píky. Hmotnost je na ose Y udávána v mikrogramech a pokud bychom měli převést hodnoty na gramy tak všechny hodnoty vydělíme hodnotou 10^6 . Celková hmotnost v rámci uzlů ukáže více.

Tabulka 16 Celková hmotnost částic

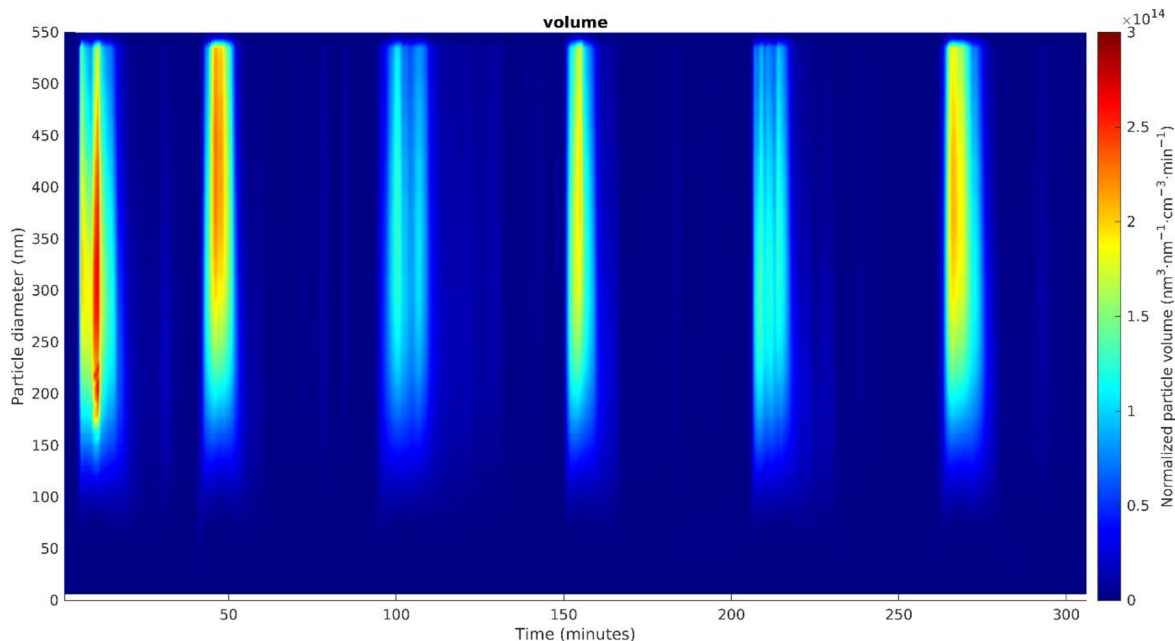
Celková hmotnost vzniklých částic v jednotlivých uzlech						
uzel	zápal	první přiložení	druhé přiložení	třetí přiložení stabilní měření	čtvrté přiložení stabilní měření	páté přiložení stabilní měření
časové pásmo	9:23:46- 9:59:47	10:00:47- 10:53:47	10:54:47- 11:50:47	11:51:47- 12:44:47	12:45:47- 13:41:47	13:42:47- 14:26:48
celková hmotnost částic [μg]	$8,98 \times 10^2$	$7,61 \times 10^2$	$7,33 \times 10^2$	$6,11 \times 10^2$	$6,30 \times 10^2$	$8,29 \times 10^2$

Díky této srovnávací tabulce v rámci celkové hmotnosti částic v každém uzlu se dá říct, že opravdu největší celkové hmotnosti dosahují částice v rámci uzlu „zápal“ a to $8,98 \times 10^2 \mu\text{g}$ potom postupně klesá celková hmotnost částic na hodnotu $6,11 \times 10^2 \mu\text{g}$ a v posledním uzlu „páté přiložení“ opět celková hmotnost vzrostla k hodnotě $8,29 \times 10^2 \mu\text{g}$.

Když se tedy sečte celková hmotnost všech vyprodukovaných částic všech uzlů dohromady, tak vyjde celková hmotnost 4,46mg částic, které byly detekovány. Celkově se spotřebovalo 13 kilogramů smrkového dřeva. Kdyby tedy byly zváženy všechny částice v popelníku, tedy popel, který neulétl, a pak se tato hmotnost odečetla od spáleného dřeva, došli bychom k hmotnosti částic, které ulétly a nebyly detekovány. Tedy by se zpětně dalo aspoň teoreticky spočítat kolik částic skutečně vzniklo. Nesměl by se ale uvažovat plyn, voda a další látky, které nejsou pevného skupenství.

Rozbor objemu částic

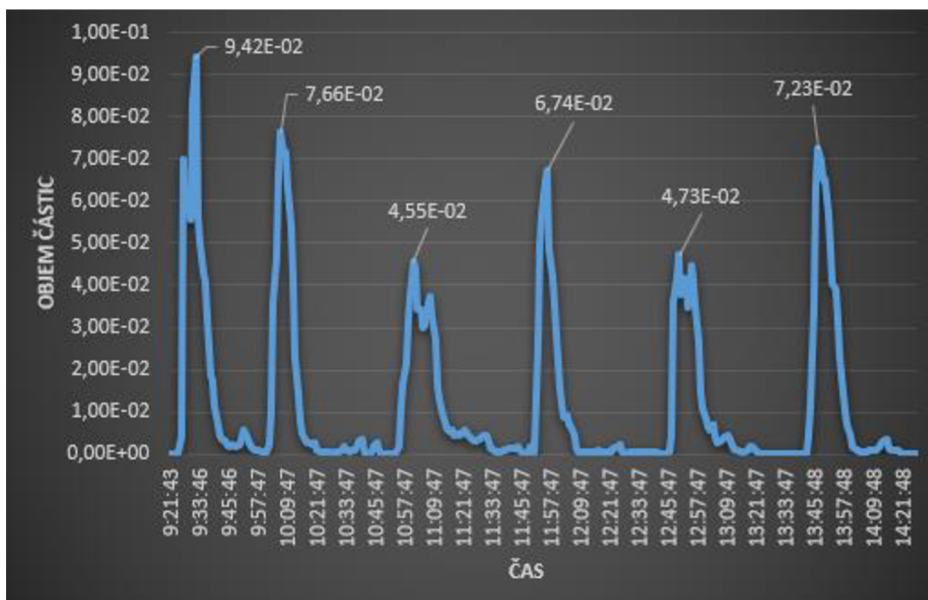
Méně významný, avšak též zajímavý parametr vzniklých částic je objem. Vezme-li se tedy v úvahu, že se počítá s částicemi kulovitého tvaru, tak se velmi snadno dokáže i tento parametr spočítat. Objem a jeho změny v čase pro jednotlivé frakce je možné vidět na následujícím grafu.



Obrázek 52 Objem částic různých frakcí vzniklých v čase

Na tomto grafu si lze všimnout objemového rozložení frakcí částic v čase, přičemž levá osa znázorňuje průměr částic v nanometrech na škále od 0 do 550 nm, spodní osa čas v minutách (každá minuta=objem všech částic, které za minutu vznikly) a pravá osa ukazuje, barevně, objem částic v nanometrech krychlových za minutu. Lze si velmi jasně všimnout, jak se celkový objem frakcí částic v časovém rozmezí 5-18 minut po zapálení a každém přiložení, rapidně zvýšil a pak opět vždy klesl na nízké hodnoty. Maxima bylo dosaženo cyklicky mezi 5. a 7. minutou po přikládání.

Na dalším grafu lze pozorovat závislost součtu objemů všech vzniklých částic na čase. Lépe se tak dá sledovat průběh a vytyčit maxima, kterých v každém uzlu bylo dosaženo.



Obrázek 53 Celkový objem částic v závislosti na čase [mm³/min]

Už z výše zmíněných rozborů dat částic lze logicky vydedukovat, že největší pík objemu částic nasávaného vzorku bude v uzlu zápal, kde dosahuje maxima 0,094mm³ částic. Z grafu lze pozorovat, jak se skokově mění celkový objem vzniklých částic. Největšího objemu

dosahuje celkový objem částic vždy krátce po přiložení. Píky maxim jednotlivých uzlů časově odpovídají maximům celkových povrchů částic, celkovým hmotnostem, a také celkovým množství vzniklých částic. Více si lze třeba představit u již známého rozdělení do jednotlivých uzlů, v rámci, kterých jsou všechny objemy sečteny.

Tabulka 17 Celkový objem částic

Celkový objem vzniklých částic v jednotlivých uzlech						
uzel	<i>zápal</i>	<i>první přiložení</i>	<i>druhé přiložení</i>	<i>třetí přiložení stabilní měření</i>	<i>čtvrté přiložení stabilní měření</i>	<i>páté přiložení stabilní měření</i>
časové pásmo	9:23:46- 9:59:47	10:00:47- 10:53:47	10:54:47- 11:50:47	11:51:47- 12:44:47	12:45:47- 13:41:47	13:42:47- 14:26:48
celkový objem částic [mm ³]	$7,48 \times 10^{-1}$	$6,34 \times 10^{-1}$	$6,11 \times 10^{-1}$	$5,09 \times 10^{-1}$	$5,25 \times 10^{-1}$	$6,91 \times 10^{-1}$

Z tabulky je možné názorně vyčíst, že celkový objem částic je největší stále v prvním uzlu, tedy od zápalu po první přiložení a dosahuje celkového objemu $7,48 \times 10^{-1}$ mm³. Znovu je vidět, jak celkový objem vzniklých částic klesá až k hodnotám $5,09 \times 10^{-1}$ mm³. A jako v předchozím vyhodnocení hmotnosti a povrchu naroste v posledním uzlu, tedy v pátém přiložení. Je otázkou, co se během posledního přiložení stalo, protože se dalo čekat, že právě čím déle měříme tím se vše postupně zmenší a ustálí píky. Je dost možné, že se při posledním přiložení polínka rozpadala jinak, a také hořlavina s dalšími plyny se uvolňovaly trochu jinak. Je dobré dodat že v posledním přiložení bylo přiloženo nejméně dřeva a taky se měřilo kratší dobu oproti 1, 2, 3 a 4. přiložení.

Všechny výsledky byly v rámci jednotlivých rozborů částic shrnuty do jedné tabulky, a tu lze najít zde:

Tabulka 18 Shrnutí výsledků

Shrnutí výsledků měření částic						
uzel	<i>zápal</i>	<i>první přiložení</i>	<i>druhé přiložení</i>	<i>třetí přiložení stabilní měření</i>	<i>čtvrté přiložení stabilní měření</i>	<i>páté přiložení stabilní měření</i>
časové pásmo	9:23:46- 9:59:47	10:00:47- 10:53:47	10:54:47- 11:50:47	11:51:47- 12:44:47	12:45:47- 13:41:47	13:42:47- 14:26:48
Doba měření (min)	37	54	57	58	57	45
celkový počet částic	$1,483 \times 10^{11}$	$1,424 \times 10^{11}$	$1,389 \times 10^{11}$	$1,522 \times 10^{11}$	$1,664 \times 10^{11}$	$1,482 \times 10^{11}$
celková hmotnost částic [μg]	$8,98 \times 10^2$	$7,61 \times 10^2$	$7,33 \times 10^2$	$6,11 \times 10^2$	$6,30 \times 10^2$	$8,29 \times 10^2$

celkový objem částic [mm ³]	$7,48 \times 10^{-1}$	$6,34 \times 10^{-1}$	$6,11 \times 10^{-1}$	$5,09 \times 10^{-1}$	$5,25 \times 10^{-1}$	$6,91 \times 10^{-1}$
celkový povrch částic [mm ²]	16151	12806	12901	10772	11686	14204

Ve výše znázorněné tabulce lze porovnat výsledky všech parametrů částic, které se zkoumaly. Výsledky jsou rozděleny do 6 uzlů v rámci kterých byl proveden součet.

V prvním uzlu, označovaném zápal, který trval 37 minut, bylo naměřeno celkové množství $1,483 \times 10^{11}$ částic. Tyto částice vážily v součtu 0,9mg a měli objem 0,75 mm³, pozoruhodné však je, že zaujímaly plochu 16151 mm². Uzel zápal je specifický svým průběhem, protože nejen teploty ale i tlak je kolísavější, oproti dalším uzlům. Částic v tomto uzlu vzniklo nejvíce, a to i přes nejkratší dobu tohoto uzlu. První přiložení, o délce 54 minut, bylo překvapivě ekologičtější. Během prvního přiložení vzniklo $1,424 \times 10^{11}$ částic, které vážily 0,76mg a zaujímaly objem 0,63 mm³. Překvapením bylo, že povrch byl už výrazně menší, a to o celých 3350 mm², ještě se však nejednalo o měření stabilní (měření s ustálenými podmínkami). Druhé přiložení, během kterého vzniklo za 57 minut celkově $1,389 \times 10^{11}$ částic, se už blížilo stabilním podmínkám, krbová kamna byla už téměř vyhřátá, a i žhavé podloží bylo skoro dostačující, pro přiblížení běžnému přikládání či topení v domácnostech. Vzniklé částice během tohoto uzlu vážily 0,73mg o celkovém objemu 0,61 mm³ a celkovém povrchu 12901 mm². Je opět překvapivé, jak veliký je povrch při, tak malém objemu tolika částic. Při třetím přiložení už byly dle norem stabilní podmínky, za kterých vzniklo během 58 minut $1,522 \times 10^{11}$ částic o celkové hmotnosti 0,61mg, objemu 0,51mm³ a povrchu 10772 mm². Zde je možné si všimnout, jak narůstá výrazně množství částic a dá se předpokládat, že je to hlavně způsobené jistým dohoříváním hořlaviny z předchozích přiložení ve žhavém, lehce hořícím zbytku. Během čtvrtého přiložení, tedy 57 minut vzniklo $1,664 \times 10^{11}$ částic, což je nejvíce ze všech předchozích uzlů. Vzniklé částice vážily 0,63mg, zaujímaly 0,525 mm³ a měli celkový povrch 11686 mm². Co se týče objemu, hmotnosti a povrchu, tak s předchozím uzlem patří hodnoty k nejmenším, a přesto mají tyto 2 uzly vysoký celkový počet částic, to jen podtrhuje, že se jedná hlavně o jemnější frakce (nanočástice), které početně násobně převyšovaly ty hrubší (50nm a výše). Při pátém přiložení, tedy posledním, které se měřilo, vzniklo za 45 minut $1,482 \times 10^{11}$ částic což je v přepočtu na jednu minutu průměrně o 400 milionů více než při čtvrtém přiložení. Částice o tomto počtu vážily celkově 0,83mg a zaujímaly objem 0,69 mm³ o celkovém povrchu 14204 mm². Celkově se výsledky pátého měření blížily výsledkům zápalu, který je nejspecifičtější uzlem, neboť má výrazně jiné podmínky: teplota, tah, žádné žhavé podloží atd. U všech uzlů je nejdůležitější počet vzniklých částic a pak jejich celkový povrch. Co se týče počtu, tak v každém uzlu se pohybuje maximum mezi 5. a 7. minutou od přiložení (i zápalu), proto by bylo dobré se zaměřit hlavně na tuto dobu hoření a regulovat výrazně množství vzduchu a tlakovou diferenci. Výsledky odpovídají pouze měřenému vzorku, který byl stabilně nasáván. Objemový průtok nasávání spalín byl izokinetický o hodnotě 0,3 litru za minutu a vyhodnocen metodou SMPS. Dobré je podotknout, že nejen v impaktoru dochází ke zkreslení výsledku (chyba měření), protože se v něm odloučí částice větší než 10 mikrometrů ale samotným odebráním části vzorku. Tedy i kdyby se vynásobily výsledky poměrem průměru kouřovodu ku průměru trubky v oblasti nasávání vzorku k vyhodnocení, tak by vše nemohlo odpovídat reálným hodnotám s jistou chybou. Dalším důležitým faktorem je rychlostní profil spalín a neizokinetické proudění spalín. Proto nelze přesně nyní říct s jakou chybou jsou výsledky podobné reálnému stavu.

7 ZÁVĚR

Vzhledem k vysokému výskytu a škodlivosti jemných částic v ovzduší dochází k čím dál častějším situacím, kdy se v obytných oblastech nedá skoro dýchat. Dýchacích problémů v dnešní populaci celosvětově přibývá, a proto je více než nutné se zabírat tuhými znečišťujícími látkami, jejich vznikem a zánikem. Zákony týkající se omezení vzniku částic a obzvláště těch nejjemnějších jsou v rámci časového výhledu nepostradatelné, a proto probíhá, nejen na fakultách vysokých škol, řada výzkumů.

Tato Diplomová práce se týkala nejprve obecného seznámení s částicemi v ovzduší a následně experimentálního měření jemných částic, v tomto případě nanočástic až submikronových částic, na měřené škále (17,5nm – 532,8nm),

Částice jsou všeobecně velmi silným znečišťovatelem našeho ovzduší a vznikají při mnoha procesech a ve třech fázích: nukleace, kondenzace a koagulace. Příroda sama dokáže být jak zdrojem částic, tak i čistícím prostředkem ovzduší, a člověk by se jí měl inspirovat. Vzniklé částice se detekují i odlučují mnoha způsoby a technologie zachycování a odloučení částic jdou v průběhu let dopředu. Zákon 201/2012 je zastaralý, a navíc zaměřen hlavně na částice o průměrech 2,5 mikrometrů a výše. Problém je, že právě menších částic vzniká mnohem více a dostávají se přes plicní sklípky až do krevního oběhu, kam přivádí na sebe navázané zdraví škodlivé látky.

Zdroje částic jsou stacionární a mobilní. Nejdůležitější část stacionárních zdrojů, kterou se práce zabývá je biomasa. Biomasa se dělí, dle struktury a obsahu, na mnoho druhů od biopaliva, po splašky a jiné odpady obsahující hořlavé složky. Tato práce pojednává o spalování smrkového dřeva a částicích, které při tomto procesu vznikají. Smrkové dřevo se spalovalo v krbových kamnech značky Grönland typu 4673-6.

Měření jemných částic probíhalo v laboratorních podmínkách na VUT v Brně a měřilo se celkově okolo 300 minut metodou SMPS. Měření bylo rozděleno do 6 tzv. uzlů (uzlových oblastí), v rámci kterých bylo vše vyhodnoceno a okomentováno. Měřila se teplota ve stěžejních bodech krbových kamen, diference tlaku, a hlavně parametry částic, jako jsou: množství částic, celkový povrch částic, celkový objem částic a celková hmotnost částic. Vše bylo vztaženo na jednotku času. Jednotlivé teploty byly závislé na intenzitě spalování a nejvyšších hodnot dosahovaly vždy mezi 6. a 7. minutou po přiložení. Překvapivé bylo, že v rámci každého uzlu měření, tedy od přiložení (okolo 2kg dřeva) do přiložení (+50 minut) vždy v součtu vzniklo obrovské množství částic (cca $1,4 \times 10^{11}$ - $1,5 \times 10^{11}$), avšak jejich hmotnost byla v řádu mikrogramů. I objem částic v rámci jednoho uzlu čítal v součtu pouze okolo 1 mm³. Takto malý objem složený ze všech frakcí částic během 50 minut vždy dával v součtu povrch okolo 1,5 dm², což je celkem významné množství, na tak malou hmotnost a malý objem. V porovnání s teorií lze říci, že člověk denně vdechne o dva řády méně částic, než jich vznikne spálením 2 kg smrkového dřeva za 50 minut.

Nejvíce částic vznikalo kolem šesti minuty po zápalu i přiloženích a zaujímaly celou škálu, která byla měřena. Celkově se z měření dá konstatovat, že ač vzniká velké množství částic o výsledném malém objemu a malé hmotnosti, tak se díky svému velkému celkovému povrchu, stávají velice nebezpečné, protože právě na povrchu částic jsou zachytávány škodlivé látky. Čím je tedy větší povrch, tím více látek se může navázat a následně přenést do krevního řečiště těla.

Dle výsledků vzniká výrazně větší množství částic právě při zápalu, a proto bych doporučoval nenechávat vyhasnout topeniště tak často, a spíše dbát o pravidelnost přikládání.

Vzhledem k tomu, že spalování paliva je velmi úzce spojené s množstvím přivedeného vzduchu do ohniště a pak i následně s tahem komína, tak by bylo dobré zkoumat dále proces spalování dřeva za jiných podmínek. Dalo by se předpokládat, že při větší intenzitě spalování,

bude docházet ke kvalitnějšímu hoření paliva, a tedy bude vznikat celkově méně částic. Zároveň by mohlo být i samotné spalování celkově ekologičtější. Navrhuji další zkoumání i hledání dalších možností, jak ekologičtěji spalovat, případně potvrdit výzkumem, že je lepší proces spalování zautomatizovat. Možností se nabízí mnoho, např. zkusit topit po menších dávkách s menšími poleny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZEMEPIS.COM: VZDUCH A ATMOSFÉRA [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <http://www.zemepis.com/vzduch.php>
- [2] HUGHES, James. *Velká obrazová všeobecná encyklopedie*. [s.l.]: Svojtka & Co., 1999. ISBN 80-7237-256-4. Kapitola Lidské tělo-dýchací systém, s. 159
- [3] AWASHOP: plíce [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.awashop.cz/plice-c14445/>
- [4] Česká televize: zpravodajství-věda [online]. 2019 [cit. 2020-1-20]. Dostupné z: <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2896547-spatne-ovzdusi-skodi-plicim-stejne-jako-krabicka-cigaret-denne-spocitali-vedci>
- [5] World Health Organization: Newsroom [online]. 2018 [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.who.int/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- [6] Anamneza [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z: <https://www.anamneza.cz/Statistiky-koureni/clanek/78>
- [7] PMI [online]. [cit. 2020-01-21]. Dostupné z <https://www.pmi.com/markets/czech-republic/cs/about-us/overview#>.
- [8] Mzp: kvalita ovzduší [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/kvalita_ovzdusi#smogova_situace
- [9] Portalzp.praha.eu: ovzduší [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: http://portalzp.praha.eu/jnp/cz/ovzdusi/o_smogu/druhy_smogu/index.xhtmll
- [10] Hluk.eps: emise [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/mereni-emisi-a-imisi/>
- [11] Ctidoma: zpravodajství-zdraví [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.ctidoma.cz/zpravodajstvi-zdravi/2017-05-03-kysely-dest-nici-lesy-zabiji-ryby-prinasi-take-alzheimerovu-chorobu>
- [12] Ekopolis: kyselý déšť [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <http://www.ekopolis.cz/ekowiki/ud%C3%A1losti/%C4%8Derven%C3%A9-ud%C3%A1losti/kysel%C3%BD-d%C3%A9%C5%A1%C5%A5.aspx>
- [13] Cez [online]. [cit. 2020-02-06]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/20-let-odsireni-emise-popilku-a-oxidu-siriciteho-klesly-u-elektroren-cez-o-vice-nez-90-procent.-nerychlejsi-ekologizace-v-evrope-stala-111-miliard-korun-43612>
- [14] Arnika: chemické látky [online]. [cit. 2020-2-06]. Dostupné z: <https://arnika.org/polycyklicke-aromaticke-uhlovodiky-pahs>
- [15] Aktuálně.cz: domácí [online]. [cit. 2020-1-020]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/domaci/prizemni-ozon-zabiji-loni-ohrozoval-85-procent-cechu/r~i:article:619489/>
- [16] Arnika: chemické látky [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxid-uhelnaty>
- [17] Dotací.info [online]. [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.dotacni.info/glossary/tzl-tuhe-znecistujici-latky/>
- [18] Čisténebe: stav ovzduší [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <http://www.cistenebe.cz/stav-ovzdusi-na-ostravsku/slovnicek-pojmu/146-tuhe-znecistujici-latky-tzl>
- [19] SBORNÍK XX. VÝROČNÍ KONFERENCE ČESKÉ AEROSOLOVÉ SPOLEČNOSTI [online]. 30.10-1.11.2019. Velké Bílovice, 2019 [cit. 2020-02-14]. ISBN 978-80-270-6416-8. Dostupné z: http://cas.icpf.cas.cz/download/Sbornik_VKCAS_2019.pdf

- [20] *Encyklopedie fyziky: vypařování a kapalnění* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/652-vyparovani-a-kapalneni>
- [21] *Is.cuni: repozitář závěrečných prací* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/70732>
- [22] *SlidePlayer: Ultrajemné částice a zdraví v Erzgebirgskreis a Ústeckém kraji* [online]. [cit. 2020-03-01]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1905342/>
- [23] *Skola-auto* [online]. 2020 [cit. 2020-03-10]. Dostupné z: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2020/03/Smesovaci_pomer_a_emise.pdf
- [24] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. *Ochrana ovzduší*. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [25] *MĚSTO NOVÝ JIČÍN: Odbory a úseky* [online]. [cit. 2020-03-04]. Dostupné z: <https://www.novyjicin.cz/co-jsou-to-castice-pm10-a-proc-se-vubec-meri/>
- [26] <http://www.ovzdusi-brno-jm.cz/:prach> [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.ovzdusi-brno-jm.cz/index.php/2017/07/20/co-je-to-za-prach-to-pm10-a-pm25/>
- [27] , C. TERZANO, F. DI STEFANO, V. CONTI, E. GRAZIANI, A. PETROIANNI. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences: Air pollution ultrafine particles: toxicity beyond the lung* [online], 13 [cit. 2020-03-14]. DOI: 2010; 14: 809-821. Dostupné z: <http://www.europeanreview.org/wp/wp-content/uploads/824.pdf>
- [28] *TEILCH: The Air You Breathe* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.teilch.com/the-air-you-breathe/>
- [29] *Circulation: Ahajournals* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.ahajournals.org/doi/full/10.1161/01.cir.0000128587.30041.c8>
- [30] STRNAD, O. *Emise tuhých znečišťujících látek*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 70 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [31] *Ústav energetiky: Technologie čištění spalin po spalování odpadů* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://energetika.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/06/ELO-pr8.pdf>
- [32] *Ekomonitor: technologie ke snižování emisí* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/2_tzl_filtrace_fin_oplzz_0.pdf
- [33] Cebak, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Praha: ČVUT, 2014.
- [34] *MARtechnology* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.martechology.eu/>
- [35] *Tenza: aktivity-energetika* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/zarizeni-pro-cisteni-spalin/mokra-vapencova-vypirka/>
- [36] *Skupina cez* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/02/vypirka_5.html
- [37] SITEK, T. *Ultrajemné částice generované spalovacím procesem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 89 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [38] Zákon č. 201/2012 Sb. ze dne 2. května 2012 o ochraně ovzduší. In: *Sbírka zákonů České republiky*. 2012, částka 69, s. 2786 – 2841. Dostupný také z:

- <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=24325>. ISSN 12111244.
- [39] *Ministerstvo životního prostředí: Protokoly přijaté v rámci Úmluvy CLRTAP* [online]. [cit. 2020-05-14]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/protokoly_clrta
- [40] *Mzp: sdělení odboru ochrany ovzduší* [online]. [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/emisni_faktory_pomery_castic/\\$FILE/OOO-SdeleniEmisniFaktory-20170214.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/emisni_faktory_pomery_castic/$FILE/OOO-SdeleniEmisniFaktory-20170214.pdf)
- [41] *Ústecký kraj* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://www.kr-ustecky.cz/assets/File.ashx?id_org=450018&id_dokumenty=1709509
- [42] *Akoupelnyatopeni.cz* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.akoupelnyatopeni.cz/clanky/jak-vybrat-automaticky-kotel>
- [43] *Wikipedie* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisn%C3%AD_norma_Euro
- [44] *Oficiální stránky města Blatná* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.mesto-blatna.cz/mestsky-urad/odbory-meu/09-odbor-zivotniho-prostredi/ochrana-ovzdusi/kategorie-a-zarazovani-zdroju-znecistovani-ovzdusi/>
- [45] *Skupina čez* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/exhalace.html>
- [46] *Skupina čez* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/vykladovy-slovník-energetiky/hesla/emise_skodl.html
- [47] *ARNIKA* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://arnika.org/spalovny-odpadu>
- [48] *Petroleum.cz: pohonné hmoty pro leteckou dopravu* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyrobky/jet.aspx>
- [49] *Idnes.cz: Technet* [online]. 2007 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/technet/technika/nova-zelena-letadla-maji-snizit-spotrebu-paliv-a-emise.A070717_193451_tec_technika_vse
- [50] *FORUM24: Lifestyle* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.forum24.cz/lifestyle/2018/01/04/kolik-je-na-svete-aut-pres-miliardu-a-pocet-roste/>
- [51] *AUTO.CZ* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/cesi-rocne-ujedou-deset-az-dvacet-tisic-kilometru-77823>
- [52] *Svetmobilne: články* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.svetmobilne.cz/vyvoj-spotreby-aut-aneb-jak-moc-nam-vyrobcilzou/6794>
- [53] *Obnovitelne.cz: Zaostřeno* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.obnovitelne.cz/cz/clanek/784/velke-nakladni-lode-versus-auta-kdo-skodi-planete-vic/>
- [54] MALIŠ, J. *Metody snižování emisí oxidu uhličitého*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [55] *Tzbinfo: obnovitelná energie* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/biomasa/5641-biomasa-definice-a-cleneni>
- [56] *Energie21* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.energie21.cz/emise-pri-spalovani-biomasy/>

- [57] *Tzbinfo* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/15456-souhrnne-vyhodnoceni-spotreby-paliv-a-energii-v-ceskych-domacnostech-k-roku-2015>
- [58] *MB-eko* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.mb-eko.cz/hlavni/obrazek/obr2-prumerny-podil-vyznamnych-sektoru-na-narodnich-primarnich-emisich-prachovych-cas>
- [59] *Wikipedie* [online]. [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Su%C5%A1ina>
- [60] *Tzbinfo: vytápění* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/8382-kotle-1-cast>
- [61] BLABLA, O. Měření vlastností tuhých paliv. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 55 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Moskalík, Ph.D..
- [62] *Centrumvytápění.cz* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <https://www.centrumvytapani.cz/faq/kotel-nebo-kamna/>
- [63] ČR. VYHLÁŠKA 415/2012 Sb. In: . 2012. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/AE682A6B5E42E986C1257BA60025D8B5/%24file/V%20415_2012.pdf
- [64] *AIR QUALITY IN EUROPE: OVZDUŠÍ-ZÁKLADY* [online]. [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: https://www.airqualitynow.eu/cz/pollution_acting.php
- [65] ČR. VYHLÁŠKA 330/2012 Sb. In: . 2012. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/47C2C3C6B17EA2F5C1257A95003C4C03/%24file/V%20330_2012.pdf
- [66] *IRZ* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.irz.cz/dokumenty/irz/metody_mereni/ovzdusi/poletavy_prach.pdf
- [67] 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.
- [68] *Ekomonitor* [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: http://www.ekomonitor.cz/sites/default/files/filepath/prezentace/5_braun.pdf
- [69] Český hydrometeorologický ústav [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz>
- [70] KNEBL, V. Čištění ovzduší od jemných částic. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ján Poláčik.
- [71] Particle size. Malvern Panalytical [online]. 2018 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: https://www.malvernpanalytical.com/en/products/measurement_type/particlesize/index.html
- [72] *Sympatec GmbH* [online] 2020. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/>
- [73] *Tzbinfo: vytápění* [online]. 2012 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecistujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [74] KELEMEN, Michal; MAŤAŠOVSKÁ, Tatiana. Meranie hmotnostnej koncentrácie a bilancia úletu tuhých znečisťujúcich látok [online]. 2006 [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2006_2/plus18_22.pdf

- [75] CHEMAGAZÍN [online]. 2011 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z:
<https://www.envitech-bohemia.cz/files/envitech-pm.pdf>
- [76] ABX: Produkty [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z:
<http://www.abx.cz/files/14/gronland-4673-6-cs.pdf>
- [77] ABX: Produkty [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z:
<http://www.abx.cz/cs/gronland-4673-6-cerny-korpus-oplasteni-piskovec-vcetne-horni-desky-p14v160>
- [78] Tzbinfo: vytápění [online]. 2018 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z:
<https://vytapani.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/17137-komfort-kotlu-na-tuha-pevna-paliva-cast-i>
- [79] ABX: Produkty [online]. [cit. 2020-03-15]. Dostupné z:
<http://www.abx.cz/files/cs/vseobecny-navod-k-obsluze-krbova-kamna-tv-cz.pdf>
- [80] TSI Inc. Tsi.com [online]. b.r. [cit. 2017-08-17]. Dostupné z:
<http://www.tsi.com/>
- [81] Dekati: Fine particle measurement solutions: Dekati.com. Dekati Ltd. [online]. Finland: dekat.com, 2019 [cit. 2020-04-07]. Dostupné z:
<https://www.dekati.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ZKRATKA	VÝZNAM
TZL	Tuhé znečišťující látky
NO _x	Oxidy dusíku
SO _x	Oxidy síry
JAMA	The Journal of the American Medical Association
WHO	World Health Organization
PM _x	Particulate Matter (částice o velikosti x mikrometrů)
PAU	Polycyklické Aromatické Uhlovodíky
EDC	Látky poškozující hormonální systém
PBTs	Perzistentní bioakumulující látky
POPs	Perzistentní organické látky
HC	Uhlovodíky
UFP	Ultrafine particles
NP	Nanoparticles
EHK 15	První evropská emisní norma
MO	Mechanické odlučovače
EO	Elektrické odlučovače
PČ	Pevné částice
TDI	Turbocharged Direct Injection
RRD	Rychle rostoucí dřeviny
BRO	Biologicky rozložitelný odpad
BRKO	zbytky potravin, papírové obaly
BRPO	odpady z výroby papíru, cukru, mouky, odpady z jatek apod
PCDD	Poly-chlór-dibenzo-dioxin
PCDF	Poly-chlór-dibenzo-furan
PCB	polychlorované bifenyly
ČSN	chráněné označení českých technických norem
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
US EPA	United States Environmental Protection Agency
TEOM	Tapered Element Oscillating Microbalance
SPM	aerosolové částice
Hi-Vol	vysokoprůtokový
PTFE	Poly-tetra-fluor-etylén
PVC	Polyvinylchlorid
FID	Plamenové ionizační techniky
NDIR	nedisperzní infračervená spektrometrie
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop
LED	Light-Emitting Diode

SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer
CPC	Condensation Particle Counter
DMA	Differential Mobility Analyzer
EO	Elektroodlučovače
atm.	atmosferické
Th	Teplota horní strany
Ts	Teplota dolní strany

SYMBOL

VÝZNAM

t_k	teplota sytosti vodní páry při parciálním tlaku vodní páry ve spalinách
S^r	redukovaný obsah síry v palivu
β	součinitel, volí se podle přebytku vzduchu
A^r	redukovaný obsah popele
x_u	zbytkový obsah uhlíku v tuhých zbytcích, které uletí
t_a	teplota měknutí
t_b	Teplota tavení
t_c	teplota tečení
ξ_{mn}	ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
ξ_f	ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
ξ_{cn}	ztráta hořlavinou ve spalinách
ξ_k	ztráta fyzickým teplem spalin
ξ_{sv}	ztráta sdílením tepla do okolí
W^r	Voda obsažená v palivu
V^{daf}	prchavá hořlavina
h	hořlavina

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Řez plícemi člověka [3]	18
Obrázek 2 Podmínky vzniku Los Angeleského smogu [9]	20
Obrázek 3 Podmínky vzniku Londýnského smogu [9]	20
Obrázek 4 Spálený les kyselým deštěm, 03.05.2017, Středočeský kraj [11]	21
Obrázek 5 Skutečné spalování paliva [22]	25
Obrázek 6 Ideální spalování paliva [23]	25
Obrázek 7 Názorné porovnání PM částic s lidským vlasem [25].....	26
Obrázek 8 Riziko vniknutí částic do plic [26]	28
Obrázek 9 Porovnání částic TZL s biologickými buňkami [29]	28
Obrázek 10 Suchý mechanický odlučovač [32]	29
Obrázek 11 Schéma elektrického odlučovače [33]	29
Obrázek 12 Zapojení filtrů [34]	30
Obrázek 13 Mokrá metoda odsíření [36].....	30
Obrázek 14 Emisní limity pro naftové motory [43]	35
Obrázek 15 Největší nákladní loď Maersk [53]	40
Obrázek 16 Výletní loď Harmony [53]	40
Obrázek 17 Významné antropogenní zdroje prachu v ČR (2010) [58].....	42
Obrázek 18 Měřicí systém TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance).....	50
Obrázek 19 Příklady konstrukce vstupních hlavice vzorkovacích zařízení PM10 [66]...	52
Obrázek 20 Princip analyzátoru využívajícího absorpce β -záření [66].....	52
Obrázek 21 Geiger Müllerův počítač [66].....	52
Obrázek 22 Vstupní hlavice pro zachyt thorakální frakce [66].....	53
Obrázek 23 Frakce prachu v pracovním prostředí k posouzení míry prašnosti.[67].....	53
Obrázek 24 Schéma laserové difrakce [72]	56
Obrázek 25 Schéma gravimetrické metody [73]	57
Obrázek 26 Optický prachoměr OP1 [74]	58
Obrázek 27 Schéma podstaty optických prachoměrů [74].....	58
Obrázek 28 Křbová kamna Grönland 4673-6 [77]	60
Obrázek 29 Schéma prohořivacího kotle [78]	61
Obrázek 30 Blokové schéma SMPS	62
Obrázek 31 Ejektorová ředička Dekati – princip [81].....	64
Obrázek 32 Princip DMA [80]	64
Obrázek 33 CPC-princip [80].....	65
Obrázek 34 Rozmístění termočlánků v křbových kamnech	65
Obrázek 35 Zápal.....	67
Obrázek 36 Závislost teplot na čase v průběhu měření	68
Obrázek 37 Změny teplot v závislosti na čase uzal-zápal	70
Obrázek 38 Změny teplot mezi uzly zápal a první příložením	71
Obrázek 39 Změny teplot - uzal druhé příložením	72
Obrázek 40 Změna diference tlaku během měření	73
Obrázek 41 Počet částic různých frakcí vzniklých v čase.....	74
Obrázek 42 1.příložením	75
Obrázek 43 2.příložením	76
Obrázek 44 3.příložením	76
Obrázek 45 4.příložením	77
Obrázek 46 5.příložením	77
Obrázek 47 Celkové množství vzniklých částic v čase.....	78
Obrázek 48 Povrch částic různých frakcí vzniklých v čase	80

Obrázek 49 Proměna celkového povrchu částic v čase [mm^2/min].....	80
Obrázek 50 Hmotnost částic různých frakcí vzniklých v čase	82
Obrázek 51 Celková hmotnost částic v závislosti na čase [$\mu\text{g}/\text{min}$].....	82
Obrázek 52 Objem částic různých frakcí vzniklých v čase	84
Obrázek 53 Celkový objem částic v závislosti na čase [mm^3/min]	84

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozdělení částic [67]	26
Tabulka 2 Množství vdechnutých částic vybrané velikosti [28]	27
Tabulka 3 Částice PM. Norma 201/2012 [38].....	33
Tabulka 4 Emisní faktory a poměry částic PM10 a PM2,5 v TZL [40].....	33
Tabulka 5 Odsířený elektrárenský blok-200MW [45]	36
Tabulka 6 Množství emisí vzniklých spálením [46]	36
Tabulka 7 Vlastnosti leteckého petroleje [48]	38
Tabulka 8 Euro norma (zážehové motory) [43]	39
Tabulka 9 Hrubý rozbor paliva-surové uhlí [60].....	43
Tabulka 10 Procentuální složení paliva + vybrané vlastnosti [60].....	45
Tabulka 11 Měření částic [65].....	48
Tabulka 12 Popis zkratk teplot na termočláncích	66
Tabulka 13 Nastavení zařízení pro měření	66
Tabulka 14 Celkové množství částic	79
Tabulka 15 Celkový povrch částic	81
Tabulka 16 Celková hmotnost částic.....	83
Tabulka 17 Celkový objem částic	85
Tabulka 18 Shrnutí výsledků	85