



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ČIŠTĚNÍ OVZDUŠÍ OD JEMNÝCH ČÁSTIC

FINE PARTICLES AND AIR-CLEANING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Viktor Knebl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ján Poláčik

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: Viktor Knebl
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Ján Poláček
Akademický rok: 2017/18

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

Čištění ovzduší od jemných částic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Částice PM10, PM2.5 a PM1, vznikající mimo jiné při spalování biomasy, způsobují závažná onemocnění respiračního ústrojí člověka.

Účelem této práce bude v přehledné rešerši zpracovat vznik, rozdělení částic a jejich vliv na životní prostředí a zdraví člověka.

Práce obsahuje praktické měření tvorby jemných částic na spalovacím zařízení a zároveň navrhuje řešení pro eliminaci těchto částic, případně na jejich dodatečné čištění.

Cíle bakalářské práce:

1. rešeršní zpracování problematiky jemných částic (vznik a tvorba, rozdělení, vliv na zdraví)
2. popis metod čištění vzduchu v interiéru a exteriéru
3. praktické měření distribuce jemných částic na spalovacím zařízení

Seznam doporučené literatury:

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 978-0-471-19410-1.

KURFÜRST, Jiří, ed. Kompendium ochrany kvality ovzduší. Chrudim: Vodní zdroje Ekomonitor, 2008. ISBN 978-80-86832-38-8.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Znečištění ovzduší, vody či půdy, je v současné době velkým problémem, kterému musí společnost čelit. Ať už se jedná o produkci velkého množství skleníkových plynů, či kontaminaci půdy a vody různými chemikáliemi. Tato bakalářská práce se věnuje jemným částicím, které jsou odpovědné především za znečištění ovzduší. Cílem této práce je vytvořit přehled o vzniku a rozdělení těchto částic, poukázat na zdravotní důsledky, které tyto částice mají na lidský organismus, a v neposlední řadě ukázat možnosti, jak snížit produkci těchto částic, případně jak od nich čistit ovzduší.

Klíčová slova

Částice, ovzduší, zdraví, čištění

ABSTRACT

The air, water or soil pollution is one of the major problem facing our society. Whether it is the production of large amount of greenhouse gases or contamination of soil and water by various types of chemicals. This bachelor thesis focuses on fine particles, which are mainly responsible for air pollution. The aim of this work is to create an overview of formation and distribution of these particles, to point out the impact of these particles on human organism and, last but not least, to show possibilities how to reduce the production of these particles or how to clean air from them.

Key words

Particles, air, health, cleaning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KNEBL, V. *Čištění ovzduší od jemných částic*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ján Poláček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Čištění ovzduší od jemných částic** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jánů Poláčikovi za cenné připomínky, rady a podporu, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za to, že mi umožnili studovat na vysoké škole, jejich podporu a ochotu poradit s veškerými problémy. V neposlední řadě pak přítelkyni, která mě trpělivě podporovala po celou dobu studia a byla mi velkou oporou.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Pevné částice.....	12
1.1 Složení a charakteristika	12
1.2 Rozdělení částic	14
1.2.1 Primární částice	15
1.2.2 Sekundární částice.....	17
2 Vlivy PM částic na zdraví a životní prostředí	19
2.1 Vliv na zdraví.....	19
2.1.1 Možná onemocnění	21
2.1.2 Statistiky.....	23
2.2 Vliv na životní prostředí	24
2.2.1 Kyselé deště.....	25
2.2.2 Znečištění půdy	25
2.2.3 Oteplování planety	25
2.3 Ochrana	25
3 Legislativa a trendy ve znečištění ovzduší	27
3.1 Limitní hodnoty částic PM v ovzduší	27
3.2 Vývoj znečištění ovzduší částicemi PM	28
3.2.1 Evropa	28
3.2.2 Česká republika	30
4 Čištění ovzduší	32
4.1 Primární čištění	32
4.1.1 DPF filtry.....	33
4.1.2 Filtrace v průmyslových zařízeních	34
4.1.3 Krby a kotle v domácnostech	36
4.2 Sekundární čištění	36
4.2.1 Čištění vzduchu v domácnostech	36
4.2.2 Čištění ovzduší v exteriéru.....	39
4.3 Přirozené čištění ovzduší	41
5 Měření velikosti a koncentrací částic PM.....	42
5.1 Měření velikosti	42
5.1.1 Laserová difrakce	42
5.1.2 Gravitační sedimentace	43

5.1.3	Další metody	43
5.2	Měření koncentrací	43
5.2.1	Gravimetrická metoda	44
5.2.2	Optické metody	44
5.2.3	Další metoda	45
6	Praktické měření koncentrace částic PM na spalovacím zařízení	46
6.1	Měřicí okruh	46
6.1.1	Automatický kotel na biomasu VERNER A251	46
6.1.2	Třídící zařízení Electrostatic Classifier 3080	48
6.1.3	Počítací zařízení CPC 3775 (Condensation particle counter)	50
6.1.4	Notebook	51
6.2	Měření první-dřevní pelety A1	51
6.3	Měření druhé-řepkové pelety	54
6.4	Měření třetí-slaměné pelety	56
6.5	Porovnání jednotlivých druhů pelet	58
	ZÁVĚR	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	69
	SEZNAM OBRÁZKŮ	70
	SEZNAM TABULEK	71

ÚVOD

Spalování tuhých paliv je nedílnou součástí lidských životů. Ať už se jedná o uhlí, které se spaluje v elektrárnách či teplárnách a díky němuž si může člověk večer rozsvítit žárovku, či o dřevo, kterým si lidé v domácnostech sami topí. Při procesu spalování ovšem dochází také k produkci plyných či pevných znečišťujících látek, které mají prokazatelně vliv nejen na zdraví lidí, ale mají také negativní dopad na přirozené prostředí živočichů, či mohou stát za globálním oteplováním. Díky pokroku techniky existují v současné době možnosti, jak monitorovat množství těchto nebezpečných látek v ovzduší, existují emisní limity, které hlídají produkci těchto látek. Je vyvíjena snaha o to, aby byla používána lepší paliva, která neprodukují tolik nebezpečných látek. A v neposlední řadě existují různé možnosti, jak snižovat koncentrace těchto látek v ovzduší, a tím předcházet negativním jevům, které jsou s tímto problémem spojeny. Tato práce se věnuje právě této problematice.

Práce je rozdělena na dvě části. První část je část rešeršní a obsahuje čtyři kapitoly. Druhá část je jak rešeršní, tak experimentální a obsahuje dvě kapitoly.

První kapitola této práce se zabývá charakteristikou těchto částic, jejich dělením a chemickým složením. Uvádí také zdroje částic PM a procentuální porovnání jednotlivých zdrojů. V neposlední řadě jsou v této kapitole také popsány možnosti vzniku těchto částic.

Druhá kapitola se zabývá vlivem částic PM na lidské zdraví a životní prostředí a také se zabývá ochranou před těmito částicemi. V části, která se věnuje lidskému zdraví, jsou uvedeny choroby, které mohou částice PM způsobovat, či zhoršovat jejich příznaky, v části, věnující se vlivu na životní prostředí, jsou pak zahrnuty negativní dopady na vegetaci či živočichy. V části, která se zabývá ochranou, jsou základní doporučení odborníků a lékařů.

Třetí kapitola se pak zaměřuje na legislativu, imisní limity, a to především v České republice, okrajově pak také v Evropě a světě. Dále je v této kapitole uveden vývoj znečištění ovzduší částicemi PM, a to jak v Evropě, tak v České republice.

Čtvrtá kapitola se věnuje samotnému čištění ovzduší. Uvádí, jak je možné limitovat množství částic PM v ovzduší, například použitím DPF filtrů. Dále se zaměřuje na různé druhy čistících zařízení, jako jsou například HEPA filtry, či elektrostatické odlučovače. Jsou zde uvedeny možnosti čištění vzduchu jak v interiéru, tak v exteriéru. V neposlední řadě je pak v této kapitole uvedena čistící schopnost přírody.

Pátá kapitola je kapitolou úvodní, rešeršní, pro druhou část této práce. Jsou v ní zahrnuty možnosti měření částic PM v ovzduší, stejně jako možnost měření jejich velikosti.

Šestá kapitola je kapitola, ve které je uveden experiment, který probíhal na spalovacím zařízení, a to včetně obecného seznámení s měřicím přístrojem a tímto zařízením. V neposlední řadě tato kapitola obsahuje stručné zhodnocení výsledků experimentu.

1 Pevné částice

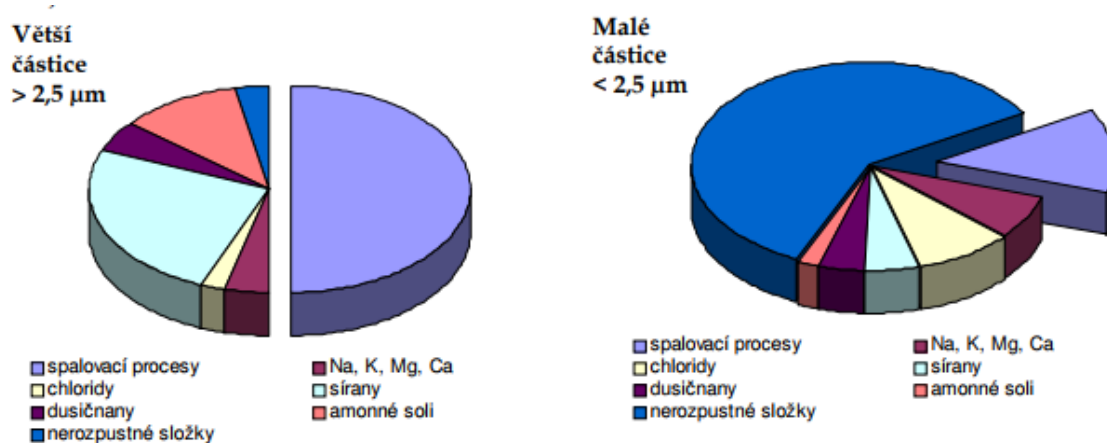
Spalováním fosilních paliv a industriální činností člověka vznikají emise aerosolů, které mohou mít pevné, kapalné nebo směsné skupenství. Souhrnně se tyto emise označují tuhé znečišťující látky (TZL). Z hlediska vlivu TZL na zdraví člověka byl zaveden pojem PM. Označení PM_x (z anglického Particulate Matter) je označení pro částice, které se vyskytují v ovzduší a mají průměr menší než x mikrometrů. V češtině se dá PM přeložit jako pevné částice nebo prachové částice, v některých literaturách se můžeme setkat s pojmem suspendované částice. Tyto částice jsou velmi malé a mohou být unášeny vzduchem. V současné době jsou jedním z hlavních původců znečištění ovzduší a mají negativní vliv na kvalitu ovzduší, životní prostředí a především na lidské zdraví.[1,2,3]

Ačkoli se tento pojem skloňuje až v posledních letech, příroda se s tímto problémem potýká prakticky od počátku své existence. Po svém vzniku byla planeta Země velmi nehostinným prostředím, původní atmosféru tvořila směs oxidu uhličitého, metanu, sirovodíku a právě prachových částic.[4]

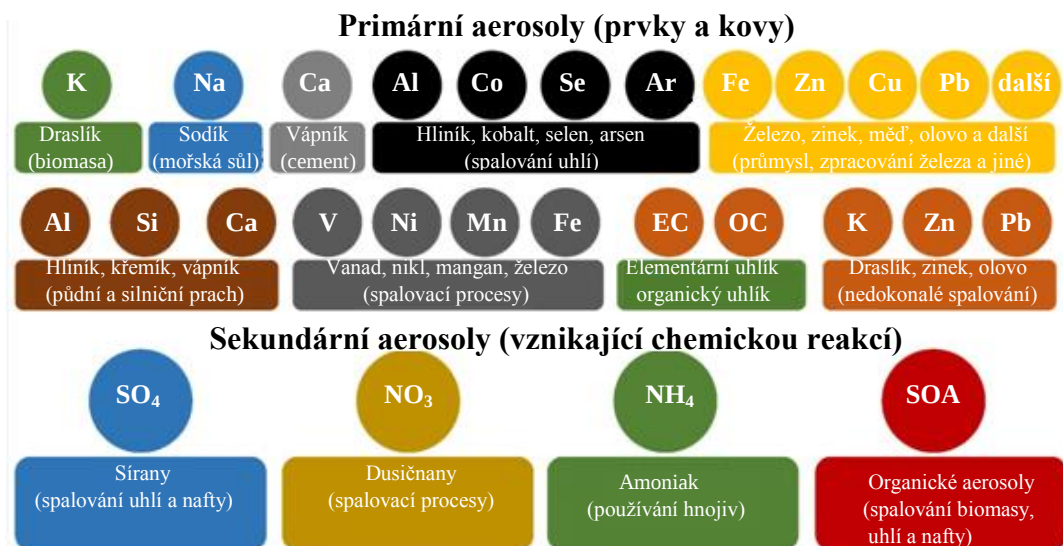
V dalších kapitolách je provedeno rozdělení částic, popis chemického složení, zdroje a také možnosti vzniku těchto částic

1.1 Složení a charakteristika

Prachové částice se liší svým složením podle způsobu, jakým vznikají. Obecně však lze říci, že obsahují především sírany, dusičnany a především organický uhlík (saze). Obecně neplatí, že částice obsahují právě tolik procent složky A či složky B, což je způsobeno právě jejich rozdílným původem. U městského prachu však existuje typický poměr hlavních složek, viz obrázek 1.1.



Obrázek 1.1: Typické poměry složek u městského prachu [44]



Obrázek 1.2: Složení částic PM [5]

Z obrázku 1.2 je patrné, že můžeme složení částic PM rozdělit podle toho, jak vznikají (například jestli jsou produktem přírodním, nebo vznikají jako vedlejší produkt průmyslu), a také podle toho, zda jsou primární, nebo sekundární. Rozdíl mezi těmito pojmy je uveden v kapitole 1.2 Rozdělení.

Dále je z obrázku 1.2 také patrné, že mimo výše uvedené dusičnany, sířany a organický uhlík mohou částice obsahovat prvky jako draslík (je obsažen v biomase), sodík (přírodním zdrojem je mořská sůl), vápník (je obsažen v cementu). Tyto prvky zpravidla nejsou pro zdraví nebezpečné a lidské tělo je potřebuje pro správné fungování. Například u draslíku se doporučená denní dávka pohybuje v rozmezí 2-5,5 g, u sodíku je to pak dvakrát méně. Problém je, že draslík ve větším množství (nad 25 gramů) působí toxicky, což se projevuje na zdraví jedinců.[6]

Další skupinou (v obrázku 1.2 je označena černou barvou) jsou vedlejší produkty spalování uhlí. Hliník, selen, kobalt a arsen. Z této skupiny prvků je nejproblematictější arsen a jeho vliv na zdraví člověka bude předmětem kapitoly 2.

Žlutě je označená skupina prvků vznikající při výrobě železa a při výrobě neželezných sloučenin a kovů. Patří sem především železo, zinek, měď a olovo.

Vanad, nikl, mangan a železo (šedá skupina) jsou prvky, které vznikají při spalování olejů, tudíž vznikají jako vedlejší produkt dopravní činnosti.

Velmi důležitým elementem primárních aerosolů je elementární uhlík (z anglického elemental carbon, EC) nebo také organický uhlík (z anglického organic carbon, OC). V zahraniční literatuře se často používá také název černý uhlík (z anglického black carbon, BC), tento název bude dále používán. BC je produktem spalování organických paliv (jedná se vlastně o saze), kdy nedokonalým spalováním těchto paliv vzniká jak oxid uhelnatý CO, tak právě uhlík C ve formě sazí. Právě saze, spolu s přirozeně suspendovanými částicemi, jsou zpravidla nosnou částí PM částic, které na sebe navazuje ostatní látky a chemické sloučeniny.[7,8]

Mimo výše uvedené látky se lze v některých pracích setkat s pojmem benzo[a]pyren (BaP). BaP je za běžných podmínek žlutě zbarvená krystalická látka, vznikající při nedokonalém spalování fosilních paliv, především uhlí. Odhaduje se, že 80-100 % BaP v ovzduší je navázáno na částice PM. Tato látka má karcinogenní a mutagenní účinky a pozornost jí je věnována v kapitole 2 této práce.[8,9,10]

1.2 Rozdělení částic

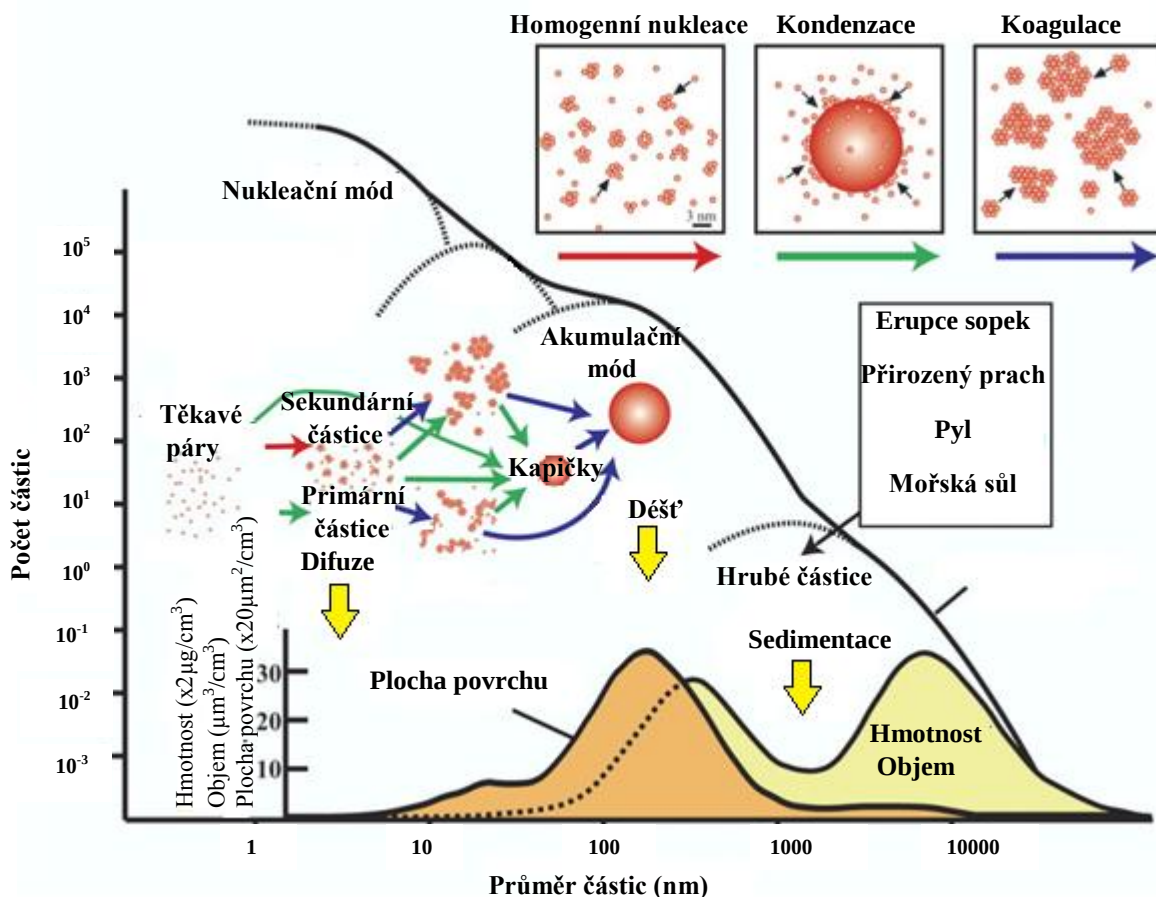
Základní rozdělení částic PM_x je podle pravého dolního indexu x , který charakterizuje velikost, a podle tohoto dělení pak hovoříme o jednotlivých frakcích.

Pro $x=10$ mluvíme o částicích PM_{10} , které mají průměr menší jak 10 mikrometrů (pro porovnání- průměr lidského vlasu je asi 70 mikrometrů). Z hlediska velikosti jsou proto největší z částic, kterým se tato práce věnuje. Někdy se o nich hovoří jako o hrubých částicích nebo hrubých prachových částicích. K velikosti částic se pojí také jejich vliv na zdraví a také hmotnost, která je u těchto částic relativně (v porovnání s $PM_{2.5}$ a PM_1) velká. Hmotnost částic má zásadní vliv na jejich proudění ve vzduchu a na schopnost těchto částic usazovat se nebo naopak zůstat dlouhou dobu ve vzduchu. Z tohoto hlediska je tedy patrné, že čím menší je velikost částic, tím déle se udrží ve vzduchu a tím horší je pak jejich vliv na lidské zdraví. Částice PM_{10} se ve vzduchu udrží zpravidla pár hodin.[11]

Pro $x=2.5$ mluvíme o částicích $PM_{2.5}$, které mají průměr menší než 2,5 mikrometrů, tyto částice se v ovzduší udrží zpravidla několik dní.[11]

Pro $x=1$ mluvíme o částicích PM_1 , které mají průměr menší než 1 mikrometr a tyto částice se v ovzduší drží ze zkoumaných částic nejdéle, jejich podskupina UFP (z anglického ultra fine particles, ultra jemné částice) se dokonce nemusí usadit nikdy.[11]

Na usazování částic PM má vliv zejména vlhkost vzduchu a přítomnost srážek, a to hlavně ve vnějších prostorech. Déšť má pozitivní vliv na usazování částic. Kapky vody na sebe navážou škodlivé látky a PM částice a po dopadu na zem jsou tyto částice usazeny. Negativní vliv má naopak proměnný vítr, který tyto částice přenáší na dlouhé vzdálenosti a způsobuje také sekundární prašnost, kdy se již usazené částice znovu dostávají do ovzduší.[12,13]



Obrázek 1.3: Původ částic a jejich dělení [14]

Z obrázku 1.3 je patrné, že velikost částic není jediným kritériem, podle kterého můžeme tyto hodnotit. Zajímavá je především křivka množství částic, to znamená počet částic, které připadají na určitý objem. Platí, že čím menší jsou částice, tím více jich v daném objemu bude, což je logické, nicméně je důležité si uvědomit, že tento fakt přímo ovlivňuje také množství vázaných sloučenin na částicích PM jako jsou například sírany, nitridy a BaP.

Plocha povrchu je dalším důležitým kritériem hodnocení PM částic, neboť velikost tohoto povrchu je zásadní z hlediska možného vázání dalších škodlivých látek jako je BaP. Z obrázku 1.3 je patrné, že čím menší jsou částice, tím větší mají aktivní povrch a tím více jsou schopny na sebe navazovat další látky.[10,14]

Křivka hmotnost, objem, dává do souvislosti velikost částic s jejich relativní hmotností a relativním objemem. Z této křivky si tudíž lze ověřit, že hmotnost částic PM₁₀ je, jak bylo psáno výše, opravdu největší z částic, kterým se tato práce věnuje.

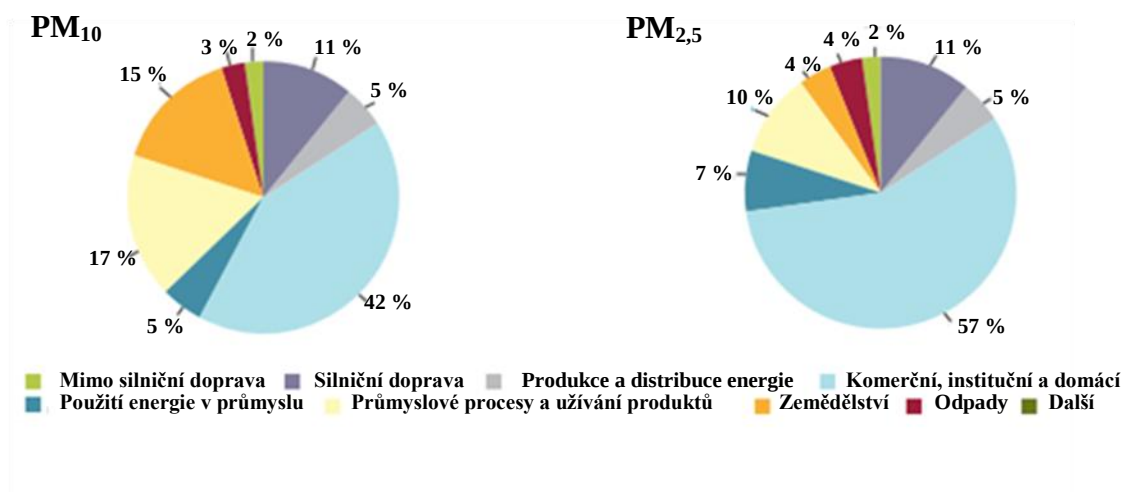
Další možné dělení, které vyplývá také z obrázku 1.3, je dělení podle vzniku těchto částic. V dalších podkapitolách je toto dělení provedeno.

1.2.1 Primární částice

Označení primární se používá pro částice, které vznikají přímo jako vedlejší produkt určitých jevů, činností a pochodů. Hlavní rozdělení primárních částic je pak podle původců těchto pochodů a mluvíme o primárních částicích přírodních, nebo částicích vznikajících antropogenní (lidskou) činností.[8]

Mezi přírodní primární částice patří například mořská sůl, která se vyskytuje v ovzduší blízkému mořím a oceánům. Dále zde pak patří popel, který se do ovzduší dostává například při rozsáhlých lesních požárech nebo erupcích sopek. V neposlední řadě se pak řadí mezi tyto částice také přirozeně suspendovaný prach, pyl a produkty větrné eroze, například jemné částice křemenů a hornin. Co se tedy týče přírodních zdrojů, je patrné, že tyto nemůžou být prakticky nijak eliminovány. [8]

Co naopak může člověk ovlivnit, jsou ty částice, které vznikají právě antropogenní činností. Obrázek 1.4 znázorňuje podíl hlavních zdrojů primárních částic PM_{10} a $PM_{2.5}$.



Obrázek 1.4: Procentuální podíl jednotlivých sektorů na množství částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ [15]

Data uvedená na obrázku 1.4 jsou z roku 2015 a týkají se 28 členských států Evropské unie, mezi které patří také Česká republika.

Nejvýznamnějším zdrojem primárních částic je podle obrázku 1.4 sektor, zahrnující domácnosti, komerční zdroje a instituce (světle modrá barva). Tento sektor se na celkovém množství částic PM_{10} , respektive $PM_{2.5}$ podílel 42 %, respektive 57 %. Toto velké číslo je způsobeno tím, že do tohoto sektoru spadá i vytápění jednotlivých domácností a institucí, především dřevem a méně kvalitním hnědým uhlím, což má za následek velké množství vzniklých částic.

Pořadí na druhém místě se pro jednotlivé sektory liší, nicméně bude zde uvedeno tak, aby byl patrný procentuální rozdíl, a bude zachován formát předchozího odstavce, kdy první hodnota bude pro částice PM_{10} a druhá pro částice $PM_{2.5}$.

Sektor zemědělství (žlutá barva) se podílel na celkovém množství částic 15 %, respektive 4 %. Tato čísla nejsou v porovnání s předchozím sektorem nijak velká, nicméně problém daného sektoru spočívá v emisích amoniaku NH_3 a metanu CH_4 , tedy sloučenin, které podle některých studií, například [17,18,19], jsou odpovědné za globální oteplování.

Vliv energetického sektoru, jeho produkce a distribuce (světle fialová barva), se podílel na celkovém množství částic u obou sledovaných druhů shodně 5 %. Tento sektor se podílí především na osvětlení ulic a domů.

Použití elektřiny v průmyslu (sektor označený tmavší modrou barvou), je sektor, který se podílel na celkovém množství 5 %, respektive 7 %. Patří sem především osvětlení industriálních zón a použití elektřiny například pro stroje či nástroje používané při průmyslové činnosti.

Průmyslové procesy (pleťová barva) se na celkovém množství podílely 17 %, respektive 10 %. Mezi tyto procesy lze zařadit téměř všechnu výrobu, ať už automobilovou, slévárenství či výrobu železa.

Mimo silniční doprava (sektor označený světle zelenou barvou) se podílela na celkovém množství 2 %, a to u obou typů částic. Patří sem železniční doprava (vlaky, tramvaje), lodní doprava a letecká doprava.

Silniční doprava (tmavší fialová barva) se podílela na celkovém množství částic shodně 11 %. Nejdůležitější je doprava osobními automobily, dále zde pak patří doprava autobusy a kamionová doprava. Zdrojem částic PM v tomto sektoru je jednak spalování paliv v motorech (nafty a benzínu), ale také emise vznikající opotřebením pneumatik a částice uvolňující se z brzdných kotoučů.[20]

Vliv dalších sektorů (sklárky, používání produktů a jiné), je v porovnání s předchozími sektory prakticky zanedbatelný, číselně to je 3 %, respektive 4 %.

Na obrázku 1.4 si lze také všimnout, že neexistují žádná podobná data pro částice PM₁, a to z důvodu chybějící normy pro tyto částice. Více informací o legislativě bude pojednávat kapitola 3 této práce.

1.2.2 Sekundární částice

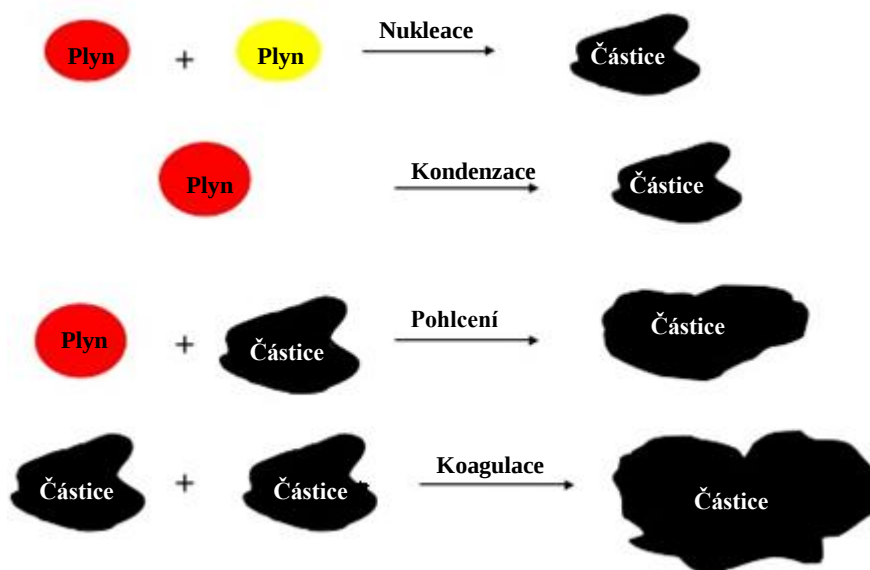
Názvem sekundární částice se rozumí ty částice, které buďto přímo vznikají v atmosféře vlivem chemických reakcí, nebo je jejich podstatná část formována složkami vznikajícími právě těmito chemickými reakcemi.

Mezi hlavní předchůdce sekundárních PM částic patří oxid siřičitý SO₂, oxid dusnatý NO, oxid dusičitý NO₂, amoniak NH₃ a těkavé organické sloučeniny VOCs (z anglického volatile organic compounds), což jsou sloučeniny, které obsahují atomy uhlíku, například toluen, benzen, chloroform a další.[8]

Oxid siřičitý, oxid dusnatý, oxid dusičitý a amoniak reagují v atmosféře a vznikají sloučeniny dusíku, síry a amoniaku. Tyto sloučeniny pak mohou tvořit nové částice, nebo mohou kondenzovat na již přítomných částicích a vytvářejí tzv. sekundární anorganické aerosoly.[21]

Těkavé organické sloučeniny VOCs jsou v atmosféře oxidovány a tvoří tak méně těkavé organické sloučeniny.[8]

V neposlední řadě se mezi sekundární částice a sekundární znečištění počítá jev označený jako sekundární prašnost. Již usazené částice se mohou vlivem větru, lidské činnosti a jiných pochodů znovu dostávat do ovzduší. Toto je velký problém v oblastech, kde dochází k těžebním činnostem, zejména pak těžbě kamene a hornin.



Obrázek 1.5: Mechanismy vzniku sekundárních PM [21]

Obrázek 1.5 popisuje základní mechanismy vzniku sekundárních PM částic. Mezi základní mechanismy patří nukleace, kondenzace, pohlcení (v anglické literatuře se vyskytuje pojem scavenging) a koagulace.

Nukleace se dělí na dva základní typy, homogenní a heterogenní. Heterogenní nukleace je proces, kdy se na již přítomné částice navazují další složky a zvětšují tak jejich objem. Homogenní nukleace je naopak jev, kdy určité sloučeniny v atmosféře, například sírany, dusičnany a VOCs, přejdou chemickou reakcí na méně těkavé páry. Z těch pak homogenní nukleací vznikají nové částice.[22]

Kondenzace je další možný způsob vzniku sekundárních PM. Plyny, které vznikají například při spalování fosilních paliv, mají z počátku velmi vysokou teplotu. Rychlým ochlazením, které je způsobeno podstatně nižší teplotou okolí, se z těchto plynů vytvoří velmi malé kapičky, které se pak mohou usazovat na již vzniklých pevných částicích.

Koagulace je pak spojování jednotlivých částic, kdy vzniká větší částice. Na tu pak mohou kondenzovat další látky.[22]

2 Vlivy PM částic na zdraví a životní prostředí

2.1 Vliv na zdraví

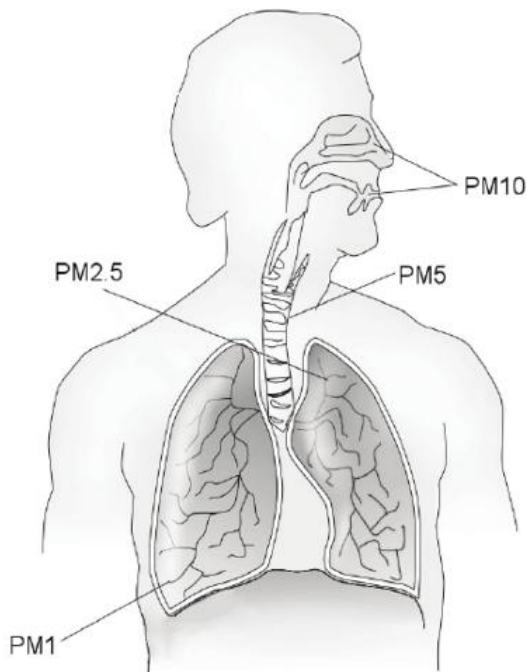
Vzhledem na chemické složení částic PM je patrné, že tyto budou mít vliv na lidské zdraví, bohužel negativní.

Částice PM se mohou do našeho těla dostat více způsoby. Můžou se nacházet v jídle, které jíme, nebo ve vodě, kterou pijeme. Můžou se dostat do organismu skrze oči, nebo srze zranění. Nejčastěji se však do organismu dostávají při dýchání, ať už nosem, nebo ústy, a jsou schopny v závislosti na své velikosti pronikat různě hluboko do respiračního ústrojí člověka a z něj pak do celého organismu. Obecně se dá říct, že čím menší jsou částice, tím horší jsou pro lidské zdraví, neboť jsou schopny pronikat hlouběji do lidského organismu, především do plic, kde pak páchají větší škody.

Hrubé prachové částice (větší jak 10 mikrometrů) se pohybem řasinkového epitelu, kterým je vystlána nosní dutina, dostávají s hlenem do nosohltanu a jsou spolknuty, vykašlány nebo vydechnuty.

Částice PM_{10} jsou největší z částic, kterým se věnuje tato práce, a tudíž jejich velikost je limituje ve schopnosti pronikat do plic. Větší z těchto částic sedimentují v horních cestách dýchacích, které zachytí většinu částic větších jak 5 mikrometrů. Menší částice pronikají hlouběji a se zmenšující se velikostí roste pravděpodobnost toho, že budou usazeny v plicních sklípcích (uvádí se, že pro částice o velikosti 3 mikrometry je tato pravděpodobnost větší jak 50 procent). Pro tyto částice se často používá pojem torakální (hrudní) částice.[23,24]

Částice $PM_{2.5}$ a PM_1 jsou, díky své menší velikosti, schopny pronikat hlouběji do respiračního ústrojí, především částice PM_1 jsou pak schopny se ve větší míře usazovat v plicních sklípcích, dokonce se dostat i do krevního řečiště.[23]



Obrázek 2.1: Respirační ústrojí člověka a částice PM [74]

Zdravotní komplikace, které prachové částice způsobují, mohou být různě závažného charakteru, od podráždění očí, přes problémy s dýcháním až po problémy se správnou funkcí srdečního svalu, infarkt či rakovinu plic, a jsou ovlivněny několika faktory, z nichž nejvýznamnější jsou:

- doba expozice
- kvalita ovzduší a prašnost prostředí
- věk
- zdravotní stav

Doba expozice je pravděpodobně nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje zdravotní rizika, jež přináší částice PM. Zavádí se dva základní pojmy- dlouhodobé a krátkodobé vystavení. Krátkodobou expozicí se rozumí doba v řádech hodin či dnů a mezi typická onemocnění či komplikace zde patří akutní bronchitida, projevy astmatu či dočasné zhoršení kvality funkce plic a srdce. Dlouhodobou expozicí se rozumí především vliv těchto částic na obyvatele, kteří žijí v regionech či městech se zvýšenou hodnotou prachových částic v ovzduší.[23,24]

Co se týče kvality ovzduší, byl v 70. letech 20. století zaveden pojem index kvality vzduchu (anglicky Air Quality Index, AQI). Jedná se o bezrozměrné číslo, které shrnuje výskyt různých znečišťujících látek v ovzduší a tuto skutečnost pak prezentuje v jednoduché formě, která je snadno pochopitelná pro širokou veřejnost.

Tabulka 2.1: Index kvality vzduchu [75]

AQI	Úroveň znečištění vzduchu	Zdravotní projevy/důsledky	Upozornění pro obyvatelstvo
0-50	Dobrá	Kvalita ovzduší je považována za uspokojivou a znečištění ovzduší představuje malé nebo žádné riziko.	Žádné
51-100	Mírná	Kvalita ovzduší je přijatelná. U některých znečišťujících látek může existovat mírné zdravotní riziko u velmi malého počtu lidí, kteří jsou citliví na znečištěné ovzduší.	Aktivní děti a dospělí a lidé s onemocněním dýchacích cest, jako je astma, by měli omezit dlouhotrvající venkovní námahu.
101-150	Nezdravé pro citlivé skupiny	Citliví jedinci mohou pociťovat účinky na své zdraví. Není pravděpodobnost, že by znečištění ovzduší ovlivnilo velké množství lidí.	Aktivní děti a dospělí a lidé s onemocněním dýchacích cest, jako je astma, by měli omezit dlouhotrvající venkovní námahu.
151-200	Nezdravá	Každý může pociťovat účinky na zdraví. Velmi citliví jedinci mohou mít vážnější zdravotní problémy.	Aktivní děti a dospělí a lidé s respiračním onemocněním, jako je astma, by se měli vyvarovat dlouhému pobytu venku. Všichni ostatní, zejména děti, by měli omezit dlouhodobou venkovní námahu.

201-300	Velmi nezdravá	Zdravotní riziko při havarijních podmínkách. Celá populace je pravděpodobně zasažena.	Aktivní děti a dospělí a lidé s respiračním onemocněním by se měli vyvarovat venkovní námahy. Všichni ostatní, zejména děti, by měli omezit pobyt ve venkovním prostředí.
300+	Nebezpečná	Každý může mít vážnější zdravotní příznaky.	Každý by se měl vyhnout veškerým venkovním činnostem.

Jak lze vidět v tabulce 2.1, intervaly indexu kvality ovzduší dělí úroveň znečištění na šest základních skupin (dobrá až nebezpečná) a podle těchto skupin jsou také uvedeny zdravotní projevy či důsledky, které jednotlivé skupiny mohou představovat. V neposlední řadě pak tabulka 2.1 také uvádí upozornění pro obyvatelstvo, především co se týče pohybových aktivit a pobytu ve vnějších prostorech.

Prašnost prostředí je dalším, velmi důležitým faktorem, který také souvisí s dobou expozice. Velmi prašná prostředí (například ve firmách, které se zabývají slévárenstvím, které je pravděpodobně nejprašnější průmyslovou činností) jsou nebezpečná i při krátkodobém pobytu v těchto prostorech. Více prachových částic se také nachází ve velkých městech, v České republice především na Ostravsku a Karvinsku. Naopak za méně prašná prostředí se většinou považují vesnice a obecně místa vzdálenější jakýmkoli industriální zónám.[23,25]

Věk obyvatel, kteří jsou vystaveni vlivu prachových částic, je v souvislosti s problematikou částic PM na zdraví spjat především se schopností obranyschopnosti organismu, imunitou. Ohroženější skupinou obyvatel jsou starší jedinci, jejichž imunita už není dostatečně kvalitní, a malé děti, které ji ještě nemají dostatečně vyvinutou. U malých dětí je navíc problém ve skutečnosti, že častěji běhají po ulicích, hrají si a jsou zadýchány. To pak vede k větší potřebě dýchání a tím pádem se do jejich organismu dostává více prachu.[23,24]

Zdravotní stav přímo souvisí s věkem obyvatel, neboť starší občané mohou mít, mimo sníženou obranyschopnost, také další problémy či nemoci, například kardiovaskulární či respirační. Pokud jsou vystaveni zvýšeným hodnotám prachových částic, tělo již není schopno dostatečně bránit jejich negativním vlivům na organismus, neboť bojuje s dalšími problémy. Navíc prachové částice mohou tyto problémy prohlubovat. Mezi ohroženější pak patří i lidé, kteří trpí cukrovkou (diabetem), neboť u těchto občanů je zvýšené riziko skrytých srdečních vad, které by prachové částice dále zhoršovaly.[23]

2.1.1 Možná onemocnění

Jak již bylo psáno výše, existuje mnoho nemocí, komplikací či problémů, které prachové částice v organismu mohou vyvolat. Níže budou některá z nich popsána.

Při kontaktu pokožky s prachem se může objevit zarudnutí, podráždění či u citlivějších jedinců alergické reakce. Pokud do kontaktu s prachem přijdou oči, může se projevit jejich zarudnutí či zánět spojivek. Tyto zdravotní komplikace jsou velmi nepříjemné, neboť člověk má snahu zasažená místa škrábat, což vede k dalším bolestem. Nicméně tyto projevy nejsou až tak závažné, neboť neovlivňují přímo život pacienta.

Nejvýznamnější a nejvíce popsanou oblastí, kde se lze setkat s vlivem prachu na lidské zdraví, je jednoznačně dýchací ústrojí člověka. Mezi hlavní onemocnění tohoto ústrojí patří

astma, bronchitida, plicní zánět, chronická obstrukční plicní nemoc a podle určitých studií také rakovina plic. Mimo tyto, vdechnutí prachových částic může způsobit difuzní plicní zánět, který má pak přímý vliv na nemoci spojené s kardiovaskulárním systémem.

Astma je onemocnění, které se projevuje dušností či sípáním, které může přicházet či odcházet v různých intervalech, prach má za následek zvýšení intenzity těchto projevů. Podle Světové zdravotnické organizace trpí ve světě astmatem 235 milionů lidí.[26]

Bronchitida je zánět či otok průdušek. Existují dva typy, akutní a chronická bronchitida. Akutní bronchitida se vyskytuje nárazově, v souvislosti s poléťavým prachem v ovzduší pak především v období jeho zvýšené koncentrace. Projevuje se kašlem, horečkou a slabostí plic. Většinou trvá pár dní, ojediněle několik týdnů. Chronická bronchitida se projevuje častým kašlem (nejméně tři měsíce v roce po dobu dvou let), tvorbou hlenu a snížením funkce plic. PM částice navíc prohlubují její účinky (zahlcují plíce, snižují jejich přirozenou schopnost filtrace). Pokud se k chronické bronchitidě připojí dušnost, pak se hovoří o chronickém obstrukčním plicním onemocnění.[27].

Rakovina je jedna z nejvýznamnějších příčin předčasného úmrtí. Celosvětově v roce 2015 zemřelo na rakovinu 8,8 milionů lidí, nejčastější formou rakoviny pak byla rakovina plic, na kterou ve stejném roce podlehl 1,69 milionů lidí. Nejčastěji je rakovina plic skloňována s kouřením, ať už aktivním, nebo pasivním, nicméně v současné době se zvýšená pozornost věnuje i kvalitě ovzduší, která se více a více podílí na celkovém počtu výskytu rakoviny plic. Prachové částice, které se nachází v ovzduší, totiž obsahují, jak již psáno výše, látky jako BaP, arsen či chrom, což jsou podle mnohých studií karcinogenní látky. [28,29,30,31]

Nemoci kardiovaskulárního systému, do kterého se řadí srdce, žíly, tepny, cévy a vlasečnice, jsou nejčastější příčinou úmrtí na světě. Podle WHO zemře ročně na onemocnění tohoto systému 17,7 milionů lidí, což představuje 31 % z celkového počtu úmrtí vůbec. Z tohoto počtu pak připadá 80 % na infarkty a cévní mozkové příhody (mrtvičky). Velká část z tohoto počtu úmrtí je přičítána špatné životosprávě, především vysoké konzumaci soli, tuků, nebo naopak nedostatkem zeleniny a ovoce v jídelníčku. Mimo špatné stravovací návyky pak možnost výskytu nemoci kardiovaskulárního systému negativně ovlivňuje nedostatek pohybu. V poslední době se ovšem čím dál více diskutuje vliv kvality ovzduší na počtu těchto onemocnění.[32]

Nebezpečnější jsou z hlediska ohrožení kardiovaskulárního systému částice PM_{2.5}. Ty se díky své velikosti dostávají snáze do organismu člověka, kde mohou ovlivňovat nejen kardiovaskulární, ale také další systémy.

V části, která se věnovala plicním onemocněním, byl zmíněn plicní zánět. Vdechnutí prachových částic má za následek nejen tento druh zánětu (může se například objevit také zánět průdušek, či při kontaktu s očima zánět spojivek), nicméně zánět plic je jedním z klíčových předchůdců onemocnění kardiovaskulárního systému. Částice PM_{2.5} se mohou dostat do alveol (plicních sklípků), což může vést jednak k zánětlivému onemocnění, jednak k oxidačnímu stresu (nedostatek kyslíku), což vede k uvolňování cytokinů, proteinů, které se účastní imunitních odpovědí na tyto nemoci. Jsou to prakticky látky, které organismus tvoří, aby se chránil. Nadměrná produkce některých proteinů má však negativní vliv na lidské zdraví. Například velké množství TNF-α (tumor necrosis factor alpha, faktor

nádorové nekrózy), může mít za následek vyšší srážlivost krve v zaníceném okolí, sraženina se pak může uvolnit a způsobit infarkt, ve velkém množství pak TNF- α může způsobovat také septický šok.[33,34,35]

Částice PM_{2.5} mohou také být spojeny s abnormální aktivací hemostatického systému. Hemostatický systém je odpovědný za srážení krve. Přítomnost PM_{2.5} v krevním řečišti způsobuje zvýšenou produkci fibrinogenu, proteinu, který je nezbytný při srážení krve, nebo může aktivovat trombocyty (krevní destičky). Zvýšená aktivita trombocytů a fibrinogenu pak může vést k akutní trombóze (vznik sraženiny, která zamezuje krvi v průtoku cévami a žilami), k infarktu či mrtvici.[35,36]

2.1.2 Statistika

Statistiky, které sledují vliv částic (a obecně všech onemocnění, mimo jiné také rakovinu) na lidský organismus, používají dva hlavní způsoby kvantifikování těchto jevů, a to předčasná úmrtí, a počet let života, ztracených vlivem těchto částic, respektive dalších onemocnění.

Předčasnými úmrtími se rozumí taková úmrtí, která nastanou před dosažením určitého věku. Zpravidla se tímto věkem rozumí průměrná délka života, která je jiná pro různé regiony a obvykle se liší i u pohlaví. Například v České republice byla v roce 2015 průměrná délka života 79,47 let, u žen byl tento průměr 82,7 let a u mužů 76,4 let. Celosvětový průměr pak v roce 2015 dosáhl 72,9 let.[8,37]

Léta života ztracená (YLL, z anglického Years of life lost) jsou definována jako léta, která ztratí lidé v důsledku předčasných úmrtí. Toto hodnocení dává objektivnější pohled na věc, neboť zahrnuje i věk, ve kterém došlo k předčasnému úmrtí, například pokud by zemřelo v České republice šestileté dítě, či sedmdesátiletý muž, dítě by pak ztratilo asi 76 let (v případě dívky) či 70 let (v případě chlapce) života, kdežto muž asi 6 let. Nevýhodou této možnosti kvantifikování vlivů částic na lidský organismus je však skutečnost, že u starších lidí se mohou vyskytovat další nemoci, které mohou výsledky zkreslovat.

Tabulka 2.2 uvádí počet předčasných úmrtí obyvatel vybraných států Evropy, která byla způsobena přítomností částic PM_{2.5} v ovzduší.

Tabulka 2.2: Počet úmrtí ve vybraných evropských státech v roce 2014 [15]

Stát	Počet obyvatel (x1000)	Průměrná koncentrace PM _{2.5} (μg/m ³)	Předčasná úmrtí
Rakousko	8 507	12,9	5 570
Belgie	11 181	13,7	8 340
Bulharsko	7 246	24	13 620
Chorvatsko	4 247	15,6	4 430
Kypr	1 172	17	600
Česká republika	10 512	18,6	10 810
Dánsko	5 627	11,6	3 470
Estonsko	1 316	8,7	750
Finsko	5 451	7,4	2 150
Francie	63 798	11	34 880
Německo	80 767	13,4	66 080
Řecko	10 927	17	11 870

Maďarsko	9 877	17,3	11 970
Irsko	4 606	9	1480
Itálie	60 783	15,8	59 630
Lotyšsko	2 001	14,1	2 190
Litva	2 943	15,5	3 350
Lucembursko	550	11,9	230
Malta	425	12	220
Nizozemsko	16 829	13,8	11 200
Polsko	38 018	23	46 020
Portugalsko	9 919	8,7	5 170
Rumunsko	19 947	17,5	23 960
Slovensko	5 416	19,1	5 160
Slovinsko	2 061	15,1	1 710
Španělsko	44 229	10,7	23 180
Švédsko	9 645	7,6	3 710
Spojené království	64 351	11,6	37 600
Andora	77	10	40
Albánie	2 896	16,5	1 670
Bosna a Hercegovina	3 827	15,3	3 450
Makedonie	2 066	27,4	3 060
Island	326	6,6	80
Kosovo	1 805	26,4	3 290
Lichtenštejnsko	37	9	20
Monako	38	12,9	20
Černá Hora	622	15,6	550
Norsko	5 108	7,2	1 560
San Marino	33	13,5	30
Srbsko	7 147	21,5	10 770
Švýcarsko	8 140	11,6	4 240
Celkově	53 4471	14,1	428 000
Celkově EU	50 2351	14,0	399 000

Z tabulky 2.2 lze vidět, že v České republice zemřelo v roce 2014 vlivem částic $PM_{2.5}$ v ovzduší 10 810 lidí. Pro porovnání, ve stejném roce zemřelo při nehodách na silnicích v České republice 629 lidí.

2.2 Vliv na životní prostředí

Mimo negativní vliv na lidské zdraví mají částice PM také negativní vliv na životní prostředí.

PM částice mají různé chemické složení a různé velikosti podle svého původu. Tyto skutečnosti se pak projevují nejen na zdravotních vlivech, ale také na vlivech na životní prostředí (u životního prostředí je nicméně vliv velikosti méně důležitý, než tomu je u zdravotních vlivů). Například přírodní částice (přírozně suspendovaný prach, pyl) nemají zásadní vliv na životní prostředí, neboť nejsou zpravidla obohaceny dalšími látkami. Naopak částice, které vznikají při spalování fosilních paliv, které mohou být dále obohaceny o nitridy, dusičnany či sírany, budou mít na životní prostředí vliv větší.[40]

2.2.1 Kyselé deště

Oxid siřičitý (SO_2) a oxidy dusíku (NO_x), obsažené v PM částicích, mají za následek jev známý jako kyselé deště. SO_2 a NO_x reagují v atmosféře s vodou a tvoří tak kyseliny. Tyto kyseliny pak společně s vodou spadnou ve formě srážek, které mají pH asi 5,6 (klasický déšť má pH asi 6). pH je číslo od 1-14, které udává, zda látka reaguje zásaditě (vyšší pH jako 7) či kysele (pH menší jako 7). Čím více se blíží limitním hodnotám (pH 1 a pH 14), tím kyselejší, respektive zásaditější, je chování této látky.

Následky kyselých dešťů jsou patrné zejména na stromech, neboť kyselejší půda obsahuje méně živin a stromy tak trpí jejich nedostatkem. Dále pak tyto deště uvolňují z půdy toxické kovy, především hliník, který má negativní vliv na stromy a rostliny obecně. Ve vyšších nadmořských výškách, kde je déšť častější a mlha, která se zde vyskytuje, je také kyselá, pak stromy ztrácí listy či jehlice, které jsou důležité pro absorbování slunečního svitu. Jeho nedostatek pak vede k oslabení stromů a postupnému odumření.[41]

Mimo stromy se pak následky kyselých dešťů projevují také na fauně, žijící ve vodě. Ta má přirozeně pH 7 (říká se, že není ani zásaditá, ani kyselá), vlivem kyselých dešťů pak pH klesá. Ryby, žáby a ostatní zvířata ve vodě nejsou schopna přežít v kyselém prostředí a to pak vede k jejich velkému úhynu.[41]

2.2.2 Znečištění půdy

Toxické látky a kovy, které se vážou na PM částice, například arsen, kadmium či olovo, mají také negativní vliv na životní prostředí, neboť způsobují znečištění půdy, kontaminují vodu a dostávají se do těl živočichů, kteří mohou uhynout, nebo v případě ryb se mohou objevit na lidském talíři a tím pádem se dostanou také do lidského organismu.[8]

2.2.3 Oteplování planety

Černý uhlík (BC) je v současné době skloňován v souvislosti se změnou klimatu a globálním oteplováním, neboť má vysokou schopnost absorbovat solární energii. Tato schopnost se pak projevuje ohříváním atmosféry. Usazený BC má také negativní vliv na odrazení slunečního záření, především pak, pokud se usazuje na sněhu a ledu, neboť ztmaví jejich povrch, což vede právě k nižší schopnosti odrazet sluneční paprsky. To má za následek oteplování sněhu a ledu, což vede k urychlování tání.[43]

2.3 Ochrana

Zvážíme-li všechna možná zdravotní rizika, která byla diskutována v kapitole 1.3, pak je patrné, že je potřeba nějak se proti těmto částicím chránit. Obsahem této kapitoly nebude čištění ovzduší (kterému je věnována samostatná kapitola 4), ale zdánlivě méně podstatné činnosti či možnosti, jak se prachovým částicím bránit.

Plánuje-li člověk samostatné bydlení, či má-li možnost přestěhovat se, pak je vhodné uvažovat nad lokalitou svého budoucího bydliště. Již výše bylo psáno, že větší koncentrace prachových částic jsou v okolí industriálních zón a ve velkých městech. Z ekonomického a sociálního hlediska (pracovní pozice, lepší úroveň života, dostupnější zdravotní péče), lidé volí především bydlení právě ve velkých městech. Ovšem je to na úkor kvality ovzduší. Pokud tedy člověk chce zmírnit negativní vlivy, které znečištěné ovzduší přináší, pak by měl udělat kompromis a zvolit správnou lokalitu svého budoucího domova.

Pokud už člověk bydlí ve městě a má zde práci, rodinu a zázemí, jsou i další možnosti, jak se chránit proti vlivům prachových částic. Pomocníkem, který zamezuje těmto částicím dostávat se do organismu, mohou být především filtrační masky (respirátory), které tvoří bariéru mezi ústy a nosem a okolním prostředím. Někteří lidé si představí pod pojmem filtrační maska spíše roušky, které používají lékaři, a někteří lidé po nich proto sáhnou, pokud se chtějí proti prachovým částicím chránit. Tady nastává ovšem problém, neboť tyto roušky jsou navrženy tak, aby chránili pacienty proti tomu, co vydechne lékař, například různými mikroorganismy či bakteriemi, a opačně prakticky nefungují. Naopak filtrační masky jsou uzpůsobeny právě pro to, aby bránily prachu, aerosolům a dokonce i pylu dostat se do organismu člověka. Je nutné tedy dobře vybrat to, co nás bude chránit.[38]

V době zvýšených koncentrací prachu v ovzduší, především na začátku topné sezony a v průběhu zimy, je vhodné učinit opatření, kterými zamezíme nadměrnému vdechování částic. Mimo použití respirátorů je vhodné a lékaři doporučují omezit pobyt na ulicích, kde jsou vlivem projíždějících automobilů a autobusů koncentrace prachu největší. Současně se doporučuje omezit fyzickou aktivitu, především však tu, která probíhá ve vnějších prostorech, například hraní fotbalu či jogging. Pohyb je samozřejmě zdravý a pravidelný pohyb snižuje riziko vzniku kardiovaskulárních chorob, nicméně souvisí také se zvýšenou spotřebou kyslíku, což znamená, že je potřeba rychleji dýchat. A právě v období špatné kvality ovzduší to znamená jediné- člověk vdechne více prachových částic.[39]

Dalším doporučením odborníků je omezit větrání vnitřních prostor na minimum, neboť při tomto se znečištěný vzduch dostává z vnějších prostor do domácností. Větrání by mělo být pokud možno co nejkratší (3-4 minuty) a z toho důvodu intenzivní (otevřením okna „na ventilačku“ by větrání bylo prakticky k ničemu). Je také vhodnější větrat během poledne či odpoledne (10-16 hodin), poněvadž v době ranní či večerní dopravní špičky je kvalita ovzduší horší.[39]

Další text již souvisí lehce s čištěním ovzduší, nicméně informativně je zde zařazen také.

Mimo výše uvedené možnosti ochrany je důležité se zamyslet nad tím, jestli člověk sám není schopen nějak kvalitu ovzduší ovlivnit, například použitím veřejné dopravy. Pokud by několik desítek lidí jezdilo do práce auty (nejhůře pouze jeden člověk v autě), přestože je možnost se dopravovat veřejnou dopravou, pak je nutné si uvědomit, že auta produkují velké množství plynů a částic, které kvalitu ovzduší dále zhoršují. Z tohoto důvodu se také některá města rozhodla pro velmi chvályhodný krok- je-li na území daného města vyhlášena smogová situace, pak vedení tohoto města, ve spolupráci s dopravním podnikem, který zajišťuje městskou dopravu, dočasně sníží cenu jízdného či dočasně zavedou městskou dopravu zdarma. Tímto krokem se snaží předejít právě tomu, aby lidé zbytečně startovali svá auta. Smogová situace je stav, kdy dochází k mimořádnému znečištění ovzduší a vyhláší ji Smogový a regulační varovný systém, provozovaný Českým hydrometeorologickým ústavem. Důležité je také se zamyslet nad tím, jak a čím bude člověk vytápět domácnost.[42]

3 Legislativa a trendy ve znečištění ovzduší

3.1 Limitní hodnoty částic PM v ovzduší

V předcházející kapitole bylo uvedeno množství negativních vlivů částic PM nejen na lidské zdraví, ale také na přírodu a ekosystém, a byl také uveden pojem smogová situace. Tento pojem úzce souvisí s legislativou, neboť vyhlášení smogové situace se děje na základě překročení určitých imisních hodnot. Tyto hodnoty nejsou zavedeny pouze pro částice PM, ale také pro jiné látky, které ovzduší znečišťují, především pro oxid siřičitý SO_2 a oxidy dusíku NO_x , ale i ozon O_3 či těžké kovy.

V České republice jsou imisní hodnoty stanoveny na základě zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. a vyhlášky o způsobu posuzování a vyhodnocování úrovně znečištění, rozsahu informování veřejnosti o úrovni znečištění a při smogových situacích 330/2012 Sb.

Maximální přípustný průměrný denní limit v České republice pro částice PM_{10} je $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a tato hodnota může být naměřena maximálně 35 krát za rok. Celoroční přípustná průměrná hodnota pro částice PM_{10} je pak $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro částice $\text{PM}_{2.5}$ není zákonem stanovený přípustný průměrný denní limit, za kalendářní rok je přípustný průměrný limit $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro částice PM_1 pak zatím v České republice neexistují limitní hodnoty z důvodu omezeného množství stanic, které koncentraci těchto částic měří.[71]

Vzhledem k faktu, že Česká republika je jedním členských států Evropské agentury pro životní prostředí (z anglického European environmental agency, EEA), jsou maximální přípustné hodnoty částic v České republice, ale také v dalších členských státech EEA, přejaty ze směrnic pro Evropskou unii (anglicky Ambient air quality directive) z roku 2008. EEA má v současné době 33 členských států, všech 28 států EU, dále pak Švýcarsko, Norsko, Island, Lichtenštejnsko a Turecko, a také 6 spolupracujících zemí, především z Balkánského poloostrova a náplní této organizace je shromažďování informací o životním prostředí v Evropě.[15,16]

Ve světě existují samozřejmě další normy, které stanoví příslušné imisní limity. Ve Spojených státech amerických je za tyto normy odpovědná Agentura pro ochranu životního prostředí (z anglického Environmental protective agency, EPA), což je obdoba evropské EEA, v Asii pak AECEN (z anglického Asian Environmental Compliance and Enforcement Network).

Světová zdravotnická organizace (z anglického World health organisation, WHO) taktéž zavedla imisní normy pro jednotlivé druhy polutantů včetně částic PM. Podmínky, stanovené WHO, jsou podstatně striktnější, než podmínky stanovené například EEA. Pro částice PM_{10} je maximální přípustná průměrná denní koncentrace $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ale tato hodnota musí být splněna s percentilem 99, což značí, že může být překročena 3 dny v roce. Přípustná průměrná roční hodnota částic PM_{10} je pak $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pro částice $\text{PM}_{2.5}$ WHO zavádí, na rozdíl od směrnic EU, také maximální přípustnou průměrnou denní hodnotu, která činí $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, opět s percentilem 99. Přípustná průměrná roční hodnota je pak $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. [15]

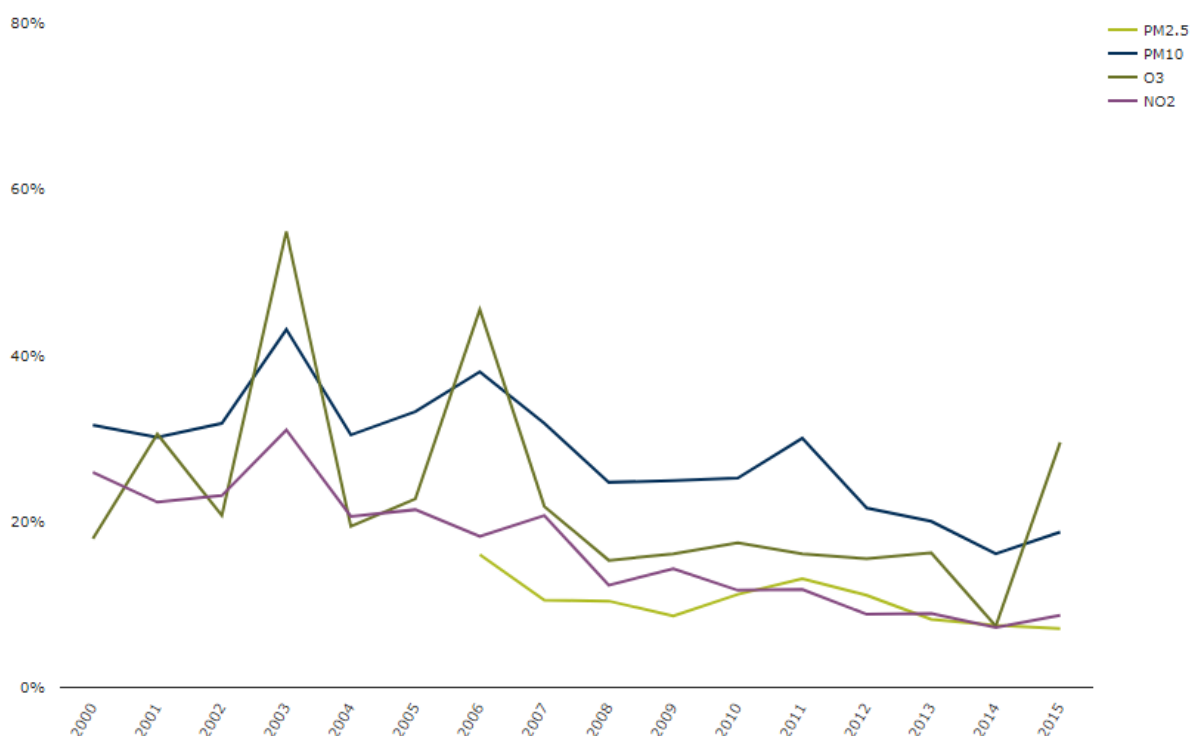
3.2 Vývoj znečištění ovzduší částicemi PM

V dalších kapitolách bude věnována pozornost vývoji ve znečištění ovzduší. Pozornost bude věnována Evropě a pak také České republice.

3.2.1 Evropa

V roce 2015, dle obrázku 3.1, bylo v Evropě vystaveno 18,7 % populace koncentracím PM₁₀ vyšším než je povolená hodnota, stanovená EU (50 µg/m³). Přestože oproti roku 2000, kdy to bylo 31,6 % evropské populace, jde o značný pokrok, pořád se jedná o vysoké procento.

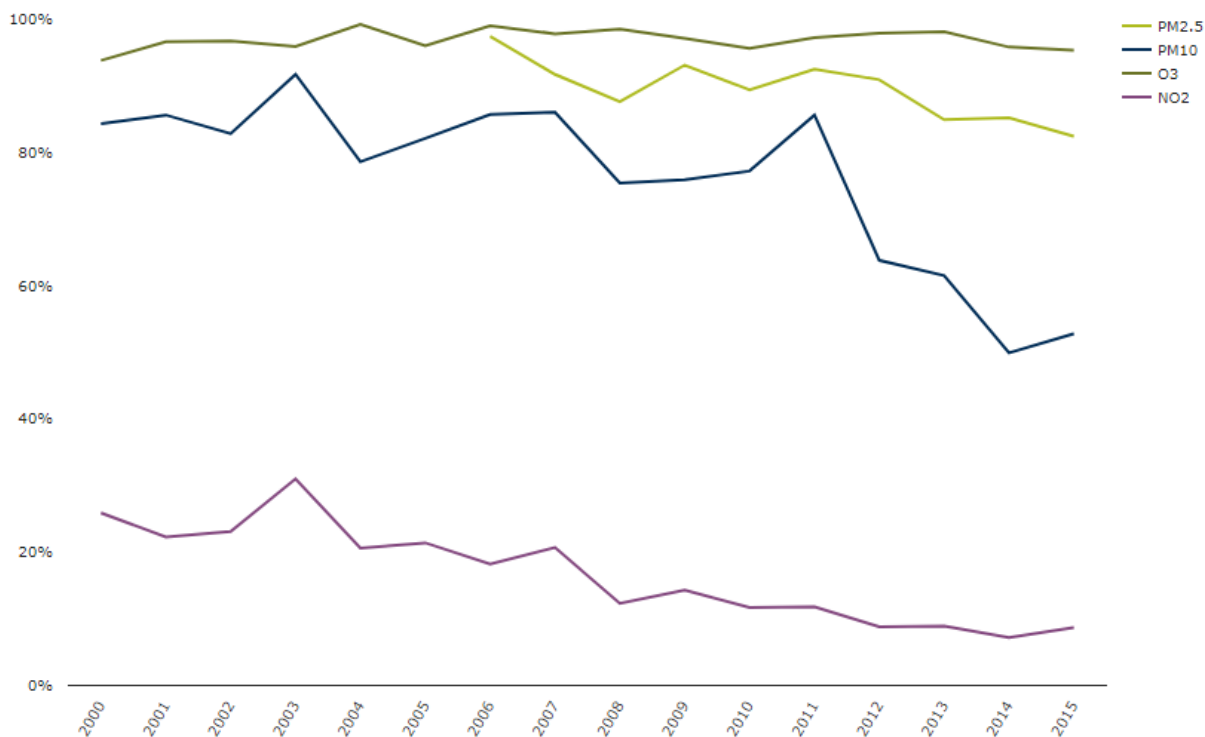
Navíc dle striktnějších limit WHO (20 µg/m³) bylo vystaveno v roce 2015 koncentracím větším než je povolená hodnota 52,8 % obyvatel, v roce 2000 to pak bylo 84,3 %, jak lze vidět na obrázku 3.2. Nejhoršího výsledku dosáhl rok 2003, kdy podle limit EU bylo vystaveno většímu jak povolenému množství 43,1 %, podle limit WHO pak 91,7 %.[72]



Obrázek 3.1: Procento obyvatel Evropy, vystavených hodnotám větším než povoleným EU [72]

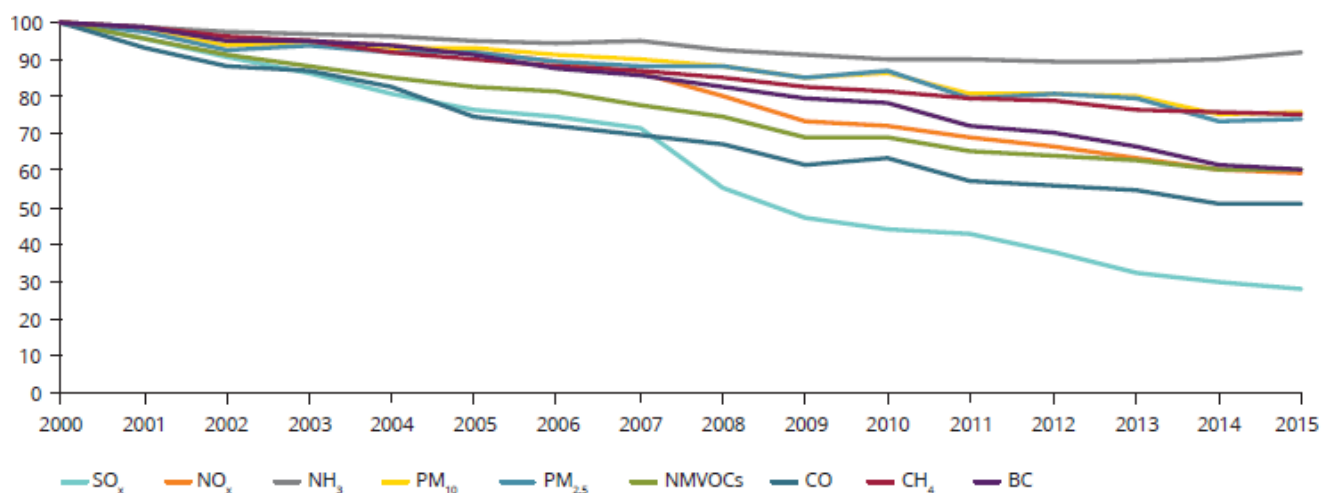
Pro částice PM_{2.5} je sledované období kratší, a to od roku 2006 do roku 2015. V roce 2015 bylo podle limit EU vystaveno koncentracím vyšším, než je povolená hodnota (25 µg/m³), 7,1 % obyvatel Evropy, na počátku sledování, v roce 2006, to pak bylo 16 %, jak ukazuje obrázek 3.1.

Podle striktnějších limit WHO (10 µg/m³) bylo v roce 2015 vystaveno vyšším než povoleným koncentracím 82,4 % obyvatel, v roce 2006 pak 97,4 % obyvatel, jak lze vidět na obrázku 3.2. Rok 2006 také podle obou norem ve sledovaném období vykazoval nejhorší výsledky.[72]



Obrázek 3.2: Procenta obyvatel Evropy, vystavených hodnotám větším než povoleným WHO [72]

Obrázek 3.3 níže ukazuje produkci částic PM_{10} (žlutá křivka) a $PM_{2.5}$ (modrá křivka, která má podobný charakter jako křivka žlutá) od roku 2000 do roku 2015 v 28 státech EU, hodnota 100 na ose y označuje množství emisí v roce 2000. Kromě těchto částic také obrázek 3.3 ukazuje produkci dalších polutantů, jako například oxidů síry, oxidů dusíku, amoniaku či BC. Tyto údaje nejsou pro tuto práci až tak podstatné, neboť se má věnovat především částicím PM v ovzduší, nicméně je pozitivní vidět, že i emise těchto látek vykazují od počátku tisíciletí sestupný trend.

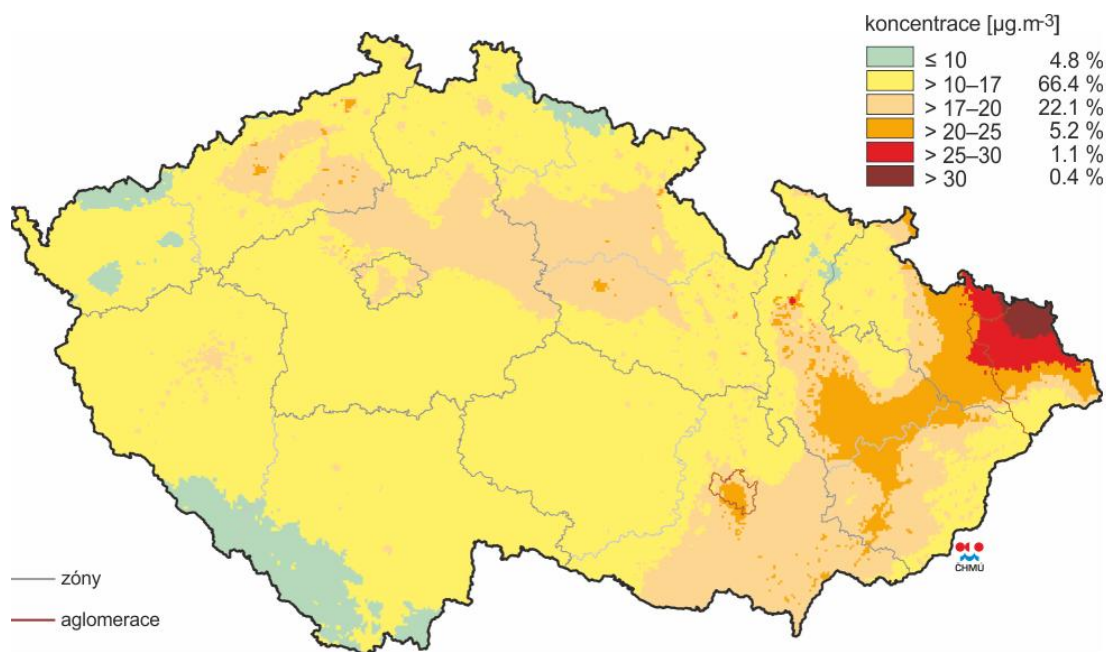


Obrázek 3.3: Vývoj emisí zobrazených polutantů ve státech EU [15]

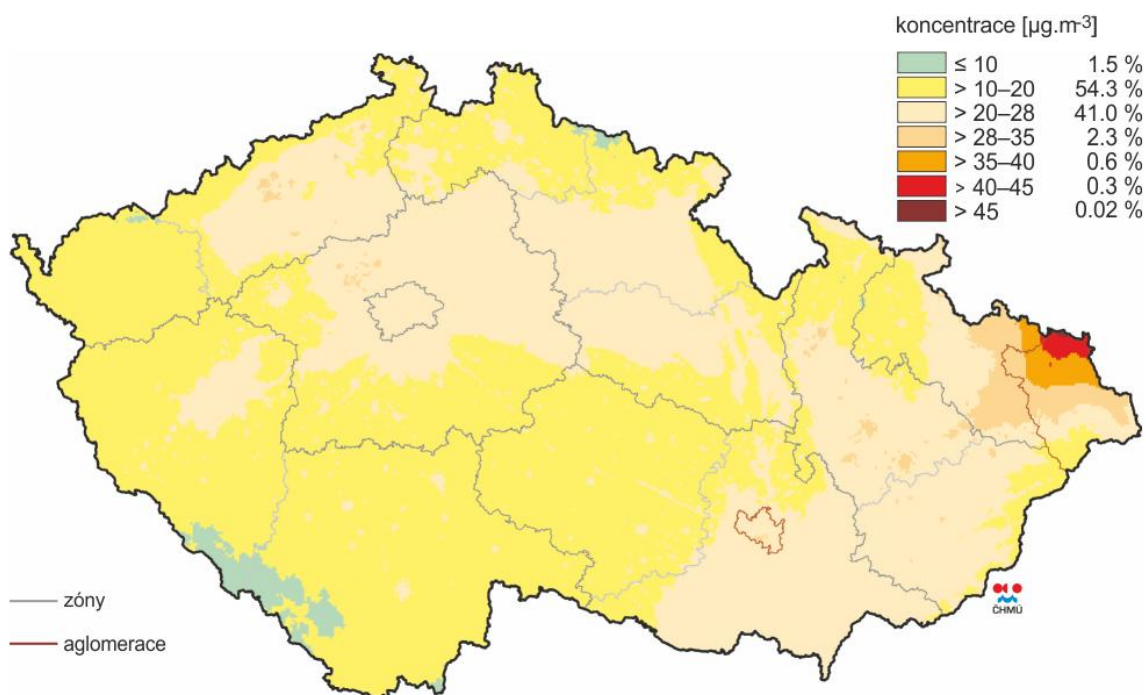
Vysvětlení klesajícího trendu emisí částic PM bude osvětleno v kapitole 4, která se věnuje čištění ovzduší.

3.2.2 Česká republika

Česká republika je ve světě známa především pro výborné pivo, nicméně existuje zde také velmi rozsáhlá průmyslová činnost, například slévárenství, které je zde na vysoké úrovni, nebo také hutnictví a další odvětví průmyslu. Tato rozsáhlá činnost se však projevuje na znečištění ovzduší, zejména v průmyslových regionech. Následující obrázky, zveřejněné ČHMÚ, a text ukáže, o jaké oblasti se jedná.



Obrázek 3.4: Pětiletý průměr ročních průměrných koncentrací $\text{PM}_{2.5}$, 2012-2016[73]



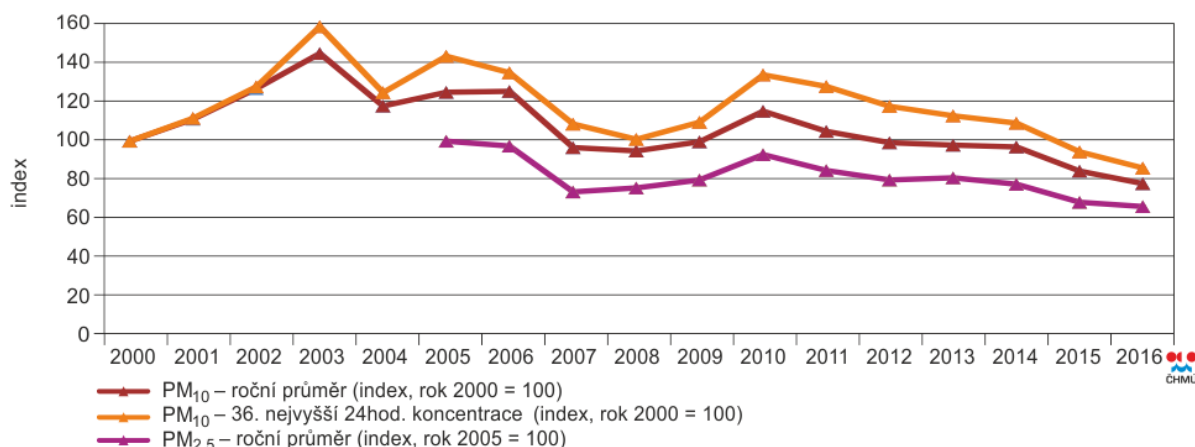
Obrázek 3.5: Pětiletý průměr ročních průměrných koncentrací PM_{10} , 2012-2016[73]

Obrázek 3.4 ukazuje koncentraci částic $PM_{2.5}$ v ovzduší, zprůměrovanou z let 2012 až 2016. Nejhorší kvalitu ovzduší co se týče částic $PM_{2.5}$ vykazuje Moravskoslezský region, především oblast kolem Ostravy, kde je množství průmyslových měst jako Karviná, Havířov, či Třinec. V pravé horní části je legenda, která kvantifikuje průměrnou koncentraci. Lze vidět, že imisní limity (roční) pro $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$) byly v průměru překročeny na 1,5 % území.

Obrázek 3.5 ukazuje podobná data jako obrázek předchozí, avšak pro částice PM_{10} , a to opět pro stejné období od roku 2012 až do roku 2016. Opět lze vidět, že kvalita ovzduší z hlediska koncentrací částic PM_{10} v ovzduší je nejhorší v okolí Ostravy. V legendě v pravé horní části obrázku 3.5 lze vidět, že imisní limity (roční) pro PM_{10} ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) byly v průměru překročeny na zhruba 0,3 % území.

Podobná data, jaká jsou zobrazena na obrázku 3.4 pro $PM_{2.5}$, respektive na obrázku 3.5 pro PM_{10} , pro částice PM_1 ČHMÚ nezveřejňuje. Je to dáno také relativně nízkým počtem stanic, které tuto frakci měří, v roce 2016 byla měřena na 14 stanicích- 4 v Plzni, 4 v okrese Brno-město, 2 v okrese Brno-venkov, 2 v aglomeraci Ostravsko-Karvinsko-Fýdeckomístecko a po 1 v okrese Zlín a Praha. Koncentraci částic $PM_{2.5}$ v témže roce měřilo 81 stanic a u částic PM_{10} to pak bylo stanic 124.[73]

Co se týče samotného vývoje koncentrací částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ v ovzduší na území České republiky, lze pozorovat sestupnou tendenci, podobně jako je tomu na obrázku 3.3 pro státy EU.



Obrázek 3.6: Vývoj koncentrací částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ v ČR [73]

Obrázek 3.6 ukazuje tento vývoj. Hodnoty na ose y znázorňují množství emisí částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ v průběhu let 2000-2016, respektive v průběhu let 2005-2016 pro částice $PM_{2.5}$, v porovnání s počáteční hodnotou těchto emisí (index 100 pro částice PM_{10} v roce 2000, pro částice $PM_{2.5}$ pak v roce 2005). Pro obě sledované frakce se jedná o roční průměr, jak lze vidět také z legendy, umístěné v dolní části obrázku 3.6. Žlutá křivka znázorňuje 36. nejvyšší denní koncentraci, neboť se jedná o první hodnotu, která překračuje limit 35 dnů, kdy mohou být naměřeny vyšší než povolené koncentrace podle směrnice EU.

4 Čištění ovzduší

Vzhledem ke všem problémům, diskutovaným v první kapitole této práce, by bylo samozřejmě ideální, aby žádné věci jako prachové částice, PM, arsen, sírany, kyselé deště a především znečištění ovzduší, vůbec neexistovaly. To je ovšem čistá utopie, neboť, ohlédneme-li od přírodních pochodů či zdrojů, které se na znečišťování ovzduší podílí, pak by se lidé museli obejít bez dopravy, bez vytápění domovů a také bez elektřiny, neboť při všech těchto činnostech se větší či menší mírou do ovzduší dostávají látky, které ho znečišťují.

Je mnoho návrhů a nápadů, které souvisí se snahou zlepšit kvalitu ovzduší. Ať už to je výroba hybridních či elektrických automobilů, které nepoužívají pro pohon naftu nebo benzín, potažmo snaha co nejvíce zefektivnit spalování paliv v motorových automobilech, které tyto paliva používají. Stále častější jsou výzkumy, které se věnují kvalitě paliv, kterými lidé vyhřívají domácnosti, instituce či firmy, existují dotační programy pro občany, kteří si chtějí pořídit kvalitnější kotle, které při spalování produkují méně vedlejších produktů a tím pádem jsou k životnímu prostředí ekologičtější. Existují instituce, které kontrolují velké firmy, zda neznečišťují ovzduší více, než je dovoleno. A existuje mnoho nadšenců, ať už ekologických, či environmentálních, kteří se snaží přimět lídry států, aby tyto státy omezily produkce polutantů.

V současné době se všechny tyto nápady diskutují stále častěji a častěji, nicméně realita je taková, že valná většina aut, která jezdí po světě, využívají k pohonu naftu či benzín. Mnoho lidí si nemůže dovolit kvalitní kotle a místo toho topí nekvalitními palivy v nekvalitních kotlích. Velké firmy a především korporace, které se zabývají těžbou ropy, problematiku životního prostředí příliš neřeší. A jsou dokonce státy, které odstupují od dohod, týkajících se zkvalitňování životního prostředí, mimo jiné Spojené státy americké, které 1. června 2017 odstoupili od Pařížské dohody, která navazovala na Kjótský protokol a kde se státy, které ji podepsaly, zavázaly omezit produkci skleníkových plynů (plyny, které mají za následek jev zvaný skleníkový efekt, který vede k ohřívání planety, především oxid uhličitý).

Všechny tyto skutečnosti tedy vedou k jedinému možnému řešení. Je třeba nějakým způsobem zlepšovat kvalitu ovzduší jeho čištěním. Tato kapitola se bude právě čištěním ovzduší zabývat.

V první kapitole byl uveden vliv jednotlivých sektorů na celkovou produkci částic PM₁₀ a PM_{2.5}. Nejvíce se na této produkci podílí sektor, který zahrnuje vytápění domácností a velmi důležitý je také sektor, který zahrnuje automobilovou dopravu. Proto bude hlavní pozornost věnována právě těmto dvěma sektorům. Mimo čištění ovzduší, které provádí člověk, bude také uvedena skutečnost, že i příroda sama je schopna určitého čistícího efektu.

4.1 Primární čištění

Primárním čištěním se rozumí čištění ovzduší před tím, než dojde k jeho znečištění, což může znít zvláštně. Nicméně tímto čištěním se rozumí snaha o to, ať se do ovzduší dostane co nejméně polutantů. Mezi primární čištění tak patří jednoznačně různé filtry, které se používají v automobilech, či filtry, které se instalují v topných zařízeních. Dále jim bude věnována pozornost.

4.1.1 DPF filtry

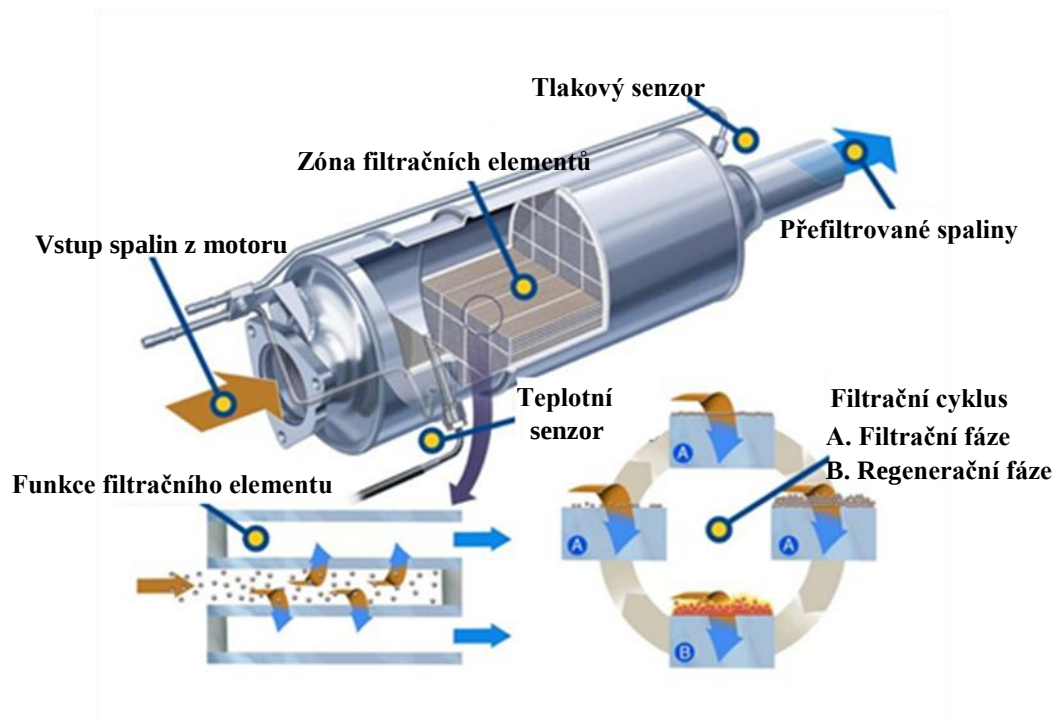
V automobilech, nákladních vozech či autobusech, které používají pro pohon motoru naftu, se používají filtry pevných částic, které bývají často označovány zkratkou DPF filtry (z anglického Diesel particulate filter), méně často se používá také zkratka FAP (z francouzského Filtre a particule). Těmito filtry musí být vybaveno od září 2010 každé nové vozidlo a je vyvíjena snaha, aby motorové dopravní prostředky, které nejsou těmito filtry vybaveny, mizely ze silnic, například v Německu platí zákaz vjezdu těchto vozidel do center měst.[45]

Úkolem DPF filtrů je zachytit prachové částice, které by se jinak dostaly do ovzduší a tím by ho znečišťovaly. Tyto částice se tvoří především jízdou ve městě, neboť jízda není plynulá, dochází k častému brzdění (například na křižovatkách) a poté k rozjezdu. Tento prach se pak usazuje do kanálků DPF filtrů, kde se ho může nahromadit jen určité množství. Poté řidiče upozorní kontrolka, že je filtr plný a je potřeba ho regenerovat.

Ignoruje-li řidič tuto skutečnost, pak u novějších automobilů dojde k jevu, který se označuje jako aktivní regenerace. Pokud čidla, která jsou umístěna ve výfuku, vyhodnotí nutnost regenerace, pak nafta z válce, která postřikuje výfuk, zvýší teplotu nad 600°C a dojde ke spálení prachu. Některé automobily jsou vybaveny kontrolkou, která uživateli oznámí, že dochází k regeneraci DPF filtru. V tom případě se doporučuje nepřerušovat jízdu, aby mohla být regenerace dokončena. To, že probíhá aktivní regenerace, se pozná zvýšenou spotřebou paliva. K aktivní regeneraci také přispívají aditiva, která se míchají s naftou v nádrži, například močovina AdBlue. Tato aditiva snižují teplotu, při které dojde ke spalování sazí. To je důležité především u automobilů, kde nelze DPF filtry umístit blízko motoru (například z konstrukčních důvodů), kde se obvykle tyto filtry nachází. Zvýšení teploty dále od motoru by pak bylo složité, a právě snížení potřebné teploty na spálení sazí použitím aditiv je u těchto automobilů velmi důležité.[45,46]

Aktivní regenerace není jedinou možností regenerace filtru. Při rychlejší jízdě konstantní rychlostí (především na dálnicích) dochází k pasivní regeneraci, kdy vysoká teplota spalin ve výfuku automaticky spaluje saze. Spálené saze mohou však být natolik malé, že projdou DPF filtry a tyto malé částice se pak mohou dostat do ovzduší, a jak bylo uvedeno v kapitole, která se věnovala účinkům na lidské zdraví, právě tyto částice jsou velmi nebezpečné.[45]

Životnost DPF filtrů není samozřejmě nekonečná. Hlavním důvodem, kvůli kterému musí docházet k renovaci (buď koupě nového filtru, nebo vyčištění filtru stávajícího), je přirozené zanesení filtru, uvádí se, že zhruba polovina řidičů je donucena DPF filtry renovovat právě kvůli jejich přirozenému zaplnění. Při spalování sazí v DPF filtru se totiž tvoří jemný popílek, který je dále nespalitelný, a právě ten způsobuje zanesení. Mezi další příčiny pak patří technické závady, či používání nekvalitního paliva, a v neposlední řadě pak styl jízdy. Jak již bylo psáno výše, více částic vzniká při jízdě ve městě, což se projeví na zaplnění DPF filtru. Naopak výhodnější je jízda na vyšší rychlostní stupeň při středních otáčkách motoru, kdy množství vznikajících částic není tak velké.[45]



Obrázek 4.1: Schematický řez DPF filtru [47]

Obrázek 4.1 ukazuje schematický řez DPF filtrem. Spaliny z motoru (žlutá šipka) vcházejí do DPF filtru a nesou s sebou prachové částice. Ty se zachytávají v kanálcích DPF filtrů (část obrázku vlevo dole), které tvoří mřížku. Tato mřížka se vyrábí buď z kordieritu, nebo z karbidu křemíku. V části obrázku vpravo dole je pak zobrazena filtrační a regenerační fáze celého cyklu. Tlakové senzory porovnávají tlak před vstupem do filtru a na výstupu z filtru. Pokud je filtr zanesený, pak se zmenší plocha, kterou prochází spaliny, tím pádem se zvýší jejich rychlost na výstupu, což ale vede ke snížení tlaku. Pokud tento stav senzory detekují, objeví se právě ona kontrolka, která řidiče nabádá k regeneraci filtru. Teplotní senzory naopak sledují, jakou teplotu mají spaliny, a v případě, že je tato teplota nízká, dojde ke zvýšení přítoků aditiv do paliva.[45]

Závěrem této kapitoly je vhodné podotknout, že někteří lidé jsou proti těmto filtrům, protože snižují výkon a jejich pořizovací cena není úplně nejnižší. Někteří lidé proto DPF filtry demontují, což je ovšem zakázáno.

Můj subjektivní názor je, že všechna činnost, která se týká těchto filtrů (pořízení, výměna, čištění) by měly být zdarma. Automobilky se předhánějí, která bude dříve vyrábět elektrické vozy (údajně ekologičtější) či snižují spotřebu paliva, a přitom se neostýchají prodávat či měnit tyto filtry za poměrně vysoké ceny.

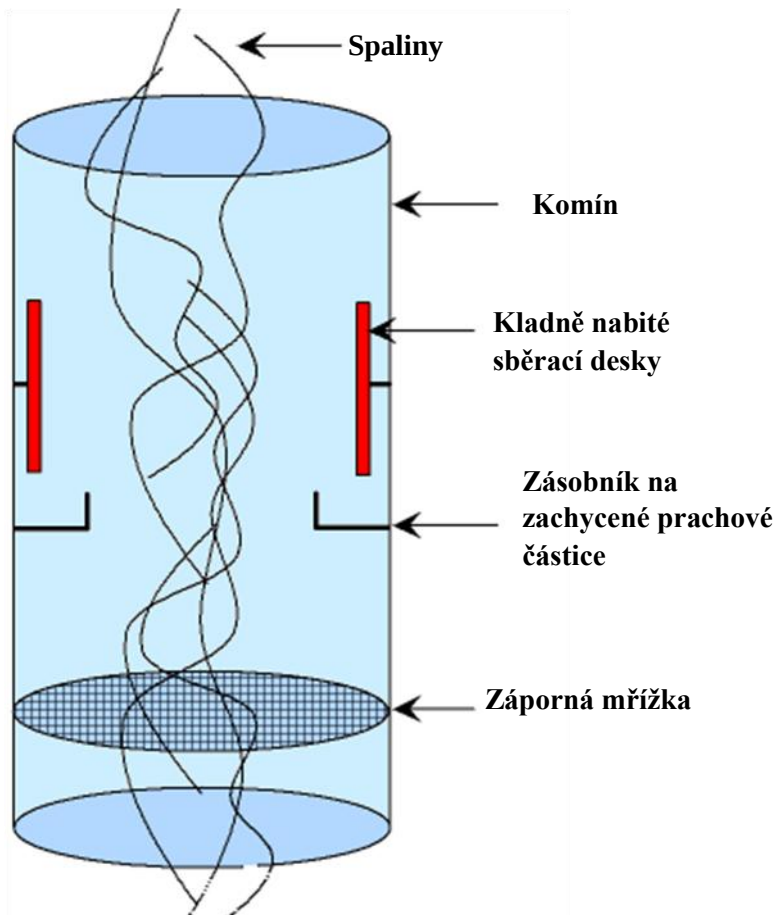
4.1.2 Filtrace v průmyslových zařízeních

V kapitole 1.2.1 byl uveden také vliv průmyslového sektoru na celkovou produkci PM částic, který byl, pro připomenutí, 17 % pro částice PM_{10} a 10 % pro částice $PM_{2.5}$. Tato čísla

jsou poměrně vysoká, proto je potřeba věnovat pozornost také tomuto sektoru a uvést současné trendy, které vedou ke snižování produkce částic PM.

Mezi největší znečišťovatele v průmyslovém sektoru můžeme zařadit hutě, kde se vyrábí železo, a také slévárenská zařízení. V těchto podnicích se totiž při tavení železa a jiných kovů do ovzduší dostávají spaliny, které obsahují množství nečistot, a to nejen PM částic, ale také síranů, oxidů uhlíku či BaP.

Jednou z možností, jak čistit tyto spaliny, je použití elektrostatických odlučovačů (elektroodlučovače), jejichž mechanismus bude vysvětlen na obrázku níže.



Obrázek 4.2: Elektrostatický odlučovač [48]

Spaliny, které proudí ze spodní podstavy válce na obrázku 4.2, který představuje komín, obsahují PM částice. Tyto částice prochází mřížkou, která jim udělí negativní náboj, a dále pokračují komínem do jeho vyústění. V určité části komínu jsou však tyto částice přitáhnuty kladně nabitými sběracími deskami a do ovzduší se dostává jen jejich malá část. Množství částic na kladně nabitě desce stoupá a s tím stoupá i jejich hmotnost. Pokud se nahromadí dostatek částic, kladně nabitě desky je už neudrží a tyto částice spadnou do zásobníku, který se v určitých intervalech čistí.

Tkaninové filtry jsou taktéž hojně používány především v průmyslových zařízeních, kde jednak mohou filtrovat spaliny, které vycházejí z kotle, ale také se mohou používat například v brousárnách, kde se taktéž nachází velké množství prachu a částic brusných kotoučů. Materiálů, které se používají na tkaninové filtry, je značné množství, např. antistatika, skelná

vlákna, či uhlíkové tkaniny. Vhodná volba materiálu, ze kterého budou tyto filtry vyrobeny, je velmi důležitá, neboť jejich účinnost a životnost je dána několika faktory, zejména teplotou a kyselostí prostředí, které tuto životnost zkracuje.[49]

Zařízení, ve kterých se tkaninové filtry používají, fungují tak, že nasávají spaliny a skrze potrubí je vedou právě k těmto tkaninám. Na nich se zachytí nejen prachové částice, ale modernější tkaniny jsou schopny zachytit také BaP či oxid siřičitý. Je-li zaplněna kapacita těchto tkanin, pak se tyto musí čistit, buďto manuálně, nebo proudem tlakového vzduchu. Prach se pak skladuje a putuje k likvidaci.[50,51]

4.1.3 Krby a kotle v domácnostech

Přestože v celoevropském měřítku je sektor zahrnující vytápění domácností nejvíce zodpovědný za produkci PM částic (více v kapitole 1.2.1), podobný nástroj v boji proti znečištění ovzduší, jaký je například u automobilů v podobě DPF filtrů, není v tomto sektoru tak obvyklým, což je pravděpodobně také důvodem, proč právě vytápění domácností má tak negativní vliv na kvalitu ovzduší. Také použití elektrostatických filtrů v každém komínu v každé domácnosti by bylo ekonomicky náročné.

Přesto existují různé možnosti, jak snížit množství emisí, které se uvolňují při spalování paliv v domácích kotlích, či krbech. Prvním nástrojem je přirozeně používání kvalitnějších topných materiálů a používání kvalitnějších spalovacích zařízení. U krbů se například používají filtry, které se umístí do kouřovodů, kterými proudí spaliny, a tím snižují množství částic a sazí, uvolňujících se do ovzduší. Zanášení těchto filtrů však snižuje tah komínu, což má negativní vliv na teplotu ve spalovací komoře, která klesá. To se projevuje nesprávným hořením dřeva, které hoří pomalu a tvoří se typický černý dým, který je pak nešetrný vůči samotnému spalovacímu zařízení. To je také jeden z důvodů, proč se musí tyto filtry často čistit, a také samotný komín, kterým pak spaliny odchází do venkovního prostředí, musí být často od sazí a jemného popelu čištěn. Velký tah komínu je však také nežádoucí, neboť zvyšuje spotřebu paliva a je nešetrný vůči celému spalovacímu zařízení.[64]

U kotlů na tuhá paliva (dřevo, pelety, biomasa) existuje pojem emisní třída, která je, dle ČSN EN 303-5, přiřazována kotlům na základně spalovacích zkoušek a která hodnotí jeho technologickou vyspělost, a to nejen z hlediska účinnosti či bezpečnosti daného zařízení, ale také, což je pro tuto práci podstatnější, z hlediska tvorby škodlivých emisí. Těchto tříd je v současné době 5, a platí, že kotel emisní třídy 1 dosahuje nejhorších výsledků a naopak s emisní třídou 5 nejlepších výsledků. Právě použití kotlů páté skupiny je proto vhodným nástrojem pro snižování emisí PM částic, což vede ke snížení potřeby čištění ovzduší, naopak používání kotlů první a druhé emisní třídy je již od 1. ledna 2014 zakázáno.[65,66]

4.2 Sekundární čištění

I přes veškeré snahy o to, aby se částice PM do ovzduší neuvolňovaly, tomuto jevu nelze zabránit a do ovzduší se dostává velké množství nejenom prachu, ale také různých chemických sloučenin. Je tudíž nutné, aby se již znečištěné ovzduší čistilo. Tento jev se označuje jako sekundární čištění. V podkapitolách níže bude uvedeno především čištění vzduchu v interiéru (domácnosti) a ovzduší v exteriéru (venkovní prostory).

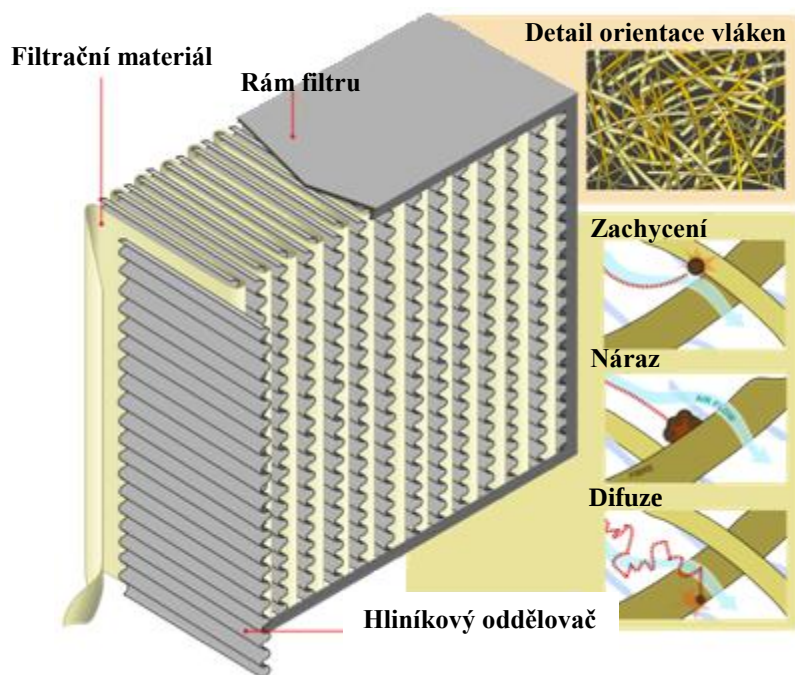
4.2.1 Čištění vzduchu v domácnostech

Doma tráví člověk podstatnou část svého života, a proto se většina lidí snaží, aby domácnost byla čistá, útulná a aby byla pokud možno dokonalá. S tím souvisí i kvalitní

vzduch. Existuje mnoho zdrojů, ze kterých se do ovzduší v domácnostech uvolňují PM částice, například zapálená svíčka, či různé spreje jako například lak na vlasy či antiperspiranty, nebo také při běžném vaření. V domácnostech, kde se kouří cigarety, jsou právě tyto zdrojem PM částic. A v neposlední řadě se do domácností dostává při větrání také znečištěný vzduch z exteriéru.[52]

Na čištění vzduchu v domácnostech od PM částic lze použít dva typy filtrů, které se liší principem. První skupinou jsou mechanické čističe, nasávající znečištěný vzduch, který se zachytí na filtračním materiálu. Postupným usazováním dalších částic se snižuje výkonnost filtru, dochází k tlakovým ztrátám a je tedy nutné filtry měnit. Druhou skupinou jsou pak čističe, které pracují na fyzikálně-chemických principech, především principech elektrostatického náboje a ionizace. [52]

Nejznámější čističe vzduchu jsou pravděpodobně HEPA filtry (z anglického High efficiency particulate air filters). První HEPA filtr byl vyroben ve čtyřicátých letech 20. století v souvislosti s projektem Manhattan, při kterém se Američané snažili vyrobit atomovou bombu, a tyto filtry měly sloužit k zachytávání velmi jemných radioaktivních částic. HEPA filtry musí splňovat velmi striktní podmínky - zachytit 99,97 % částic větších jak 0,3 mikrometrů. [53,54]



Obrázek 4.3: Princip HEPA filtru [55]

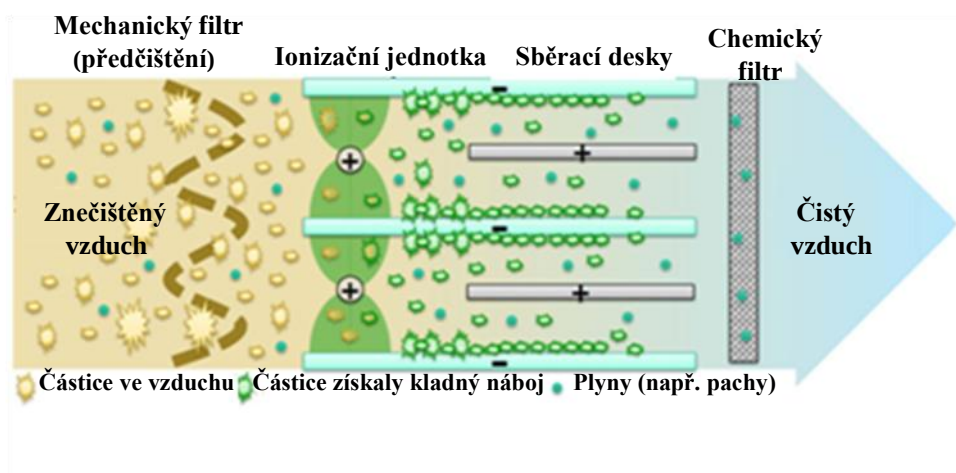
HEPA filtr si lze zjednodušeně představit jako několik vrstev náhodně orientovaných vláken o průměru 0,5 až 2 mikrometry, které jsou uloženy v rámu, jak ukazuje obrázek 4.3. Tyto jednotlivé vrstvy jsou odděleny separátory.

Princip HEPA filtrů spočívá v zachycení částic, které jsou unášeny vzduchem skrze tyto filtry. Obrázek 4.3 ukazuje tři základní mechanismy tohoto procesu. Zachycení se týká zpravidla středně velkých částic. Vzduch obtéká jedno z vláken (modrá šipka na obrázku), částice sleduje trajektorii vzduchu a v určitém okamžiku, kdy se dostane na krátkou

vzdálenost, k vláknu přilne. Náraz se týká zpravidla větších částic, které díky své hmotnosti nesledují trajektorii vzduchu, který obtéká vlákno HEPA filtru. Tento mechanismus je podpořen zvýšením rychlosti proudění vzduchu. Naproti tomu difuze je typická pro menší částice a je dominantní při nižších rychlostech proudění vzduchu.[53,54,55]

V současné době se u filtrů stále častěji používá aktivní uhlí. Nejedná se zpravidla o celé filtrační zařízení, které by bylo vyrobeno z aktivního uhlí, ale například filtrační vložky, které se používají společně s HEPA filtry či jinými čističi vzduchu. Výhodou těchto filtrů je jejich velká aktivní plocha- jeden gram aktivního uhlí může mít plochu 500 m² a větší, což má pozitivní efekt na množství částic, které se na filtr zachytí. Výhodou u těchto filtrů je i fakt, že jsou schopny čistit ovzduší od pachů.[56]

Elektrostatické odlučovače (elektroodlučovače) jsou zástupcem čističů vzduchu, které využívají princip elektrického náboje.



Obrázek 4.4: Princip elektrostatického odlučovače [57]

Základní princip elektroodlučovače je uveden na obrázku 4.4. Vzduch, obsahující velké množství částic, prachu, ale i alergenů či bakterií, proudí ve směru modré šipky (vpravo). V první fázi prochází mechanickým filtrem, který odfiltruje velké částice, případně vlasy či chlupy domácích mazlíčků, čímž pádem zvyšuje životnost samotného elektrostatického odlučovače. V druhé fázi dochází k nabití částic na stejný kladný náboj v ionizační jednotce. Za ionizační jednotkou se nachází záporně nabitě sběrací elektrody, které přitahují kladně nabitě částice. V poslední fázi pak prochází vzduch skrze chemický filtr, který zachycuje především plynné částice, nebo také pachy. Účinnost elektrostatických odlučovačů je ovlivněna čistotou sběracích elektrod a velikostí částic.[57,58]

Princip ionizace, který se uplatňuje v elektrostatických odlučovačích, může sám o sobě fungovat také jako čistič vzduchu a tato technologie se označuje jako technologie záporného iontu. Většina částic, které se v ovzduší vyskytují, jsou zpravidla kladně nabitě. Ionizační jednotka naopak vytváří záporně nabitě ionty. Kladně nabitě částice (prach, pyl, PM) se magnetickými silami navážou na záporné ionty. Je-li v ovzduší dostatečně velké množství záporných iontů, pak se tvoří velké shluky částic, což vede ke zvětšení hmotnosti těchto shluků, které již nejsou schopny poletovat ve vzduchu a dopadnou na zem, či na různé předměty v místnostech. Z nich jsou pak očistěny, například vysáním, či utřením.[59]

Kvalita vzduchu v domácnostech není ovlivněna pouze přítomností PM částic nebo prachu. Negativní vliv mohou mít také různé chemické látky, které se uvolňují například z čisticích prostředků, či z lepidel nebo laku na parketách. Dále to pak mohou být různé pachy, které se mohou ve vzduchu vyskytovat, jejichž vliv na zdraví je diskutabilní. A v neposlední řadě se v ovzduší může vyskytovat značné množství mikroorganismů, ať už virů, nebo bakterií, u kterých může být vliv na lidské zdraví více či méně závažný.

Čištění ovzduší od těchto látek je odlišné oproti čištění od pevných částic. Přestože je tahle práce věnována právě pevným částicím, je vhodné uvést alespoň jednu z možností čištění vzduchu od těchto částic, a to UV záření (z anglického Ultra Violet, ultra fialové záření), které se často používá v kombinaci s HEPA filtry, neboť samotné UV záření není schopno zachytit PM částice. Technologie UV záření je však velmi účinná proti virům či bakteriím, které jsou jedním z původců pachů v domácnostech. V mikroorganismech, které jsou vystaveny UV záření, dochází k buněčným a genetickým změnám, což vede k jejich zničení. Účinnost tohoto procesu je dána dobou, po kterou jsou mikroorganismy tomuto záření vystaveny, a také příkonem, který je dodáván UV lampě. Výhodou samotné technologie UV záření je fakt, že není přítomen žádný filtr, na kterém by se zachytával nečistoty, jako je tomu u HEPA filtrů či u sběracích elektrod elektrostatického odlučovače, čímž pádem odpadá potřeba čištění a možnost sekundárního znečištění. Naopak nevýhodou tohoto procesu je fakt, že některé přístroje produkují ozon, který sice účinně ničí bakterie, nicméně má negativní vliv na lidské zdraví.[60]

4.2.2 Čištění ovzduší v exteriéru

Přestože většina lidí netráví na ulicích, v parcích či veřejných prostorech tolik času jako v domácnosti, z hlediska globálního je právě čištění ovzduší na těchto místech významnější, neboť drtivé množství polutantů se nachází právě v těchto místech.

Podobně jako v domácnostech, i ve venkovních prostorech se často využívá HEPA filtrů, ionizačních přístrojů, či UV záření, ale dále se využívají i některé postupy, které nelze moc úspěšně aplikovat v domácnostech. Níže budou popsány některé ze zajímavých projektů, které pomáhají v boji proti znečištěnému ovzduší.

Jedním z nejzajímavějších projektů na zlepšení kvality ovzduší je ten, který byl zahájen v září roku 2015 v Nizozemsku, v městě Rotterdam, a který dostal příhodný název-Smog free, neboli Bez smogu. Zakladatelem tohoto projektu byl Daan Roosegaarde, jehož Studio Roosegaarde spolu s ENS Technology (z anglického Environmental nano-solutions Technology) vytvořilo také první Smog Free Tower. [62]



Obrázek 4.5: Smog free tower [61]

Jak již napovídá název, ale i obrázek 4.5, Smog free tower je zařízení, připomínající výškovou budovu, vysoké asi 7 metrů. Proces čištění ovzduší probíhá podobně, jako je tomu v případě elektrického odlučovače a současně i ionizátoru. Smog free tower ve svém okolí vytváří ionizační pole, které nabije částice na stejný kladný náboj. Tyto částice jsou pak nasáty sacím systémem dovnitř tohoto přístroje, kde se nachází záporně nabitě sběrací desky, na nichž se částice zachytí. Tímto postupem je Smog free tower schopná za hodinu pročistit až 30 000 m³ vzduchu, přičemž spotřeba elektřiny je u tohoto zařízení podobná jako u varné konvice, přesněji 1170 wattů.[62,63]

Ze sběracích desek jsou pak částice mechanicky odděleny a autoři projektu se je rozhodli dále využívat. Lisováním za zvýšených teplot vytváří geometrické útvary, které pak používají na tvorbu prstenů (originální název je Free smog rings), které pak prodávají a za utržené peníze dále pracují na svých projektech, v současné době například Studio Roosegaarde pracuje na bicyklu, který bude mít nainstalováno filtrační zařízení, díky němuž bude cyklista, řídící toto kolo, dýchat čistší vzduch.[62,63]

V neposlední řadě pak lze zmínit ještě další dvě zajímavé možnosti, kterými lze snižovat koncentrace prachových částic v ovzduší. Jednou z nich je rozstřikování vody do ovzduší, což je způsob čištění ovzduší, který lze spatřit ve velkých městech v Indii v období extrémních smogových situací. V Číně je pak snaha vyvolávat uměle srážky, které také snižují koncentrace částic PM v ovzduší, vpravováním chemikálií do ovzduší, například jodidem stříbrným, který údajně reaguje v ovzduší a způsobuje srážky. Druhou možností, jak snižovat koncentrace částic PM v ovzduší, je pak výsadba stromů, které také zlepšují kvalitu ovzduší.

Jak jsou schopny stromy čistit ovzduší od prachových částic a jak déšť snižuje koncentrace těchto částic v ovzduší je vysvětleno v následující podkapitole.

4.3 Přírozené čištění ovzduší

Přestože příroda sama je také zdrojem prachu a částic PM, je také schopna tyto částice určitým způsobem z ovzduší filtrovat a tím zlepšovat jeho kvalitu.

Nejjednodušším nástrojem, který je spojen s čištěním ovzduší od pevných částic přírodní cestou, je jejich usazování. Tato schopnost je ovšem ovlivněna, jak bylo psáno již dříve, velikostí těchto částic- větší částice (PM_{10}) se usazují lépe než částice menší ($PM_{2.5}$, PM_1), které se nemusí usadit vůbec. Problémem tohoto pochodu je také možnost znovu zviření již usazených částic, označováno jako sekundární prašnost.

Usazování částic dále ovlivňuje také déšť. Mezi srážkami a koncentrací částic PM v ovzduší existuje negativní korelace, což značí, že zvyšování jednoho parametru má za následek snížení parametru druhého, jinými slovy se zvětšujícím se počtem srážek dochází ke snižování koncentrace částic PM v ovzduší.[67]

Samotné proudění a rychlost vzduchu jsou z hlediska koncentrací částic PM v ovzduší také podstatnými faktory. S rostoucí rychlostí větru koncentrace částic PM_{10} a $PM_{2.5}$ v ovzduší klesá.[68]

Stromy, ať už jehličnaté, nebo listnaté, jsou velmi důležitým nástrojem, kterým příroda bojuje proti znečištěnému ovzduší. Známý jsou především svou schopností přeměňovat oxid uhličitý na kyslík, což je přírozené také pro rostliny. Stromy jsou nicméně také účinné proti pevným částicím. Listy i jehlice mají voskový povrch, na kterém se částice mohou zachytit, dále obsahují množství pórů, které také zachytávají tyto polutanty. Samotné kmeny či větve jsou také schopny pohltit pevné částice, především pak stromy jehličnaté, které obsahují pryskyřici a jejichž povrch tyto částice lépe zachytává. Zachycené polutanty jsou pak v případě deště spláchnuty a vsáknuty do půdy. Přestože se jedná o poměrně jednoduchý princip čištění ovzduší, je také velmi účinný. Podle práce Davida J. Nowaka [70], která se zabývala právě otázkou vlivu stromů na čištění ovzduší v různých městech Spojených států amerických, vyšlo najevo, že v Atlantě (hlavní město státu Georgie) stromy každoročně zachytí asi 64,5 tun částic $PM_{2.5}$. [69]

5 Měření velikosti a koncentrací částic PM

V předchozích kapitolách byly zmíněny pojmy jako vysoké koncentrace, limitní množství, či velikost částic PM. Ať už z hlediska vlivů na zdraví člověka, nebo v souvislosti s legislativou, či v souvislosti se samotným dělením částic. Bylo také zmíněno, kolik existuje v České republice stanic, měřících koncentrace částic PM. Otázkou však zůstává, jak se tyto koncentrace, potažmo velikosti částic PM, měří. Tato kapitola se bude této problematice věnovat.

5.1 Měření velikosti

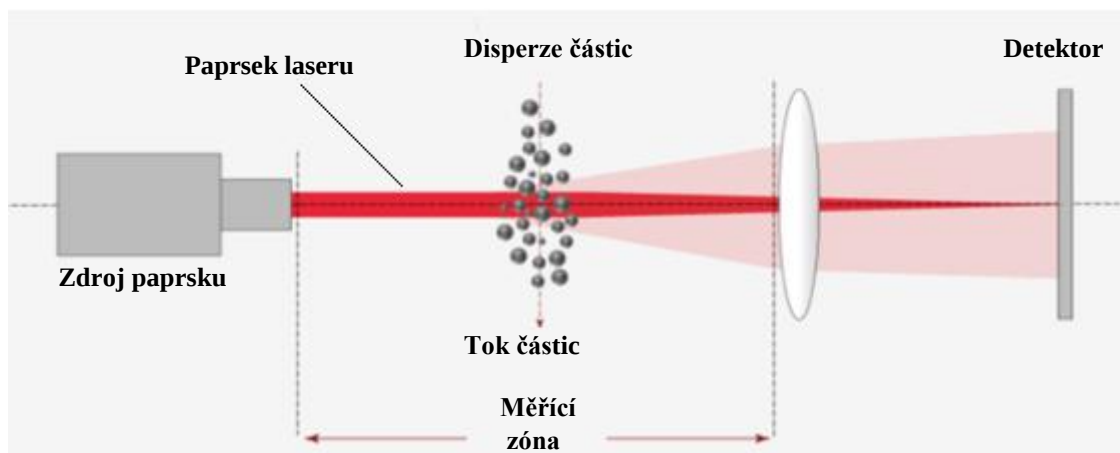
Historie měření, ať už rozměrů, hmotnosti, času či teploty, je dlouhá a stále více se vyvíjí s pokračující dobou, jak stoupají požadavky na přesnost měření. Nicméně tato kapitola se zajímá jen jedním z těchto čtyř parametrů. Pro měření rozměrů lidé dříve používali primitivní nástroje, například počet kroků, nebo porovnávali délku podle určitých objektů. Na základní škole každý člověk používá pravítka, a na nižších stupních se většinou spokojí s centimetrovým měřítkem. Později člověk objeví kouzlo milimetru, a rozhodne-li se jít například na technickou školu, zjistí, že existují nástroje jako mikrometr či kalibry, které jsou velmi přesné a v době vysokých požadavků na přesnost rozměrů se stávají elementárními.

Jak již bylo uvedeno dříve, pro PM_x mluvíme o částicích menších než x mikrometrů. Je tedy jasné, že použití pravítka na změření velikosti těchto částic by bylo k ničemu. A stejně tak použití mikrometru na měření velikosti částic je problematické. 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 grafy, či distribuční křivky velikostí částic.

5.1.1 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 0,2-2000 mikrometrů (2 mm) a tato metoda může být použita jak pro měření částic ve formě suchého prášku, tak ve formě aerosolů či emulzí.[77]



Obrázek 5.1: Princip laserové difrakce [76]

Obrázek 5.1 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.[77]

5.1.2 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 nej přesnější. 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.[78]

5.1.3 Další metody

Mimo předchozí metody existují i další metody, kterými lze měřit velikost částic, některé budou uvedeny níže.

Obrazová analýza spočívá 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.

Podobně jako je tomu u laserové difrakce, která využívá k měření velikosti částic světlo, lze k tomuto měření použít také zvuk a tato metoda se označuje jako akustická spektroskopie. 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, získáváme distribuční graf velikosti částic.[78]

5.2 Měření koncentrací

Imisní limity, které byly uvedeny v kapitole 3, jsou udávány v mikrogramech na metr krychlový. Hmotnost je ovšem pouze jednou ze tří možností, jak lze tyto koncentrace kvantifikovat. Další možností, jak určit koncentraci částic PM v ovzduší, je pomocí počtu těchto částic v určitém objemu, zpravidla centimetru krychlovém. A v neposlední řadě lze měřit koncentraci pomocí plochy povrchu.

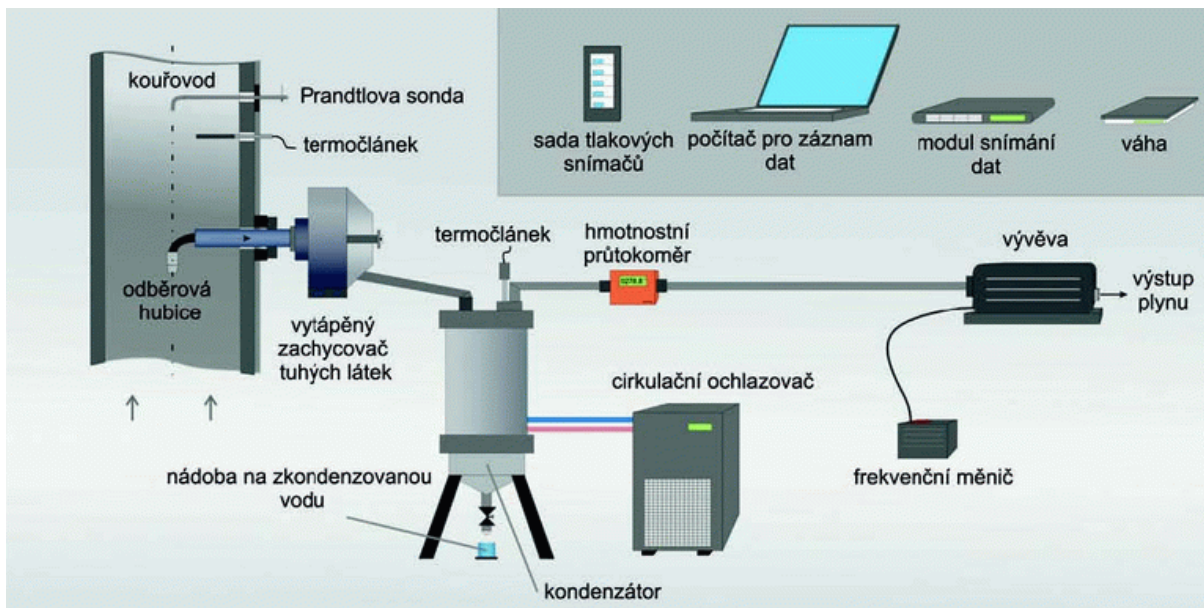
Přístroje, které měří koncentraci částic PM v ovzduší, jsou zpravidla vybaveny také nástroji, které jsou schopny měřit velikost částic. Existují také indikátory, které jsou schopny uživatele pouze informovat o tom, zda jsou v ovzduší částice PM, nicméně nic neříkají o jejich velikosti. To představuje problém, protože pro zjištění, zda dochází k překročení

imisních limitů, potřebuje uživatel vědět, jak velké částice měří, aby byl schopen údaje o jejich koncentraci porovnat právě s imisními limity.

Metod, používaných k měření koncentrací částic v ovzduší, je velké množství. Některé z nich budou uvedeny níže.

5.2.1 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, jak je ukázáno na obrázku 5.2.



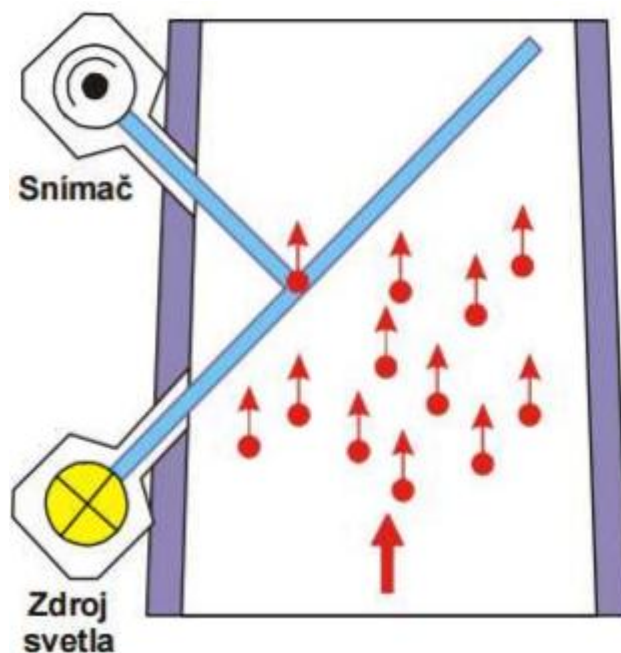
Obrázek 5.2: Princip gravimetrické metody [79]

Princip gravimetrické metody je poměrně jednoduchý. Odběrová trubice nasává vzduch, který obsahuje částice PM a tento vzorek prochází přes vytápěný zachycovač tuhých látek, jak je zobrazeno na obrázku 5.2. Zde se nachází filtr (většinou se používají skleněná vlákna), který zachytí částice PM. Vzorek vzduchu dále pokračuje přes kondenzátor, kde dojde ke zkondenzování vody, která je ve vzorku vzduchu. Za kondenzátorem je pak umístěn 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.[79]

5.2.2 Optické metody

Podobně jako je tomu u měření velikosti částic (respektive distribučních křivek velikostí), i u měření koncentrací částic PM se používají optické metody, které využívají určité schopnosti částic, především však schopnost ohýbat či rozptylovat světelné záření.

Optické prachoměry jsou zařízení, které spadají do kategorie optických metod. Princip této metody je znázorněn na obrázku 5.3 a spočívá ve vyslání paprsku světla ze zdroje, kterým může být LED dioda, nebo laser. Tento paprsek je vlivem částic v ovzduší špatně odražen a zachycen vysoce citlivým snímačem. Porovnáním množství vycházejícího světelného záření a zachyceného záření je určena koncentrace částic.



Obrázek 5.3: Optický prachoměr[80]

Tato metoda má však jeden zásadní problém. Slouží k měření hmotnostních koncentrací v intervalu od $0,1 \text{ mg/m}^3$ do 1000 mg/m^3 , což jsou velmi vysoké hodnoty, které se v běžném ovzduší příliš nevyskytují, a tak pro měření koncentrací částic v ovzduší není příliš použitelná. Spíše se využívá pro měření koncentrací v dýmových plynech či pro měření viditelnosti v kouřovodech.[80]

5.2.3 Další metoda

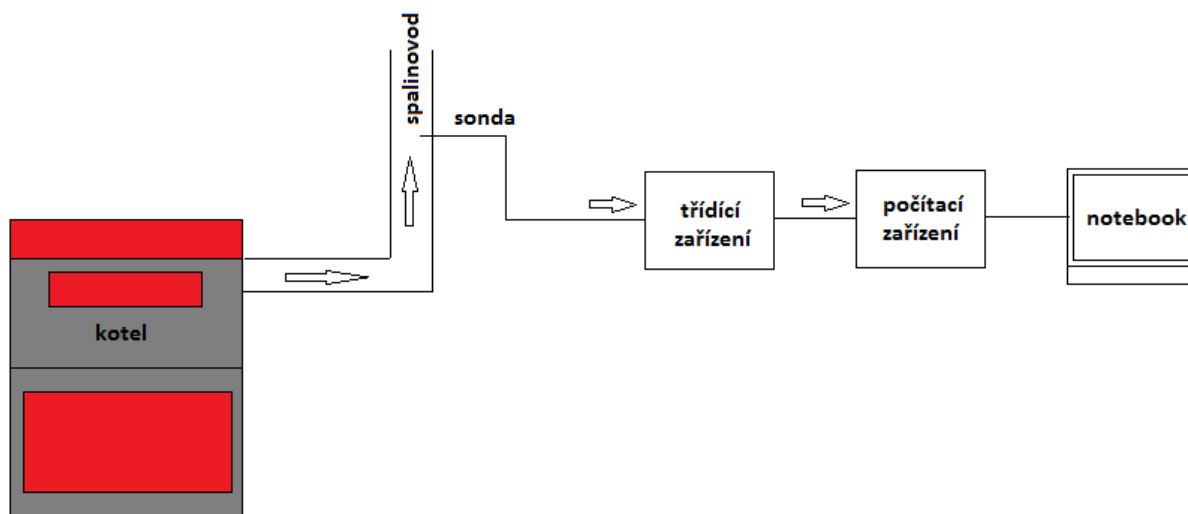
Při určité úpravě lze použít k měření koncentrací částic PM v ovzduší také elektrodlučovače. Důležité je především určit, jaké množství vzduchu projde elektrodlučovačem, tudíž je nutné použít hmotnostní průtokoměr, který se umístí za elektrodlučovač. Po určení hmotnosti částic, které se zachytí na sběracích deskách, se při známém objemu vzduchu, který během měření prošel elektrodlučovačem, lze získat hmotnostní koncentraci částic PM v ovzduší.

6 Praktické měření koncentrace částic PM na spalovacím zařízení

Tato kapitola se věnuje pokusu, který proběhl na spalovacím zařízení v prostorách Fakulty strojního inženýrství na Vysokém učení technickém v Brně. Jednalo se o kontinuální měření určité velikosti částic PM₁, a to konkrétně částice o průměru 95 nm.

6.1 Měřicí okruh

Obrázek 6.1 níže zobrazuje schéma měřicího okruhu, který se skládá z několika přístrojů, jejichž názvy a popis činnosti bude uveden v dalších podkapitolách. Šipky na tomto obrázku ukazují směr proudění spalin, spojení mezi jednotlivými přístroji je pak realizováno pomocí hadic, spojení mezi notebookem a počítačím zařízením je pak pomocí USB kabelu.



Obrázek 6.1: Schéma měřicího okruhu

6.1.1 Automatický kotel na biomasu VERNER A251

Automatický teplovodní kotel VERNER A251, který byl použit při experimentu, patří mezi širokou škálu automatických kotlů, které se dají použít pro vytápění domácích prostor, dílen či různých institucí a firem, a také pro ohřev vody. Výhodou těchto kotlů je, jak již napovídá název, plná automatizace procesu topení.

Palivo (dřevní pelety, obilí, alternativní druhy pelet,...) se vsype do násypky. Násypky mohou mít různý objem a podle tohoto objemu se pak musí palivo dále dodávat. Do spalovací komory je palivo dopravováno šnekovým dopravníkem v určitých intervalech (například plnění probíhá 3 vteřiny a dalších 10 vteřin k plnění nedochází, podle potřeby pak regulátor sám upravuje proces doplňování paliva).

K zapálení a hoření paliva dochází v spalovací komoře automaticky. Spaliny proudí plamencem a výměníkem, kde ohřívají vodu, ochlazené spaliny pak proudí spalínovodem a komínem do ovzduší. Vzduch, který je potřebný ke spalování paliva, je dodáván přetlakovým ventilátorem, a dělí se na dvě skupiny-primární a sekundární. Primární vzduch se přivádí do spalovacího procesu spárami v roštu, sekundární vzduch se pak přivádí otvory v bočních tvarovkách hořáku.

Nespalitelné zbytky paliva jsou pak odvedeny do popelníku pohybem roštnic. Tento proces se nazývá roštování a dochází k němu v předem nastavených intervalech díky zpětnému chodu elektromotoru.[81]



Obrázek 6.2: Kotel VERNER A25

Obrázek 6.2 výše zobrazuje přímo kotel, na kterém měření probíhalo. Na tomto obrázku je také zaznačen spalinovod, do kterého se umístila sonda, kterou pak proudili spaliny skrze hadice do třídícího zařízení a dále do počítačového zařízení.

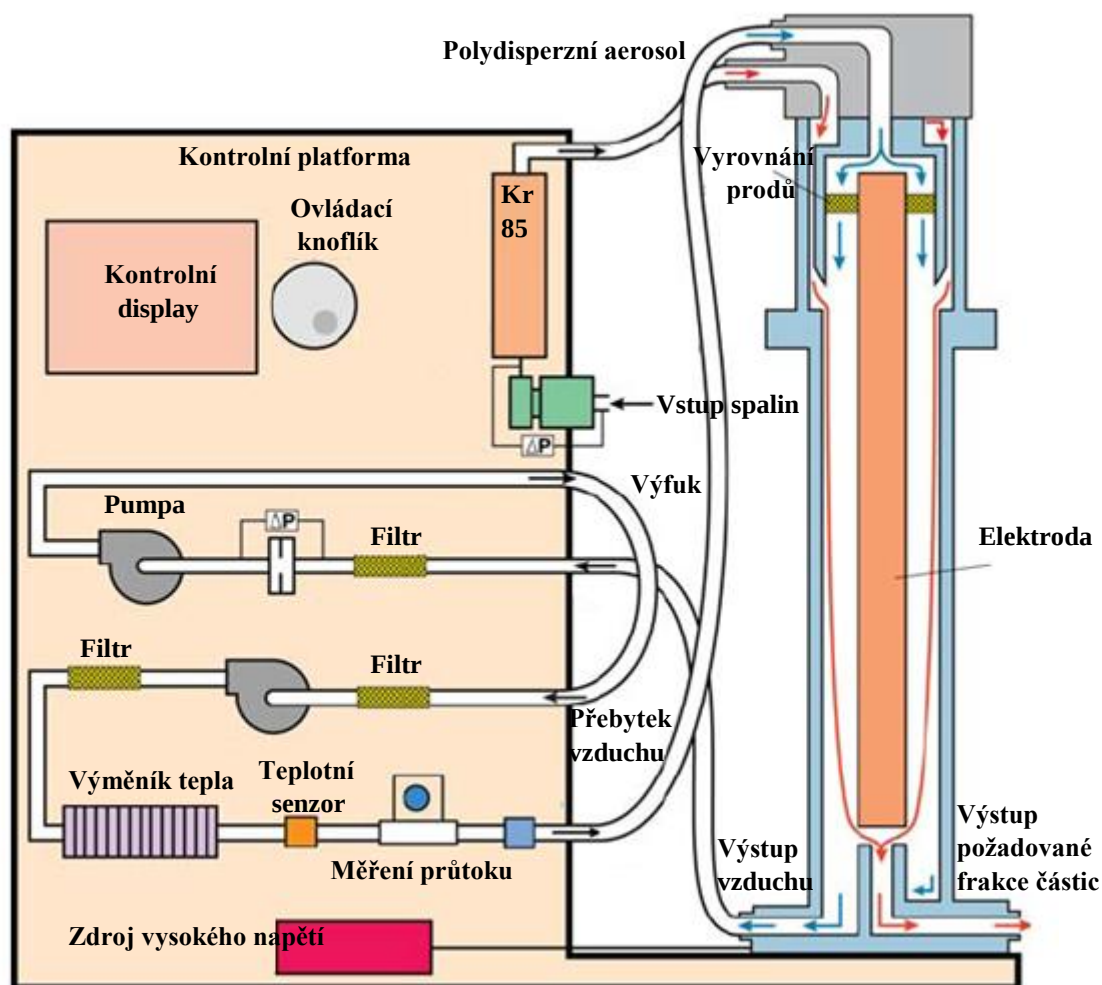
Tabulka 6.1: Parametry kotle VERNER A251 [81]

Jmenovitý výkon	25 kW
Regulovatelnost kontinuálním provozem	7,5 - 30 kW
Regulovatelnost elektronicky řízeným odstávkovým režimem	0 – 7,5 kW
Účinnost	92 %
Spotřeba paliva (při jmenovitém výkonu...)	
-pelety dřevní (17,5 MJ/kg)	5,8 kg/hod
-pelety rostlinné (15,5 MJ/kg)	6,3 kg/hod
-obilniny (14,5 MJ/kg)	6,8 kg/hod
Maximální konstrukční přetlak	0,3 MPa
Objem vodní náplně	60 l
Objem násypky (celkový)	240 dm ³
Teplota spalin na výstupu při jmenovitém výkonu	120 °C
Minimální teplota vratné vody v provozu	60 °C
Celková hmotnost	500 kg
Maximální hladina hluku	54 dB
Předepsaný provozní tah komína	15 Pa

Přívodní napětí	230 V / 50 Hz
Maximální elektrický příkon (při zapalování)	1500 W
Průměrný příkon při provozu	100 W
Druh krytí elektrických součástí	IP41
Třída účinnosti	3
Emisní třída	3
Doba hoření jedné násypky (při jmenovitém výkonu)	28 hod
Hmotnostní tok spalin (při jmenovitém výkonu)	0,016 kg/s
Prostředí (dle ČSN 332000-3)	základní AA5 / AB5
Hmotnost přídavného odpopelovacího zařízení	55 kg
Objem popelnice	60 dm ³

6.1.2 Třídící zařízení Electrostatic Classifier 3080

Toto zařízení od firmy TSI se používá pro oddělení požadované frakce částic z ovzduší nebo ze spalin. Ve spalinách či vzduchu je totiž velké množství různě velikých částic, mluví se o polydisperzním aerosolu. Po procesu oddělení částic určitého charakteru (velikosti) se pak mluví o aerosolu monodisperzním. Hlavní části tohoto zařízení jsou: kontrolní platforma, neutralizační komora a DMA (z anglického Differential mobility analyzer).



Obrázek 6.3: Schéma třídícího zařízení [82]

Spaliny nebo vzduch, které proudí do třídícího zařízení, obsahují, jak bylo psáno výše, velké množství různě velkých částic. Největší částice, které by mohly snižovat životnost samotného přístroje, je proto nutné určitým způsobem odklonit. K tomuto slouží impaktor. Větší částice díky své hmotnosti mají větší setrvačnost, čímž pádem nejsou schopny z hadice přejít pravouhlou zatáčkou do samotného třídícího zařízení, a zachycují se na impaktoru, který je natřen lehkou vrstvou vazelíny, aby lépe zachytával tyto částice.

V kapitole 4, která se věnovala čištění ovzduší, bylo uvedeno, že různé částice mají různý náboj. Je proto potřebné, aby se náboj neutralizoval, k čemuž slouží neutralizátor, konkrétně v tomto případě se jedná o Advanced aerosol neutralizer 3087. Princip neutralizace spočívá v navázání opačně nabitých iontů na částice pomocí rentgenových paprsků, které jsou generovány kryptonem (v obrázku značen ^{85}Kr).

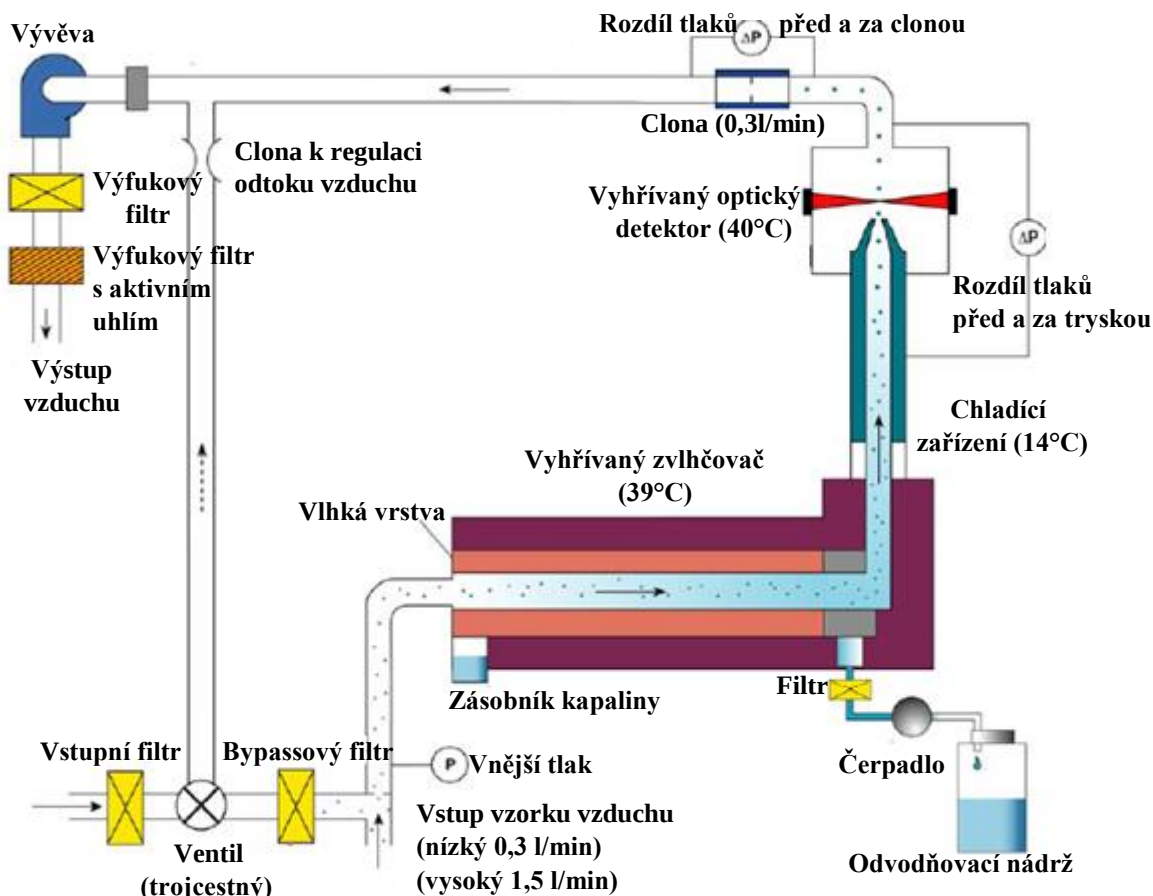
Zneutralizované částice poté pokračují do DMA, konkrétně v tomto případě DMA Long 3081. Jedná se o trubici, ve které se nachází dvě elektrody, které jsou od sebe izolovány. Tyto elektrody generují elektrické pole, jehož intenzitu lze měnit pomocí změny napětí na elektrodě. Na částice, které proudí podél těchto elektrod, působí elektrické pole a tyto částice jsou díky elektrostatické síle přichyceny na středové elektrodě. Zbylé částice pak pokračují výstupním otvorem a vstupují do počítačového zařízení, přebytečný vzduch je pak čištěn a poté znovu použit. To, jaké částice projdou do počítačového zařízení, lze ovlivnit jednak volbou napětí na elektrodách, ale také změnou rychlosti proudění vzduchu, kterým jsou částice kolem elektrod unášeny. Rozsah částic, které lze takto třídit, je od 10 nm do 1000 nm, čili 1 μm . [82]



Obrázek 6.4: Electrostatic Classifier 3080 [82]

6.1.3 Počítací zařízení CPC 3775 (Condensation particle counter)

Stejně jako předchozí zařízení, i toto je výrobkem firmy TSI a jak již napovídá název, jedná se o zařízení, které je schopnou pouze měřit koncentraci částic. Výrobce udává, že je možno měřit koncentrace částic od průměru 4 nm při koncentracích nejvýše 10^7 částic/cm³.



Obrázek 6.5: Schéma počítacího zařízení [83]

Monodisperzní aerosol, který představuje vzorek vzduchu, proudí z třídícího zařízení do počítacího zařízení, a to buďto rychlostí 0,3 l/min (režim low, nízký), nebo rychlostí 1,5 l/min (režim high, vysoký). V případě že je použit režim nízký, zařízení si samo bere dalších 1,2 l/min vzduchu z okolního prostředí přes HEPA filtr, neboť vývěva na konci celého režimu má nastavený konstantní průtok 1,5 l/min, v případě použití režimu vysoký je pak třeba nastavit ventil tak, aby 1,2 l/min vzduchu odtékalo přes vývěvu ven, neboť měřicí zařízení je nastaveno na konstantní průtok 0,3 l/min.

Částice, které vstupují do počítacího zařízení, jsou mnohdy velmi malé a tudíž je potřeba nějakým způsobem zvětšit jejich průměr. K tomuto účelu slouží zvlhčovač, v tomto případě se jedná o butanol. Nádrž s butanolem je umístěna ze zadní strany počítacího zařízení a do této nádrže je vložen knot, který vede do vyhříváného zvlhčovače. Vyšší teplota (39°C) způsobuje odpařování butanolu, který se dostává do proudu vzduchu, ve kterém jsou také částice. Následně dochází k ochlazení proudu vzduchu na teplotu 14°C. Butanol kondenzuje na přítomných částicích, čímž zvětšuje jejich průměr. Přebytné kapky butanolu jsou pak přes filtr a čerpadlo odvedeny do odvodňovací nádrže.

Proud částic, které jsou nyní obaleny butanolem, je unášen k optickému detektoru, který je vyhříván na 40°C proto, aby se předešlo kondenzaci butanolu na částech tohoto přístroje.

Samotný princip měření koncentrací částic pomocí tohoto optického detektoru je prakticky totožný, jako princip laserové difrakce, který byl uveden v kapitole 5 této práce. Pro připomenutí, laserová dioda vytváří paprsek. Tímto paprskem prochází proud částic, čímž dochází k odrazu světla. Citlivé detektory, v tomto případě fotodiody, zachycují paprsky, které jsou odrazeny oproti původnímu směru paprsku. Zachycení částice lze také sledovat na samotném přístroji pomocí zelené kontrolky. V případě, že fotodioda zachytí částici, tato kontrolka blikne a uživatel ví, že právě prošla částice. Proud částic poté pokračuje přístrojem dále k vývěvě, skrze soustavu filtrů, do okolního prostředí.[83]

6.1.4 Notebook

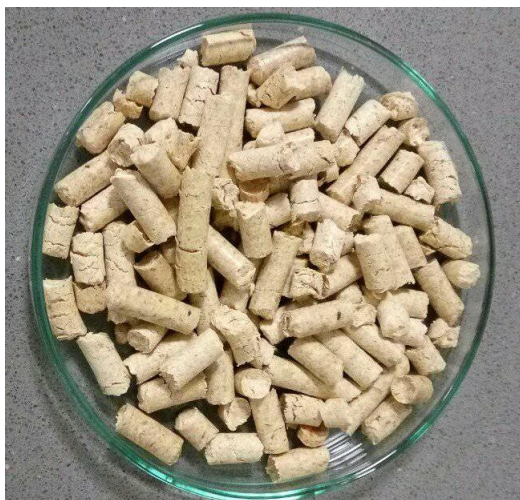
Posledním členem měřicího okruhu je pak notebook nebo počítač, který je spojen s počítačím zařízením. Na tomto notebooku je nainstalován program od firmy TSI s názvem Aerosol Instrument Manager. Tento program zaznamenává data z počítačícího zařízení a ukládá je, čímž jsou připravena k následnému vyhodnocení. Přístroj je schopen zaznamenat nejen koncentrace částic, ale také jejich objem, průměr, hmotnost a povrch v příslušných jednotkách.

Samotné měření je pak možné rozdělit na dva způsoby. Prvním z nich je kontinuální měření jedné konkrétní velikosti částic, což je případ této práce. Důležité je přepnout na třídícím zařízení na analogové okno, vybrat velikost částic, kterou chceme měřit, a vhodně upravit typ souboru, v tomto případě se jedná o CPC data.

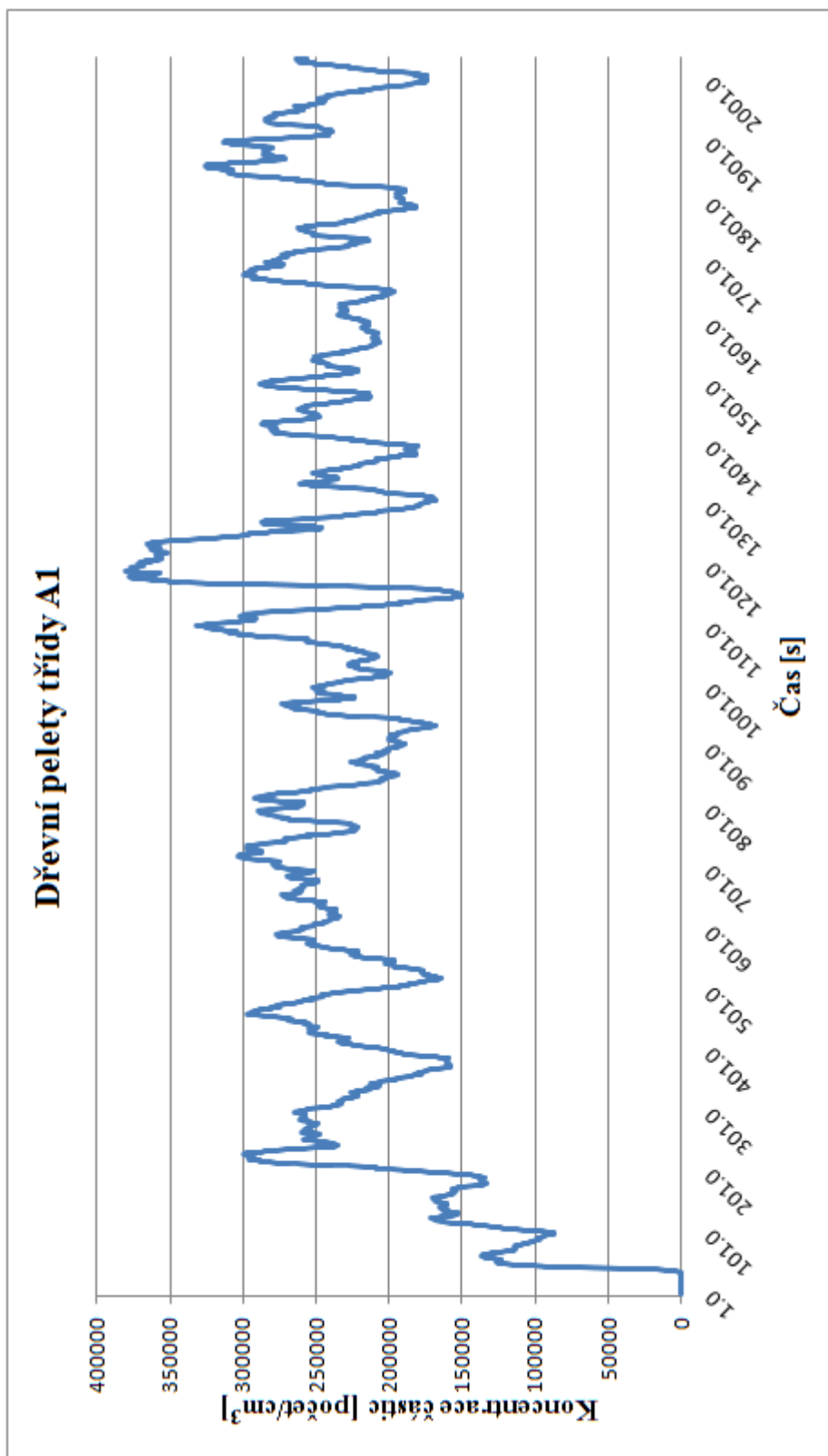
Druhou možností je pak měření distribuční závislosti, to znamená v celém spektru velikostí, které je počítačící zařízení schopno rozlišit. V tomto případě je také nutné ujistit se, že uživatel správně zvolí typ souboru, tentokrát se jedná o SMPS data.

6.2 Měření první-dřevní pelety A1

Při prvním měření bylo jako palivo použito dřevních pelet třídy A1. Tato třída představuje nejvyšší kvalitu dřevních pelet podle normy ISO 17225-2. Dřevní pelety třídy A1 jsou vyrobeny lisováním za zvýšených teplot, a to z kmenového dříví, či chemicky neošetřených zbytků dřeva a mají výhřevnost minimálně 16,5 MJ/kg.[84]



Obrázek 6.6: Dřevní pelety A1 [vlastní zdroj]



Obrázek 6.7: Výsledky prvního měření

Jak již bylo uvedeno na počátku této kapitoly, všechna měření probíhala pro jednu konkrétní velikost částic 95 nm. V případě dřevních pelet toto měření trvalo kontinuálně déle než půl hodiny, nastavený průtok spalin z kotle do přístroje byl 0,3 litrů za minutu.

Výsledky tohoto měření zobrazuje obrázek 6.7 výše. V první části grafu (do času zhruba tři až čtyř minut) lze vidět postupné zvyšování koncentrace částic o dané velikosti 95 nm. Co z grafu není patrné je skutečnost, že tento nárůst neprobíhal od hodnoty 0 částic/cm³. První hodnota této koncentrace byla podle programu Aerosol Instrument Manager 83,1 částic/cm³. Jednalo se o zbytkový vzduch, který se nacházel v systému. Měření v této části grafu tudíž není směrodatné, jelikož systém se nejprve musel ustálit, ale pro ilustraci je vhodné tuto část také zobrazit a okomentovat.

V další části grafu (po ustálení systému) lze vidět určité podobnosti, kdy po zvýšení koncentrace částic dochází k opětovnému snížení této koncentrace. To může být způsobeno nevyvážeností procesu hoření, přestože měření by se již dalo považovat za relativně směrodatné (vzduch, který přichází do přístroje, je pouze vzduch ze spalínovodu a měření tudíž není ovlivněno zbytkovým vzduchem, jak tomu bylo v první části měření).

Zajímavé hodnoty z prvního měření zobrazuje tabulka 6.2 níže. Hodnoty, které jsou uvedeny v této tabulce, lze získat přímo z programu Aerosol Instrument Manager (A.I.M.) firmy TSI.

Tabulka 6.2: Vybrané hodnoty z prvního měření [vytvořeno pomocí program A.I.M.]

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	230 000
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	78,3
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	380 000

Všechny tyto hodnoty jsou ovšem brány přímo z měření, které je na obrázku 6.7. Pokud by nebyla uvažována pasáž, kdy docházelo k ustalování systému (bráno prvních 210 vteřin), pak by hodnoty byly následující.

Tabulka 6.3: Vybrané hodnoty z prvního měření po korekci úvodu měření

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	243 700
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	150 700
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	380 000

Jediná hodnota, která pro oba případy stejná, je přirozeně hodnota maximální koncentrace, která byla naměřena v čase 19 minut a 42 vteřin od počátku měření (1182 s). Hodnota průměrné koncentrace se zvýšila, což je dáno tím, že na počátku měření teprve docházelo ke zvyšování koncentrací. Minimální koncentrace pak nebyla dána zbytkovým vzduchem, který se nacházel v systému.

6.3 Měření druhé-řepkové pelety

Při druhém měření bylo jako palivo použito řepkových pelet. Tyto pelety mají oproti dřevním peletám vyšší popelnatost, což je způsobeno olejem, který se v nich nachází. Výhřevnost těchto pelet se pohybuje do 15,6 MJ/kg.[85]

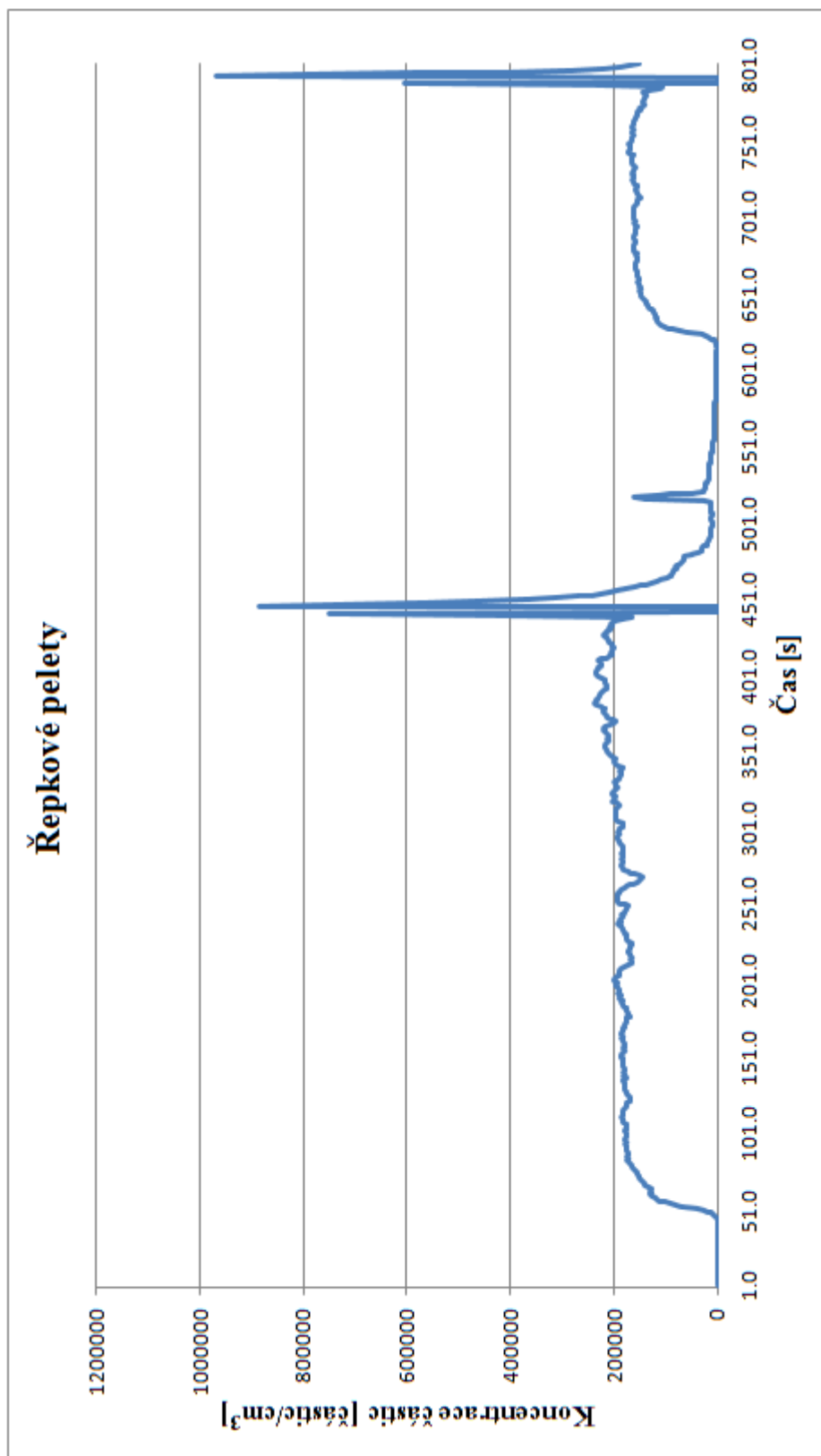


Obrázek 6.8: Řepkové pelety [vlastní zdroj]

Stejně jako v případě prvního měření se i zde jednalo o kontinuální měření konkrétní velikost částic, a to 95 nm, při průtoku spalin z kotle 0,3 litrů za minutu. V případě řepkových pelet však nebylo možné dosáhnout stejného času kontinuálního měření, jak tomu bylo u dřevních pelet (přes 30 minut), neboť docházelo k problému se zacpáváním trysky, kterou prochází větší částice a naráží na impaktor natřený vazelínou. Tuto skutečnost demonstruje obrázek 6.9 níže. Malá špička na horní podstavě impaktoru jsou nakupené částice, které pak ucpávají trysku, což vede k potřebě tyto části měřící aparatury očistit. Toto čištění ovšem znehodnocuje měření, neboť při odmontování impaktoru dojde k velkému nárůstu koncentrace částic. Poté koncentrace klesnou téměř na nulu a opět trvá, než dojde k ustálení systému.



Obrázek 6.9: Nakupení částic na impaktoru [vlastní zdroj]



Obrázek 6.10: Výsledky druhého měření

Obrázek 6.10 výše znázorňuje výsledky druhého měření. Po prvotním ustálení (asi za jednu a půl minuty) lze vidět, že koncentrace částic jen nepatrně stoupá, ale pohybuje se zhruba

kolem hodnoty $200\,000$ částic/cm³, a to až do času asi 450 vteřin. V tuto dobu došlo k prvnímu ucpání trysky a bylo ji třeba vyčistit. Během následujících 150 vteřin bylo měření z důvodu čištění trysky nesměrodatné, poté došlo během další minuty k opětovnému ustálení hodnot koncentrace, tentokrát ovšem nedocházelo k postupnému nárůstu těchto koncentrací, jak tomu bylo v první části. Brzy ovšem došlo k dalšímu zanesení trysky, tudíž bylo nutné další čištění. Další měření pak měla podobný charakter, tudíž nejsou zahrnuta.

Zajímavé hodnoty z druhého měření ukazuje tabulka 6.4 níže. Hodnoty, které jsou v této tabulce, jsou opět převzaty s programu Aerosol Instrument Manager od firmy TSI.

Tabulka 6.4: Vybrané hodnoty z druhého měření [vytvořeno pomocí programu A.I.M.]

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	153 000
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	162,6
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	1 940 000

Pokud se zanedbají hodnoty, kdy se systém ustaloval a kdy docházelo k čištění trysek, pak hodnoty budou následující.

Tabulka 6.5: Vybrané hodnoty z druhého měření po korekci

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	181 800
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	131 000
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	236 900

Rozdíl v hodnotách z tabulky 6.4 a tabulky 6.5 je v tomto případě poměrně velký, zejména pak u maximální koncentrace částic je velice velký. Tyto rozdíly jsou ovšem dány právě problémy se zanášením trysky, které toto měření doprovázely.

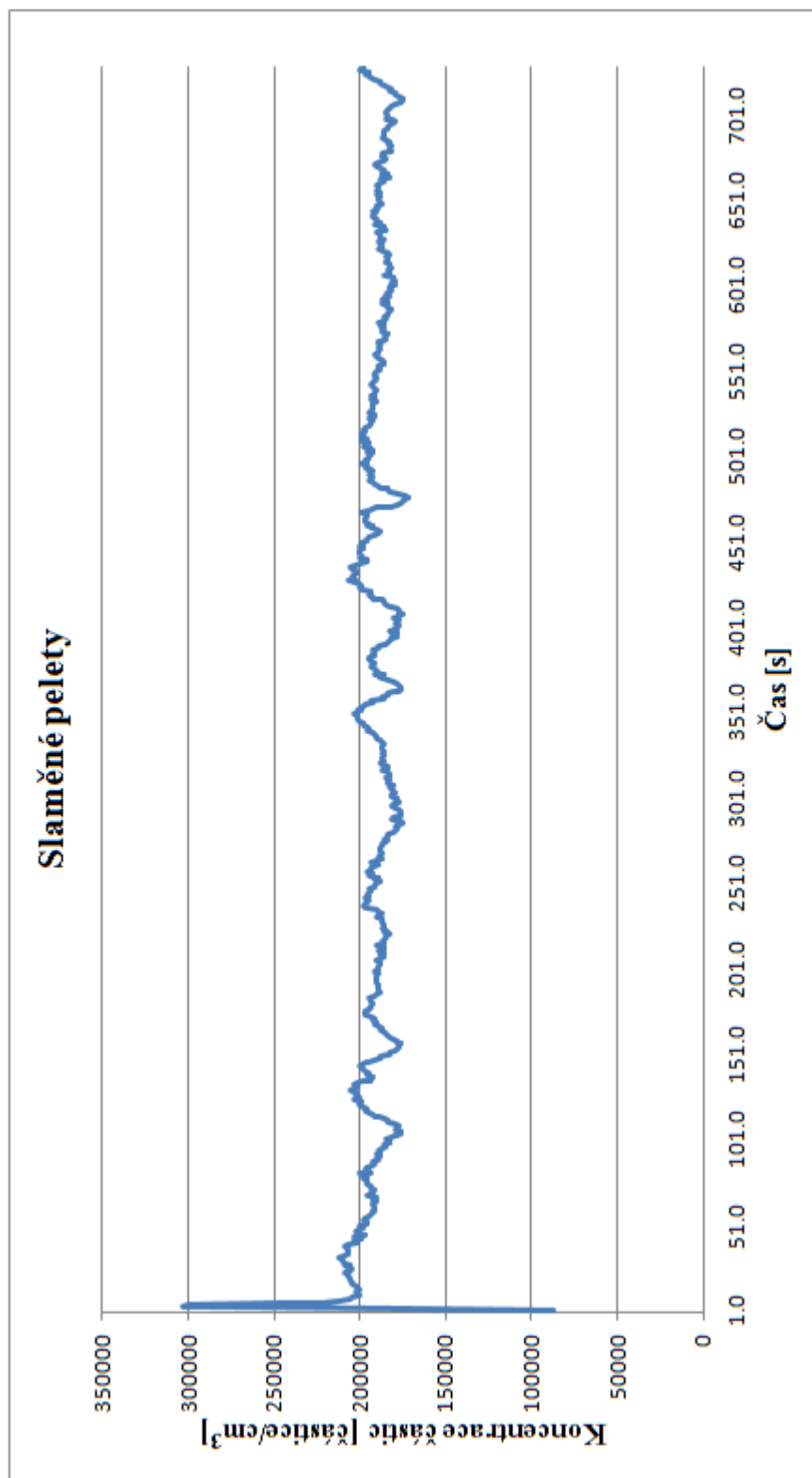
6.4 Měření třetí-slaměné pelety

Posledním palivem, které bylo použito při experimentu, byly slaměné pelety. Jedná se o rostlinné pelety, s výhřevností až 17 MJ/kg, které se mimo jiné dají použít také jako podestýlka.[86]



Obrázek 6.11: Slaměné pelety [vlastní zdroj]

Stejně jako v předchozích dvou případech se měření týkalo pouze částic o velikosti 95 nm, probíhalo kontinuálně a přítok vzduchu ze spalínovodu byl opět 0,3 litrů za minutu.



Obrázek 6.12: Výsledky třetího měření

Z výsledků třetího měření na obrázku 6.12 výše je patrná změna oproti předchozím dvěma měřením, a to především v úvodní části grafu, kde nelze pozorovat oblast, kdy docházelo k počátečnímu ustálení systému. To je dáno tím, že při měření koncentrací částic u slaměných pelet byl stejný problém, jako při měření u řepkových pelet. Docházelo k zanášení trysky a impaktoru, tudíž bylo třeba tyto čistit. Po jednom z čištění se ovšem již impaktor ani tryska nezanášeli, tudíž byl spuštěn nový soubor a data z tohoto souboru byla použita pro vytvoření grafu na obrázku 6.12. Skok na začátku grafu zde představuje zbytky vlivu čištění trysky a impaktoru. Dále už měření lze považovat za poměrně směrodatné, s určitými odchylkami, které mohou být, podobně jako v předchozích případech, spojeny s nevyvážeností procesu hoření.

Zajímavé hodnoty z třetího měření, které byly převzaty opět z programu Aerosol Instrument Manager, ukazuje tabulka 6.6 níže.

Tabulka 6.6: Vybrané hodnoty z třetího měření [vytvořeno pomocí programu A.I.M.]

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	190 000
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	87 500
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	303 000

Po zanedbání úvodní části měření (trvání 10 vteřin), kdy je ještě patrný vliv čištění trysky a impaktoru, budou tyto zajímavé hodnoty následující.

Tabulka 6.7: Vybrané hodnoty z třetího měření po korekci

Průměrná koncentrace (částice/cm ³)	190 000
Minimální koncentrace (částice/cm ³)	172 200
Maximální koncentrace (částice/cm ³)	212 400

Při porovnání hodnot z tabulky 6.6, respektive tabulky 6.7, je patrné, že počáteční nepřesnosti při měření neměli vliv na průměrnou koncentraci, která se lišila prakticky jen v jednotkách (nicméně všechny hodnoty jsou zaokrouhleny na tisíce, jelikož u hodnot přímo z A.I.M. tomu tak je také). Naopak extrémní hodnoty se změnily poměrně výrazně.

6.5 Porovnání jednotlivých druhů pelet

Nyní bude provedeno porovnání všech tří měření, které byly diskutovány výše. Vzhledem ke skutečnosti, že měření probíhalo na stejném spalovacím zařízení, ve stejný den a že proces hoření byl podobný (stejně doplňování pelet, stejný tah komína), dá se tvrdit, že podmínky při spalování všech tří druhů pelet byly stejné.

Společným znakem slaměných a řepkových pelet byl problém se zanášením impaktoru a trysky. Vzhledem k tomu, že na impaktoru se zachytávají větší částice, které mají vyšší kinetickou energii a tudíž je pro ně složitější projít pravoúhlou zatačkou, může být konstatováno, že při spalování těchto druhů pelet vzniká právě taková frakce částic, které odpovídají popisu částic o vyšší kinetické energii.

Při spalování dřevních pelet nedocházelo k problémům se zanášením trysky a impaktoru, který byl typický pro řepkové a slaměné pelety. V porovnání s těmito druhy pelet však průměrná koncentrace částic o velikosti 95 nm byla větší. U řepkových pelet byl tento průměr 181 800 částic/cm³, u slaměných pelet 190 000 částic/cm³, u dřevních pelet to

však bylo $243\,700\text{ částic/cm}^3$ (všechny hodnoty brány po korekci). Dalo by se tedy říci, že při spalování dřevních pelet vznikají spíše částice menší, naopak ty větší (které by mohly způsobovat zanášení trysky a impaktoru) vznikají spíše při spalování ostatních dvou druhů pelet.

ZÁVĚR

V rešeršní části této práce bylo popsáno, co jsou to částice PM, jaké je jejich rozdělení z hlediska velikosti, možnosti vzniku, či jaké chemické látky mohou obsahovat. Bylo uvedeno, jak se na celkové produkci těchto částic podílejí jednotlivé sektory průmyslu, zemědělství či infrastruktury, a to v měřítku evropském. Mimo to rešeršní část uváděla, jaké jsou možné negativní důsledky těchto částic na lidské zdraví, včetně popisu jednotlivých druhů onemocnění a chorob, především však chorob kardiovaskulárního systému a respiračního ústrojí, a také popisovala negativní vlivy těchto částic na životní prostředí.

S ohledem na první kapitoly této rešeršní části je patrné, že je třeba regulovat množství částic, které se do ovzduší uvolňují při spalování. Samozřejmě se nejedná jen o částice PM, ale také o oxidy uhlíku, dusíku či síry. K této regulaci dopomáhají normy, které koncentrace nebezpečných látek v ovzduší kontrolují. Této problematice se věnovala rešeršní práce v další části, mimo to se také věnovala současným trendům v produkci částic PM v Evropě a také České republice.

I přes tyto normy se v ovzduší stále vyskytují částice PM a tyto je třeba nějakým způsobem odstranit. Této problematice byla věnována značná pozornost rešeršní části. Přestože existují sofistikované metody, jak tyto částice z ovzduší odstranit, je třeba si uvědomit, že mimo samotné čištění je také vhodné, aby každý člověk uvažoval, jestli pro snížení produkce těchto částic nemůže něco udělat. Ze všech možností je vhodné jmenovat následující: používání hromadné dopravy; používání kvalitních paliv; používání kvalitních topných přístrojů a kotlů vyšších emisních tříd.

Po úvodní, čistě rešeršní části této práce, následovala kapitola, která byla úvodem do části experimentální. Jejím obsahem jsou možnosti měření koncentrací částic PM, ale také velikosti těchto částic. Byly zde rozebrány jednotlivé principy, které k tomuto účelu slouží.

Poslední kapitola této práce byla čistě experimentální. Vzhledem k tomu, že tato práce nebyla přímo zaměřena na měření koncentrací částic PM v ovzduší, či ve spalínách, tato experimentální část spíše ukazuje možnosti měření, které jsou v současné době možné. Co se týče výsledků měření, aby mohly být považovány za objektivní, bylo by samozřejmě zapotřebí mnohem více měření a bylo by vhodné sledovat další parametry spalování, aby pak výsledky mohly být řádně vyhodnoceny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] What is PM, and how does it get into the air?. *EPA* [online]. 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>
- [2] PETRLÍK, Jindřich a Petr VÁLEK. Polétavý prach-PM10. *Arnika* [online]. 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://arnika.org/poletavy-prach-pm10>
- [3] Grafická ročenka. *ČHMU* [online]. 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/IV1_PM_CZ.html
- [4] MALAM, John. *Země*. Přeložila Pavla RAJTROVÁ. Praha: Slovart, 2002. Miniknížka. ISBN 80-7209-360-6
- [5] What's Polluting Delhi's Air?. *Urban emissions* [online]. 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.urbanemissions.info/blog-pieces/whats-polluting-delhis-air/>
- [6] Draslík. *Vitalion* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://doplanky.vitalion.cz/draslik/>
- [7] Particle Counting and Speciation Network. *NPL* [online]. 2011 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.npl.co.uk/environmental-measurement/products-and-services/particle-counting-and-speciation-network>
- [8] Air quality in Europe — 2015 report. *EEA* [online]. 2015 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2015>
- [9] ZHANG, Song-Yang, Danqing SHAO, Huiying LIU, et al. Metabolomics analysis reveals that benzo[a]pyrene, a component of PM2.5, promotes pulmonary injury by modifying lipid metabolism in a phospholipase A2-dependent manner in vivo and in vitro. *Redox Biology* [online]. Elsevier B.V, 2017, **13**, 459-469 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.redox.2017.07.001. ISSN 2213-2317
- [10] SRAM, Radim J., Miroslav DOSTAL, Helena LIBALOVA, Pavel ROSSNER, Andrea ROSSNEROVA, Vlasta SVECOVA, Jan TOPINKA a Alena BARTONOVA. The European Hot Spot of B[a]P and PM 2.5 Exposure—The Ostrava Region, Czech Republic: Health Research Results. *ISRN Public Health* [online]. 2013, **2013**, 1-12 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1155/2013/416701. ISSN 2090-8008. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2013/416701/>
- [11] QIAN, Jing, Andrea R. FERRO a Kathleen R. FOWLER. Estimating the Resuspension Rate and Residence Time of Indoor Particles. *Journal of the Air & Waste Management Association* [online]. 2012, **58**(4), 502-516 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.3155/1047-3289.58.4.502. ISSN 1096-2247. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3155/1047-3289.58.4.502>
- [12] MARZEN, Miriam, Thomas ISERLOH, João L.M.P. DE LIMA a Johannes B. RIES. The effect of rain, wind-driven rain and wind on particle transport under controlled laboratory conditions. *Catena* [online]. Elsevier B.V, 2016, **145**, 47-55 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.catena.2016.05.018. ISSN 0341-8162

- [13] Polétavý prach – neviditelná hrozba. *Hluk a emise* [online]. 2007 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://hluk.eps.cz/hluk/emise/poletavy-prach-%E2%80%93-neviditelná-hrozba/>
- [14] Composition of Dust Particles and Particulate Matter in The Air. *Radon testing Dallas* [online]. 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://radontestingdallas.com/indoor-air-quality-testing-composition-dust-particles-particulate-matter/>
- [15] Air quality in Europe — 2017 report. *EEA* [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2017>
- [16] Who we are. *EEA* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/about-us/who/who-we-are>
- [17] MOSS, Angela R., Jean-Pierre JOUANY a John NEWBOLD. Methane production by ruminants: its contribution to global warming. *Annales de Zootechnie* [online]. 2000, **49**(3), 231-253 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1051/animres:2000119. ISSN 0003-424X. Dostupné z: <http://www.edpsciences.org/10.1051/animres:2000119>
- [18] MALÍŘOVÁ, Jaroslava. Velkochovy hospodářských zvířat a jejich vliv na životní prostředí. *CENIA* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: [http://cenia.cz/web/www/cenia-akt-tema.nsf/\\$pid/MZPMSFJ1BPOU](http://cenia.cz/web/www/cenia-akt-tema.nsf/$pid/MZPMSFJ1BPOU)
- [19] Overview of Greenhouse Gases. *EPA* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [20] GRIGORATOS, Theodoros a Giorgio MARTINI. Brake wear particle emissions: a review. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2015, **22**(4), 2491-2504 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1007/s11356-014-3696-8. ISSN 0944-1344. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11356-014-3696-8>
- [21] Urban and Rural Sources of Particulate Matter. *Slideshare* [online]. 2015 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/EPAIreland/urban-and-rural-sources-of-particulate-matter>
- [22] What is particulate matter?. *UK air* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/aqeg/ch2.pdf>
- [23] Particle Pollution and Your Health. *EPA* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=P1001EX6.txt>
- [24] Prašnost na pracovišti. *SZÚ* [online]. 2007 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- [25] Souhrnná zpráva za rok 2013. *IRZ* [online]. 2015 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.irz.cz/sites/default/files/Souhrnna_zprava_2013_IRZ_C_web.pdf
- [26] Asthma. *WHO* [online]. 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.who.int/respiratory/asthma/en/>
- [27] Bronchitis: Causes, symptoms, and treatments. *Health News - Medical News Today* [online]. 2004 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/8888.php>

- [28] WIDZIEWICZ, Kamila, Wioletta ROGULA-KOZŁOWSKA a Krzysztof LOSKA. Cancer risk from arsenic and chromium species bound to PM_{2.5} and PM₁ – Polish case study. *Atmospheric Pollution Research* [online]. Elsevier B.V, 2016, **7**(5), 884-894 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.apr.2016.05.002. ISSN 1309-1042
- [29] The link between air pollution and cancer. *Cancer research UK* [online]. 2013 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://scienceblog.cancerresearchuk.org/2013/10/18/the-link-between-air-pollution-and-cancer/?_ga=2.171341856.1216918420.1509989196-1140622711.1509989196
- [30] PACITTO, A., L. STABILE, M. VIANA, et al. Particle-related exposure, dose and lung cancer risk of primary school children in two European countries. *Science of the Total Environment* [online]. Elsevier B.V, 2018, **616-617**, 720-729 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.256. ISSN 0048-9697
- [31] Cancer. WHO[online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs297/en/>
- [32] Cardiovascular disease. WHO [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://www.who.int/cardiovascular_diseases/en
- [33] SPOONER, Christopher E., Norman P. MARKOWITZ a Louis D. SARAVOLATZ. The role of tumor necrosis factor in sepsis. *Clinical Immunology and Immunopathology* [online]. 1992, **62**(1), S11-S17 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/0090-1229(92)90036-N. ISSN 00901229. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/009012299290036N>
- [34] BOURDREL, Thomas, Marie-Abèle BIND, Yannick BÉJOT, Olivier MOREL a Jean-François ARGACHA. Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of Cardiovascular Diseases* [online]. 2017, **110**(11), 634-642 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.acvd.2017.05.003. ISSN 18752136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875213617301304>
- [35] WANG, Chenchen, Yifan TU, Zongliang YU a Rongzhu LU. PM_{2.5} and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2015, **12**(7), 8187-8197 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.3390/ijerph120708187. ISSN 1660-4601. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1660-4601/12/7/8187>
- [36] Hemostasis. *The coag dictionary* [online]. [cit. 2018-04-07] Dostupné z: <http://www.hemostasis.com/hemostasis/>
- [37] Life expectancy at birth. *World Bank Open Data* [online]. 2018 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://data.worldbank.org/indicator/SP.DYN.LE00.IN>
- [38] Test lékařských operačních roušek a filtračních polomasek 2003. *DTest* [online]. 2003 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/clanek-669/test-lekarskych-operacnich-rousek-a-filtracnich-polomasek-2003>
- [39] Smogová situace – co můžeme udělat. *SZÚ* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.szu.cz/tema/zivotni-prostredi/smogova-situace-co-muzeme-udelat>

- [40] GRANTZ, D.A, J.H.B GARNER a D.W JOHNSON. Ecological effects of particulate matter. *Environment International* [online]. 2003, **29**(2-3), 213-239 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/S0160-4120(02)00181-2. ISSN 01604120. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412002001812>
- [41] Effects of Acid Rain. *EPA* [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [42] Co dělat v případě smogové situace. *Ovzduší Brno* [online]. 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: https://www.brnenskeovzdusi.cz/dokumenty/smog_letak_oprava_16_11.pdf
- [43] The Damaging Effects of Black Carbon. *State of the Planet* [online]. 2016 [cit. 2018-04-07] Dostupné z: <http://blogs.ei.columbia.edu/2016/03/22/the-damaging-effects-of-black-carbon/>
- [44] Suspendované částice. *ČHMÚ* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/weather_links/Pocasi/Navody/Zneciste ni/susp_castice.pdf
- [45] Co je filtr pevných částic. *DPF tech* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.dpf-tech.cz/filtry-pevných-castic>
- [46] Filtry pevných částic (DPF/FAP). *Elit* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.elit.cz/produkty/filtry-pevných-castic-dpf-fap.html>
- [47] Diesel Particulate Filters. *GEM Motoring Assist* [online]. 2013 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://blog.motoringassist.com/car-maintenance/engine-and-transmission/diesel-particulate-filters/>
- [48] Electrostatic Charge. *GSCE Physics* [online]. 2015 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.gcscience.com/pse11-electrostatic-chimney-pollution.htm>
- [49] Obecný popis tkaninového filtru. *Slavex filters* [online]. 2008 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://www.slavex.cz/oblasti_tkaninovy-filtr.html
- [50] Huť ArcelorMittal stlačila emise prachu na historické minimum. *Polar* [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://polar.cz/zpravy/ostravsko/ostrava/11000007943/hut-arcelormittal-stlacila-emise-prachu-na-historicke-minimum>
- [51] Nový tkaninový filtr na aglomeraci v ArcelorMittal Ostrava snižuje emise prachu o dalších 94 tun ročně. *ArcelorMittal news release* [online] 2016 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://ostrava.arcelormittal.com/pdf/24-03-2016.pdf>
- [52] Guide to Air Cleaners in the Home. *EPA* [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/guide-air-cleaners-home>
- [53] High-efficiency particulate air system. *Encyclopedia Britannica* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/high-efficiency-particulate-air-system>
- [54] History of the HEPA filter. *CVAC* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.c-vac.com/history.html>

- [55] HEPA Filters: What They Are & How They Work. *Allergy and Air* [online]. 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://learn.allergyandair.com/hepa-filters/>
- [56] Activated Carbon Filters: What They Are & How They Work. *Allergy and Air* [online]. 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://learn.allergyandair.com/activated-carbon-filters/>
- [57] AIR FILTRATION. *Santrupti* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://santrupti.com/air-quality/solution/>
- [58] What Is An Electrostatic Precipitator?. *Oransi* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.oransi.com/page/electrostatic-precipitator>
- [59] About Negative Ion Air Purification. *Surround Air* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.surroundair.com/negative-ions/>
- [60] UV Air Purifiers. *Air cleaner* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.aircleaner.org/uv-air-purifiers/>
- [61] A 23-Foot-Tall Air Purifier Gets a Tryout in Smoggy Beijing. *NY Times* [online]. 2016 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2016/07/21/us/a-23-foot-tall-air-purifier-gets-a-tryout-in-smoggy-beijing.html>
- [62] Smog Free Tower: Studio Roosegaarde. *Studio Roosegaarde* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.studio Roosegaarde.net/project/smog-free-tower>
- [63] Smog Free Project. *ENS*. [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://enstechnology.nl/en/projects/smog-free-project/>
- [64] Komín a správný tah. *Hwam* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.krbova-kamna-hwam.cz/tipy-rady/potlaceny-tah-komina/>
- [65] Emisní třídy rozhodují, které kotle zůstanou na trhu. *Česká peleta* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/tiskove-zpravy/emisni-tridy-rozhoduji-ktere-kotle-zustanou-na-trhu/>
- [66] Kotle emisní třída 5. *Gas komplet* [online]. 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.mujkotel.cz/kotle-emisni-trida-5/>
- [67] BHASKAR, B. Vijay. Atmospheric Particulate Pollutants and their Relationship with Meteorology in Ahmedabad. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2010, , - [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.4209/aaqr.2009.10.0069. ISSN 16808584. Dostupné z: http://www.aaqr.org/Doi.php?id=1_AAQR-09-10-OA0069&v=10&i=4&m=8&y=2010
- [68] TIWARI, S., D.S. BISHT, A.K. SRIVASTAVA, A.S. PIPAL, A. TANEJA, M.K. SRIVASTAVA a S.D. ATTRI. Variability in atmospheric particulates and meteorological effects on their mass concentrations over Delhi, India. *Atmospheric Research* [online]. 2014, **145-146**, 45-56 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.03.027. ISSN 01698095. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169809514001513>

- [69] How Trees Help Clean The Air. *US Department of Agriculture* [online]. 1977 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://naldc.nal.usda.gov/naldc/download.xhtml?id=CAT87209983&content=PDF>
- [70] NOWAK, David J., Satoshi HIRABAYASHI, Allison BODINE a Robert HOEHN. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten U.S. cities and associated health effects. *Environmental Pollution* [online]. 2013, **178**, 395-402 [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.050. ISSN 02697491. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0269749113001838>
- [71] Imisní limity. *ČHMU* [online]. 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/info/limity_CZ.html
- [72] Exceedance of air quality standards in urban areas. *EEA* [online]. 2017 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/exceedance-of-air-quality-limit-3/assessment-3>
- [73] Kvalita ovzduší v České republice. *ČHMU* [online]. 2016 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/16groc/gr16cz/IV1_PM_CZ.html
- [74] PRAŽNIKAR, Zala a Jure PRAŽNIKAR. The effects of particulate matter air pollution on respiratory health and on the cardiovascular system. *Slovenian Journal of Public Health* [online]. 2012, **51**(3), - [cit. 2018-04-07]. DOI: 10.2478/v10152-012-0022-z. ISSN 1854-2476. Dostupné z: <http://www.degruyter.com/view/j/sjph.2012.51.issue-3/v10152-012-0022-z/v10152-012-0022-z.xml>
- [75] Měření kvality vzduchu. *Meteorologická stanice Frýdlant* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.pocasi-frydlant.cz/aqi.php>
- [76] Laser Diffraction. *Sympatec- Analysers for Particle Size and Shape* [online]. 2017 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <https://www.sympatec.com/en/particle-measurement/sensors/laser-diffraction/>
- [77] Particle size. *Malvern Panalytical* [online]. 2018 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/measurement-type/particle-size/index.html>
- [78] Particle size analysis by gravitational sedimentation analysis. *Delft Solids Solutions* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://www.solids-solutions.com/rd/particle-sizing-and-particle-size-analysis/particle-size-analysis-by-gravitational-sedimentation-analysis/>
- [79] KRPEC, Kamil. *Měření emisí znečišťujících látek z kotlů malých výkonů* [online]. [cit. 2018-04-07]. 2012 Dostupné z: <https://vytapeni.tzb-info.cz/vytapime-tuhymi-palivy/8200-mereni-emisi-znecestujicich-latek-z-kotlu-malych-vykonu>
- [80] KELEMEN, Michal; MAŤAŠOVSKÁ, Tatiana. *Meranie hmotnostnej koncentrácie a bilancia úletu tuhých znečisťujúcich látok* [online]. 2006 [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: https://www.atpjournals.sk/buxus/docs/casopisy/atp_plus/plus_2006_2/plus18_22.pdf

- [81] Návod automatický kotel VERNER A251, Vydal: VERNER a.s., Dostupné z: <http://www.kotle-verner.cz/produkty/automaticke-kotle/verner-a251#tab4>
- [82] Manuál k přístroji SMPS 3080. Vydal TSI. 2009.
- [83] Manuál k přístroji CPC 3775. Vydal TSI. 2007.
- [84] Normy pro pelety a brikety. *Česká peleta* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: <http://www.ceska-peleta.cz/pelety-brikety-drevo/normy-pro-pelety-a-brikety/>
- [85] Vytápění řepkovými peletami Německo. *Kotle Verner* [online]. [cit. 2018-04-07]. Dostupné z: http://www.kotle-verner.cz/my-v-mediich/tisk_2/vytapeni-repkovymi-peletami-nemecko
- [86] Slaměné pelety. *Slaměné pelety* [online]. [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <https://slamenepelety.wordpress.com/informace-o-slamenych-peletach/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Význam
AECEN	Asijská agentura pro životní prostředí
AIM	Program pro zpracovávání dat přístrojů TSI
AQI	Index kvality vzduchu
BaP	Benzo[a]pyren
BC	Černý uhlík
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DPF	Filtr pevných částic
EC	Elementární uhlík
EEA	Evropská agentura pro životní prostředí
EPA	Agentura pro životní prostředí
EU	Evropská unie
HEPA	Zkratka pro filtr pevných částic
CH ₄	Methan
NH ₃	Amoniak
NO _x	Oxidy dusíku
O ₃	Ozon
OC	Organický uhlík
PM _x	Udává velikost částic TZL v x μm
SO ₂	Oxid siřičitý
TZL	Tuhé znečišťující látky
UFP	Ultra jemné částice
UV	Ultrafialové záření
VOCs	Těkavé organické sloučeniny
WHO	Světová zdravotnická organizace

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obrázek 1.1: Typické poměry složek u městského prachu [44]
Obrázek 1.2: Složení částic PM [5]
Obrázek 1.3: Původ částic a jejich dělení [14]
Obrázek 1.4: Procentuální podíl jednotlivých sektorů na množství částic PM₁₀ a PM_{2.5} [15]
Obrázek 1.5: Mechanismy vzniku sekundárních PM [21]
Obrázek 2.1: Respirační ústrojí člověka a částice PM [74]
Obrázek 3.1: Procento obyvatel Evropy, vystavených hodnotám větším než povoleným EU [72]
Obrázek 3.2: Procenta obyvatel Evropy, vystavených hodnotám větším než povoleným WHO [72]
Obrázek 3.3: Vývoj emisí zobrazených polutantů ve státech EU [15]
Obrázek 3.4: Pětiletý průměr ročních průměrných koncentrací PM_{2.5}, 2012-2016[73]
Obrázek 3.5: Pětiletý průměr ročních průměrných koncentrací PM₁₀, 2012-2016[73]
Obrázek 3.6: Vývoj koncentrací částic PM₁₀ a PM_{2.5} v ČR [73]
Obrázek 4.1: Schematický řez DPF filtru [47]
Obrázek 4.2: Elektrostatický odlučovač [48]
Obrázek 4.3: Princip HEPA filtru [55]
Obrázek 4.4: Princip elektrostatického odlučovače [57]
Obrázek 4.5: Smog free tower [61]
Obrázek 5.1: Princip laserové difrakce [76]
Obrázek 5.2: Princip gravimetrické metody [79]
Obrázek 5.3: Optický prachoměr[80]
Obrázek 6.1: Schéma měřicího okruhu
Obrázek 6.2: Kotel VERNER A25
Obrázek 6.3: Schéma třídícího zařízení [82]
Obrázek 6.4: Electrostatic Classifier 3080 [82]
Obrázek 6.5: Schéma počítačícího zařízení [83]
Obrázek 6.6: Dřevní pelety A1 [vlastní zdroj]
Obrázek 6.7: Výsledky prvního měření
Obrázek 6.8: Řepkové pelety [vlastní zdroj]
Obrázek 6.9: Nakupení částic na impaktoru [vlastní zdroj]
Obrázek 6.10: Výsledky druhého měření
Obrázek 6.11: Slaměné pelety [vlastní zdroj]
Obrázek 6.12: Výsledky třetího měření

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1: Index kvality vzduchu [75]

Tabulka 2.2: Počet úmrtí ve vybraných evropských státech v roce 2014 [15]

Tabulka 6.1: Parametry kotle VERNER A251 [81]

Tabulka 6.2: Vybrané hodnoty z prvního měření [vytvořeno pomocí program A.I.M.]

Tabulka 6.3: Vybrané hodnoty z prvního měření po korekci úvodu měření

Tabulka 6.4: Vybrané hodnoty z druhého měření [vytvořeno pomocí programu A.I.M.]

Tabulka 6.5: Vybrané hodnoty z druhého měření po korekci

Tabulka 6.6: Vybrané hodnoty z třetího měření [vytvořeno pomocí programu A.I.M.]

Tabulka 6.7: Vybrané hodnoty z třetího měření po korekci