

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**NÁVRH A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ IMISNÍ
HLAVICE PM₁₀**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá imisním monitoringem tuhých znečišťujících látek, popisuje současný stav imisí frakce částic PM_{10} a $PM_{2,5}$, legislativu a používaná měřicí zařízení dle platných technických norem. Dále je zde zhodnocen dosavadní výzkum zařízení pro imisní monitoring na Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní ČVUT v Praze. Součástí práce je experimentální ověření imisní hlavice, označené D73, jako třídiče frakce PM_{10} a popis konstrukčních úprav cyklónu.

SUMMARY

The bachelor thesis deals with the pollution monitoring of solid pollutants, describes the present pollution level of PM_{10} and $PM_{2,5}$ fractions, the legislation and devices used for measuring according to valid technical standards. Consequently, the existing research of the devices for the pollution monitoring at the Department of Environmental Engineering at The Faculty of Mechanical Engineering CTU in Prague is evaluated. The experimental verification of the pollutant head marked as D73 as well as the description of the potential constructional modifications of the cyclone are also included.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM₁₀“ vypracovala samostatně pod vedením Ing. Pavla Vybírala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 19. 06. 2015

Kristýna Švandová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Vybíralovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a rady, zájem a čas, který věnoval této práci. Dále bych ráda poděkovala své rodině a blízkým přátelům, kteří mě podporovali během studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

OBSAH

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ	8
1. ÚVOD	11
2. VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	12
2.1 Pojem ochrana ovzduší	12
2.2 Emise a imise	12
2.3 Druhy znečišťujících látek a jejich účinky na okolní prostředí	13
2.4 Frakce PM ₁₀	15
2.5 Frakce PM _{2,5}	15
2.6 Emisní a imisní limity	17
3. SOUČASNÁ LEGISLATIVA OCHRANY OVZDUŠÍ	18
3.1 Legislativa ochrany ovzduší v ČR	18
3.2 Zákon č.201/2012 Sb. O ochraně ovzduší	18
3.3 Smogová situace a nízkoemisní zóny	19
3.4 Imisní limity	20
3.5 Povinnosti provozovatelů a sazby poplatků za znečištění	21
3.6 Mezinárodní úmluvy o ochraně ovzduší	22
4. SOUČASNÝ STAV A VÝVOJ KVALITY OVZDUŠÍ	23
4.1 Vývoj kvality ovzduší v ČR	23
4.2 Kvalita ovzduší v ČR	24
4.3 Úroveň znečištění částicemi PM ₁₀ v zahraničí	26
5. TECHNICKÉ NORMY ČSN ISO 7708, ČSN EN 12341	28
5.1 ČSN ISO 7708 Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků z hodnocení zdravotních rizik	28
5.1.1 Předmět normy	28
5.1.2 Termíny a definice použité v normě	28
5.1.3 Přístroje pro měření konvencí frakcí částic	30
5.2 ČSN EN 12341 Kvalita ovzduší – Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM ₁₀ a PM _{2,5}	31
5.2.1 Předmět normy	31
5.2.2 Princip metody a schéma měřicího zařízení	32
5.2.3 Normovaná konstrukce vstupního otvoru vzorkovacího systému	33
6. IMISNÍ MONITORING V ČESKÉ REPUBLICĚ	34
6.1 Úvod do problematiky	34

6.2 Automatický imisní monitoring (AIM).....	35
6.3 Používané metody měření imisí tuhých látek	36
6.4 Informační systém kvality ovzduší (ISKO)	37
7. METODY A ZAŘÍZENÍ PRO TŘÍDĚNÝ ODBĚR VZORKŮ PM ₁₀ A PM _{2,5}	39
7.1 Úvod.....	39
7.2 Cyklonové (vírové) odlučovače	39
7.3 Impaktory	41
8. DOSAVADNÍ VÝZKUM IMISNÍ HLAVICE PM ₁₀ NA ÚSTAVU TECHNIKY PROSTŘEDÍ.....	44
8.1 Diplomová práce „Tříděný odběr vzorků imisí“	44
8.2 Diplomová práce „Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM ₁₀ “	47
8.3 Bakalářská práce „Imisní monitoring tuhých znečišťujících látek“	48
8.4 Cíle práce	50
9. METODIKA EXPERIMENTU	51
9.1 Popis prašné tratě a funkce jednotlivých zařízení	51
9.2 Metodika měření	54
9.3 Stanovení potřebného množství prachu	56
9.4 Stanovení množství zachyceného prachu.....	57
9.5 Stanovení celkové a frakční odlučivosti.....	57
9.6 Korekce	60
10. OVĚŘENÍ TŘÍDICÍCH VLASTNOSTÍ CYKLONU D73	61
10. 1 Konstrukce testovaného tříděče	61
10.1.1 Cyklón D73/ Ø18 s krátkou vstupní trubicí	61
10.1.2 Cyklón D73/ Ø18 dlouhou vstupní trubicí	62
10.2 Volba zkušebního prachu a průběh experimentu	63
10.3 Závislost celkové odlučivosti na vysunutí výstupní trubice.....	64
10.4 Frakční odlučivosti a stanovení meze odlučivosti.....	65
10.5 Závislost meze odlučivosti na vysunutí výstupní trubice.....	68
10.6 Provozní jímavost tříděče	69
11. ZÁVĚR	71
POUŽITÁ LITERATURA.....	73
SEZNAM PŘÍLOH	75

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ

<i>označení</i>	<i>jednotka</i>	<i>název</i>
a	[μm]	velikost ekvivalentní kulové částice
a_1	[μm]	aerodynamická velikost ekvivalentní kulové částice
$a_{1,m}$	[μm]	aerodynamická mez odlučivosti
$a_{1,med,M}$	[μm]	hmotnostní medián aerodynamické velikosti částice
$a_{1,pmo}$	[μm]	přibližná aerodynamická mez odlučivosti
c	[g/m^3]	koncentrace prachu v potrubí
c_{skut}	[mg/m^3]	skutečná střední koncentrace v potrubí
c_{teor}	[mg/m^3]	přibližná koncentrace prachu v potrubí
C_{TSP}	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	hmotnostní koncentrace tuhých příměsí ve vzduchu
D	[mm]	průměr cyklónu
d	[mm]	průměr vnitřní trubky
d_{cl}	[mm]	průměr clony
d_s	[mm]	průměr sondy
D_T	[mm]	průměr prašné trati
E_R	[%]	respirabilní konvence aerosolových částic
E_T	[%]	thorakální konvence aerosolových částic
E_I	[%]	vdechovatelná konvence aerosolových částic
f	[Hz]	frekvence
g	[m/s^2]	tíhové zrychlení ($g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2$)
h_{Hg}	[mm]	výška rtuti na barometru
$h_{Hg,vrch}$	[mm]	oprava na vrchlík
i	[-]	poměr průřezů
K_{cl}	[m^2]	redukovaný průřez clony
k_{cl}	[-]	konstanta mikromanometru na cloně
k_R	[-]	konstanta mikromanometru v „R“ bodě
l	[mm]	délka vstupní trubky
\dot{M}	[g/s]	hmotnostní tok prachu v potrubí
\dot{m}	[g/s]	hmotnostní tok prachu v sondě
m_{analy}	[mg]	minimální analyzovatelné množství prachu
m_{celk}	[g]	suma hmotnosti prachu v aparatuře
\dot{m}_{cl}	[g/s]	hmotnostní tok prachu clonkovou tratí
\dot{m}_o	[g/s]	hmotnostní tok prachu v odběrovém místě
\dot{M}_P	[g/s]	hmotnostní tok
m_P	[g]	hmotnost prachu v sondě
M_{pj}	[g]	provozní jímavost třídiče
M_{pod}	[g]	hmotnost podaného prachu
$m_{P\check{R}}$	[g]	hmotnost přivedeného prachu
M_{skut}	[g]	skutečná hmotnost podaného prachu
\dot{M}_{skut}	[g/s]	skutečný tok prachu do potrubí
M_{teor}	[g]	potřebné množství prachu

\dot{M}_{teor}	[g/s]	přibližný hmotnostní tok prachu do potrubí
m_{teor}	[g]	teoretické zachycené množství v aparatuře
\dot{M}_V	[g/s]	hmotnostní tok na výstupu
m_V	[g]	hmotnost prachu na filtru
\dot{M}_Z	[g/s]	hmotnostní tok na záchyту
m_Z	[g]	hmotnost prachu v cyklonu
O_C	[%]	celková odlučivost
O_f	[%]	nekorigovaná frakční odlučivost
O_f'	[%]	korigovaná frakční odlučivost
$O_{f,teor}$	[%]	teoretická frakční odlučivost
p_b	[Pa]	barometrický tlak
$p_{d,R}$	[Pa]	dynamický tlak v „R“ bodě
p_P	[%]	poměrná část zachyceného prachu na P
p_V	[%]	poměrná část zachyceného prachu na V
p_Z	[%]	poměrná část zachyceného prachu na Z
r	[J/kg·K]	plynová konstanta vzduchu ($r = 287,1$ J/kg·K)
S_{cl}	[m ²]	průřez clonkové tratě
S_S	[m ²]	průřez odběrové hubice
Stk_m	[-]	stokesovo kritérium
t_{bar}	[°C]	teplota barometru
t_{lab}	[°C]	teplota vzduchu v laboratoři (manometrů)
t_s	[°C]	teplota vzduchu v potrubí
t_{vz}	[°C]	teplota vzduchu
u	[m/s]	rychlost proudění
u_ρ	[m/s]	relativní rychlost částice v radiálním směru
\dot{V}	[m ³ /h]	objemový průtok vzduchu
v	[mm]	vysunutí výstupní trubky
\dot{V}_{cl}	[m ³ /h]	objemový průtok vzduchu clonkovou tratí
v_d	[m/s]	fiktivní rychlost ve válcové komoře
\dot{V}_o	[m ³ /s]	objemový tok vzduchu v odběrovém bodě
\dot{V}_S	[m ³ /s]	objemový tok vzduchu potrubím
v_t	[m/s]	tangenciální složka rychlosti
w_{cl}	[m/s]	rychlost ve clonkové trati
w_o	[m/s]	požadovaná rychlost v odsávání
w_R	[m/s]	požadovaná rychlost v „R“ bodě
$w_{stř}$	[m/s]	střední rychlost v potrubí
Z_M	[-]	hmotnostní zbytek
Z_P	[-]	zbytek prachu na přívodu
Z_V	[-]	zbytek prachu na výstupu
Z_Z	[-]	zbytek prachu na záchyту
UV	[%]	faktor výtěžnosti
B2	prach	elektrárenský popílek
E1	prach	elektrárenský popílek

E4	prach	elektrárenský popílek
F3	prach	elektrárenský popílek

Řecká abeceda

<i>označení</i>	<i>jednotka</i>	<i>název</i>
α	[-]	součinitel kontrakce
β	[-]	rychlostní součinitel, poměr mezi w_o a w_R
γ	[-]	poměr mezi w_o a $w_{stř}$
Δa	[mm]	diference velikosti částic
Δh_R	[mm]	výška sloupce lihu U-trubice v potrubí
$\Delta h_{s,cl}$	[mm]	výška sloupce rtuti U-trubice na cloně
$\Delta l_{d,cl}$	[mm]	požadovaná výška sloupce lihu na cloně
$\Delta l_{d,R}$	[mm]	požadovaná výška sloupce lihu v „R“ bodě
$\Delta p_{d,cl}$	[Pa]	diferenční tlak na cloně
Δp_s	[Pa]	statický tlak v potrubí
$\Delta p_{s,cl}$	[Pa]	statický tlak na cloně
Δp_z	[Pa]	tlaková ztráta odlučovače
ΔZ_V	[-]	diference zbytku prachu na výstupu
ΔZ_Z	[-]	diference zbytku prachu na záchytu
$\Delta \tau$	[h]	provozní doba cyklónu bez potřeby údržby
ε	[-]	expanzní součinitel
η	[Pa·s]	dynamická viskozita plynu
ρ_{cl}	[kg/m ³]	hustota vzduchu na cloně
$\rho_{č}$	[kg/m ³]	hustota částice
ρ_{Hg}	[kg/m ³]	hustota rtuti
ρ_o	[kg/m ³]	hustota vzduchu v bodě „O“
$\rho_{líh}$	[kg/m ³]	hustota lihu
ρ_R	[kg/m ³]	hustota vzduchu v bodě „R“
ρ_s	[kg/m ³]	hustota vzduchu v potrubí
τ	[min]	doba provozu
$\tau_{č,m}$	[s]	doba relaxace částice
τ_{teor}	[min]	teoretická doba jednoho měření
τ_{skut}	[min]	skutečná doba jednoho měření

Indexy

<i>Hg</i>	rtuť
<i>líh</i>	líh
<i>skut</i>	skutečná
<i>teor</i>	teoretická

1. ÚVOD

Znehodnocování kvality ovzduší představuje dlouhodobý problém v celosvětovém měřítku, z čehož plyne důležitost jeho ochrany s ohledem na zdraví lidí, zvířat a na kvalitu vegetace. Jedním z významných problémů znečištění ovzduší v ČR představují prachové částice, které mohou mít negativní vliv na zdraví populace.

Nástrojem, který slouží k regulaci znečišťování, jsou mezinárodní úmluvy o ochraně ovzduší a legislativy jednotlivých zemí. V České legislativě pojednává o této problematice Zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší a navazující vyhlášky Ministerstva životního prostředí. Zákon určuje emisní a imisní limity pro celou řadu znečišťujících látek, popisuje způsob sledování kvality ovzduší v ČR a odkazuje na platnou technickou normu ČSN EN 12341, kde jsou stanoveny referenční metody pro odběr vzorků PM_{10} a $PM_{2,5}$.

Monitoring kvality ovzduší na našem území zastřešuje Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ), který provozuje síť měřicích stanic, ve kterých se pro měření frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$ používají zařízení pracující na impakčním principu. Nevýhodou těchto přístrojů jsou však vyšší nároky na kvalitu impakční plochy a požadavek na pravidelnou kontrolu a údržbu.

Tato práce navazuje na výzkum tříděného odběru vzorků emisí a imisí na Ústavu techniky prostředí. Cílem práce je popsat současný stav měření imisí tuhých znečišťujících látek, zejména měřicí metody frakcí částic PM_{10} a $PM_{2,5}$, dále zhodnotit dosavadní výsledky vývoje imisní hlavice PM_{10} a v návaznosti na předchozí výstupy navrhnout úpravu stávající hlavice, ověřit ji na zkušební trati a vyhodnotit třídící schopnosti tohoto zařízení.

2. VYSVĚTLENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

2.1 Pojem ochrana ovzduší

Pojmem ochrana ovzduší se rozumí především ochrana vnějšího ovzduší před škodlivými a toxickými látkami. Do tohoto pojmu lze rovněž zahrnout i ochranu prostředí vnitřního, tedy pracovních a obytných prostor. Dle [1] lze ochranu ovzduší definovat jako komplexní soubor technických a administrativních opatření, směřujících ke zmírnění či snížení míry znečišťování ovzduší s ohledem na rozvoj průmyslu a dalších jevů, které mají na kvalitu ovzduší zásadní vliv. Jako příklady lze uvést spalování hnědého uhlí s vysokým obsahem síry, spalování tuhých paliv a především automobilovou dopravu.

Vzhledem k tomu, že ovzduší je pro člověka jednou z nejdůležitějších složek potřebných k životu, je jeho ochraně věnována nemalá pozornost v celosvětovém měřítku. O tématu kvality ovzduší pojednávají legislativy jak jednotlivých zemí, tak mezinárodní úmluvy, jmenujme například Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu [4]. Nejinak je tomu i v České Republice, především tedy v posledních dvou desítkách let [2]. O této problematice v rámci ČR a Evropské Unie bude podrobněji pojednávat třetí kapitola této práce.

2.2 Emise a imise

Emise neboli znečišťování ovzduší lze chápat jako děj, při kterém dochází k vypouštění znečišťujících látek do ovzduší. Zdroje emisí lze rozčlenit podle jejich původu, a to na přírodní (např. sopečná činnost, znečišťující látky produkované rostlinami) a antropogenní (činnosti, které způsobuje člověk). Český hydrometeorologický ústav (dále jen ČHMÚ) posuzuje úroveň znečišťování z hlediska lidské činnosti, tedy pro znečišťující látky antropogenního původu a skleníkové plyny [3] [4].

Mezi nejvíce rozšířené druhy emisí patří především tyto látky: oxid siřičitý (SO_2), oxidy dusíku (označované jako NO_x), TZL (tuhé znečišťující látky), oxidy uhlíku, především CO_2 , organické látky [4].

Za účelem mapování emisí škodlivin a záznamem údajů o stacionárních a mobilních zdrojích znečišťování v rámci ČR je v ČHMÚ od roku 1974 vyvíjena jejich databáze – tzv. registr emisí a zdrojů znečišťování ovzduší (REZZO). Ten rozlišuje dle platné legislativy celkem 4 skupiny zdrojů emisí, přičemž určuje, zda jsou sledovány jednotlivě nebo hromadně [1] [3].

Pojem imise neboli znečištění ovzduší označuje přítomnost znečišťujících látek v ovzduší v takovém množství a době trvání, že je patrný jejich negativní vliv na životní prostředí. Obecně je tedy znečištění výsledek přenášení škodlivých a nebezpečných látek do atmosféry. Tyto látky se v přízemních vrstvách atmosféry mohou šířit na dlouhé i kratší vzdálenosti, reagovat se vzduchem a v důsledku toho měnit svoje chemické složení, které může být více škodlivé než to původní [1] [3].

V každém případě je obsah nebezpečných látek rozhodujícím kritériem při hodnocení jejich vlivu nejen na člověka, ale i na faunu, flóru a okolní prostředí [1].

2.3 Druhy znečišťujících látek a jejich účinky na okolní prostředí

Znečišťující látky se nejčastěji rozdělují podle jejich chemického složení, skupenství či vlivu na životní prostředí. V tabulce níže (viz tab. 2.1) je uveden přehled základních vlastností škodlivých látek, které se významně podílí na znečišťování životního prostředí [1] [6].

Mezi hlavní příčiny uvolňování těchto škodlivin patří především spalování fosilních paliv (např. nekvalitní hnědé uhlí, topné oleje, nafta), spalování odpadů a toxických materiálů. V poměrně rozsáhlém měřítku rovněž přispívají ke špatné kvalitě ovzduší i výfukové plyny z automobilové dopravy [1] [6].

Významný je z hlediska kvality ovzduší i troposférický, neboli přízemní ozón. Ten vzniká z molekulárního kyslíku reakcí s oxidy dusíku a těkavými uhlovodíky z výfukových plynů díky vlivu slunečního záření. Přízemní ozon působí jako silné oxidační činidlo zejména na dýchací cesty člověka, poškozují některé materiály (např. plastické hmoty, gumy) a má negativní dopad na živé organismy [3].

Tab. 2.1 Přehled nejvíce rozšířených znečišťujících látek [6]

Škodlivina	Vlastnosti	Vznik	Vliv na zdraví a prostředí
Tuhé znečišťující látky (TZL)	Charakteristické velikostí a složením původního paliva	Především spalováním pevných paliv	Způsobují potíže s dýcháním, konkrétně ale závisí na chemickém složení
Oxid siřičitý (SO ₂)	Bezbarvý plyn štiplavého zápachu	Spalování paliv s obsahem síry	Dráždivé účinky, způsobuje dýchací potíže
Oxid dusičitý (NO ₂)	Červenohnědý plyn, rozpustný ve vodě	Spalování fosilních paliv, oxidací NO	Přispívá ke zhoršování srdečních chorob, snižování krevního tlaku
Oxid uhelnatý (CO)	Bezbarvý plyn, ve vzduchu oxiduje na CO ₂	Nedokonalé spalování uhlíkatých materiálů	Blokuje okysličení krve, způsobuje poruchy vidění a koordinace
Oxid uhličitý (CO ₂)	Bezbarvý plyn slabě kyselého zápachu, těžší než vzduch	Spalování fosilních a motorových paliv s obsahem uhlíku	Nebezpečný až při vyšší koncentraci (3-5%), skleníkový plyn
Těkavé organické látky (VOC)	Organické látky s nízkým bodem varu (benzen, toluen, atd.)	Výfukové plyny, odpařováním pohonných hmot	Karcinogenní a dráždivé účinky, nevolnost, závratě
Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)	Směs organických látek, v prostředí přetrvávají velmi dlouhou dobu	Nedokonalé spalování tuhých paliv	Karcinogenní a mutagenní účinky

2.4 Frakce PM_{10}

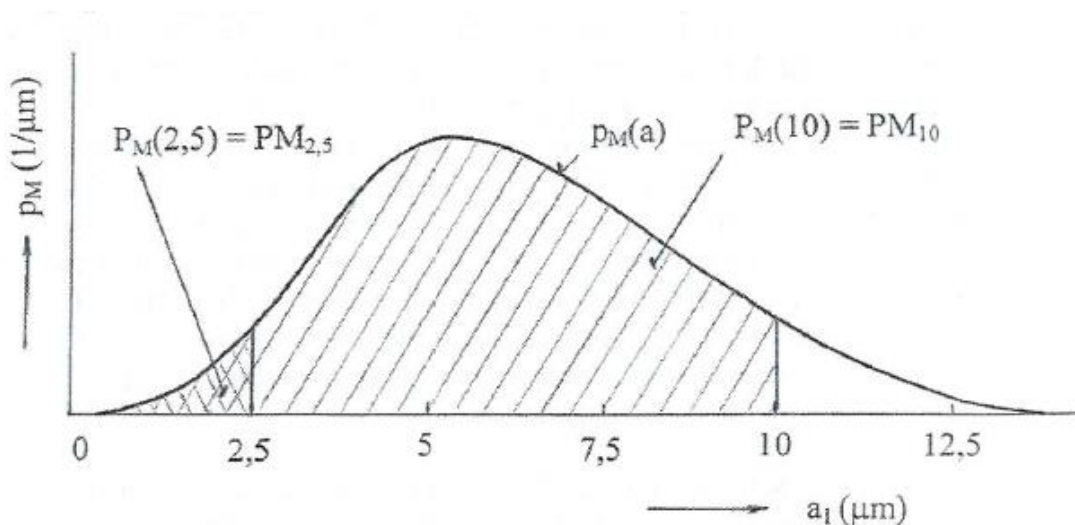
Pojem tuhé znečišťující látky (TZL) lze obecně chápat jako škodlivé látky, vyskytující se v ovzduší v tuhém skupenství. Jedná se především o polétavý prach, popílek nebo suspendované částice. Frakce částic PM_{10} a $PM_{2,5}$ mají v rámci sledování imisí význam jako ukazatelé dopadu na lidské zdraví [1].

Suspendované částice představují řadu zdravotních rizik a účinek částic závisí na jejich velikosti, tvaru a chemickém složení. Částice PM_{10} pronikají do dolních cest dýchacích a jemnější frakce $PM_{2,5}$, které mají nejvýznamnější vliv na úmrtnost, se dostávají až do plicních sklípků. Negativní vliv těchto částic se obecně projevuje zhoršenou funkcí plic, což znamená zvýšené riziko astmatu, respiračních alergií nebo rakoviny plic [1].

Frakci částic PM_{10} lze definovat jako všechny částice v souboru o hustotě 1000 kg/m^3 , které mají aerodynamickou velikost a_1 menší než $10 \text{ }\mu\text{m}$ a tudíž projdou selektivním filtrem pro aerodynamický průměr $10 \text{ }\mu\text{m}$ s odlučovací účinností 50% [1].

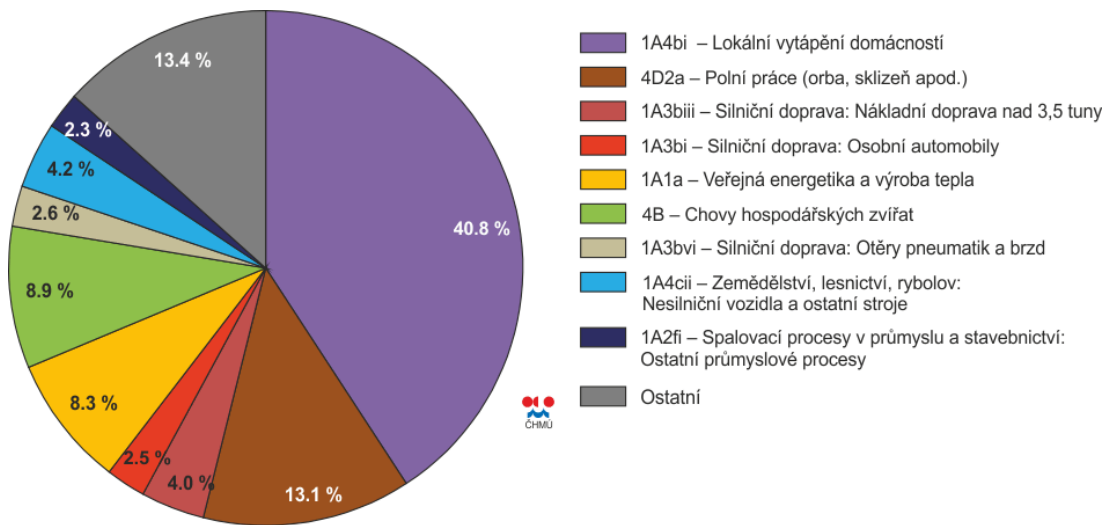
2.5 Frakce $PM_{2,5}$

Frakce částic $PM_{2,5}$ je definována obdobně jako frakce PM_{10} . Jedná se tedy o částice, jejichž aerodynamická velikost a_1 při hustotě 1000 kg/m^3 je menší než $2,5 \text{ }\mu\text{m}$. Význam frakcí $PM_{2,5}$ a PM_{10} je zřejmý z obr. 2.1, kde je soubor částic vyjádřen ve formě četnosti dle hmotnosti.

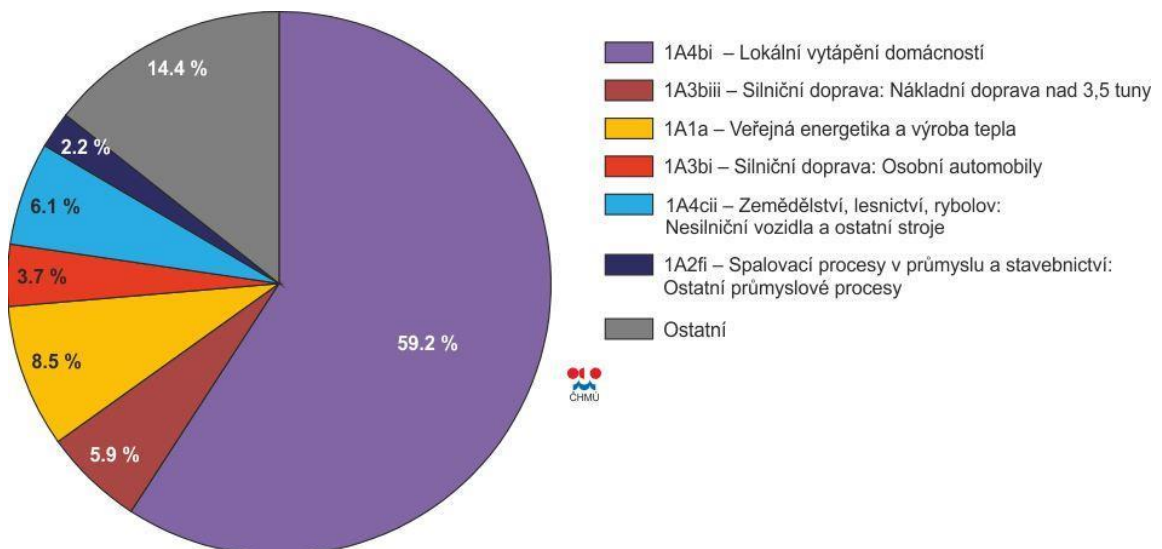


Obr. 2.1 Vyjádření definice frakcí $PM_{2,5}$ a PM_{10} [1]

Dle ČHMÚ zahrnují současné metodiky emisní inventury frakcí PM_{10} a $PM_{2,5}$ pouze emise pocházející z primárních zdrojů. Vzhledem k tomu, že částice PM mohou být do ovzduší zanášeny ze zdrojů, které emisní inventury neprovádí, je na místě věnovat původu těchto emisí větší pozornost. Například z obr. 2.2, resp. obr. 2.3, je patrný největší podíl lokálního domácího vytápění na emisích jak frakce PM_{10} , tak frakce $PM_{2,5}$ [1] [3].



Obr. 2.2 Podíl jednotlivých skupin zdrojů na emisích PM_{10} v roce 2012 [3]



Obr. 2.3 Podíl jednotlivých skupin zdrojů na emisích $PM_{2,5}$ v roce 2012 [3]

2.6 Emisní a imisní limity

Emisní limit označuje nejvyšší přípustné množství dané znečišťující látky nebo skupiny látek, uvolňovaných ze zdroje do ovzduší, a vyjadřuje se nejčastěji jako hmotnostní tok nebo hmotnostní koncentrace dané látky. Legislativa rozlišuje celkem dva různé pojmy emisních limitů – obecné a specifické [1].

Tzv. obecné emisní limity určuje zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší pro jednotlivé znečišťující látky, popř. skupiny látek, u zdrojů, které nejsou z hlediska technologie jmenovitě určeny. Jejich hodnota se zpravidla vyjadřuje pomocí hodnot hmotnostních koncentrací, kombinovaných s limitními hodnotami hmotnostních toků [1] [5].

Specifické emisní limity stanovuje výše uvedený zákon pro jmenovitě uvedené stacionární zdroje a určuje je bez ohledu na obecné emisní limity pro dané znečišťující látky, popř. jejich skupiny. Důležité je poznamenat, že specifické emisní limity jsou obecným emisním limitům nadřazeny [1] [5].

Imisní limit je označován jako nejvyšší přípustná koncentrace dané znečišťující látky obsažené v ovzduší. Legislativa ČR rovněž stanovuje tzv. cílové imisní limity, které se týkají zejména troposférického ozonu O₃, těžkých kovů (např. Cd, As, Ni) a pro benzo(a)pyren [1] [5].

3. SOUČASNÁ LEGISLATIVA OCHRANY OVZDUŠÍ

3.1 Legislativa ochrany ovzduší v ČR

Legislativu ochrany ovzduší v ČR upravuje zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší, který vstoupil v platnost v roce 2012. Tento zákon obecně stanovuje způsoby posuzování a vyhodnocování úrovně znečištění, definuje přípustné emisní a imisní limity a určuje povinnosti provozovatelů stacionárních zdrojů znečišťování. Krom toho je zde popsán i Národní program snižování emisí České republiky zahrnující například cíle v oblasti snižování emisí a imisí, potřebná opatření za účelem snižování úrovně znečištění ovzduší, indikátory pro hodnocení plnění programu a orgány odpovědné za jeho realizaci. Tímto dle §1, odst. 2 a odst. 4 zpracovává příslušné platné předpisy Evropské unie, podrobněji uvedené v zákoně č. 201/2012 Sb. [5].

Současná platná legislativa nahrazuje několik zákonů, nařízení vlády a vyhlášek Ministerstva životního prostředí, schválených v letech 2002 až 2011, zejména tedy zákon č. 86/2002 Sb. O ochraně ovzduší a navazující právní prováděcí předpisy č. 350/2002 Sb. až č. 358/2002 Sb. a 553/2002 Sb., které se zabývaly problematikou monitoringu emisí a imisí. Tyto změny souvisí s vývojem ochrany ovzduší v ČR a především v EU[1] [5].

3.2 Zákon č.201/2012 Sb. O ochraně ovzduší

Vzhledem k poměrně velkému rozsahu zákona a jeho pojednání o dané problematice, je tato stať zaměřena pouze na stěžejní body legislativy, související s tématem této práce.

V první řadě je třeba zmínit způsoby posuzování, zjišťování a vyhodnocování úrovně znečištění a znečišťování. Dle §5 se posuzování a vyhodnocování úrovně imisí provádí pro území, popř. zónu v rámci městské aglomerace nad 250 000 obyvatel, které je k těmto účelům vymezeno. Úroveň znečištění je posuzována na základě stacionárního měření, výpočtu nebo jejich kombinací Ministerstvem životního prostředí, přičemž se hodnotí, zda byl příslušný limit v dané oblasti překročen, či nikoliv. Výše zmíněné měření, popř. výpočet, provádí tzv. autorizovaná osoba v souladu s §32 odst. 1 písm. b) tohoto zákona. Úroveň znečišťování zjišťuje dle §6 odst. 1 provozovatel zdroje a to

u znečišťující látky, pro kterou je stanovený specifický emisní limit, popř. emisní strop a u stacionárního zdroje a znečišťující látky, které uvádí Příloha č. 4 tohoto zákona [5].

Jak již bylo uvedeno výše, součástí zákona jsou také nástroje ke snížení úrovně znečišťování a znečištění, konkrétně tedy Národní program snižování emisí České republiky (dále jen „NPSE“), který se zpracovává nejméně jednou za 4 roky a je schvalován vládou ČR [5]. Mezi hlavní cíle NPSE patří především snižování rizik pro zdraví člověka, snížit zátěž životního prostředí látkami, které poškozují ekosystémy a vegetaci a snaha o regeneraci postižených oblastí a složek životního prostředí. S tím souvisí i podpora rozvoje nových technologií, šetrných k životnímu prostředí a efektivnější využívání energetických úspor. Koncem roku 2014 byl NPSE doplněn usnesením vlády č. 1077, který stanovuje národní cíl snížení expozice pro částice PM_{2,5} a je v souladu se směrnicí Evropského parlamentu a Rady 2008/50/ES ze dne 21. května 2008 o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduším pro Evropu [2]. Konkrétní hodnoty cílových koncentrací pro PM_{2,5} jsou uvedeny v tab. 3.1.

Tab. 3.1 Národní cíle pro snižování expozice pro částice PM_{2,5} [2]

Název indikátoru	Hodnota koncentrace
Národní cíl snížení expozice pro částice PM _{2,5} do r. 2015	20 µg/m ³
Národní cíl snížení expozice pro částice PM _{2,5} do r. 2020	18 µg/m ³
Imisní limit pro PM _{2,5} stanovený k 1. 1. 2015	25 µg/m ³
Imisní limit pro PM _{2,5} stanovený k 1. 1. 2020	20 µg/m ³

3.3 Smogová situace a nízkoemisní zóny

Dle §10 zákona č. 201/2012 Sb. je smogová situace určena jako stav mimořádně znečištěného ovzduší, kdy úroveň imisí uvedených znečišťujících látek (SO₂, NO₂, O₃, nebo PM₁₀) překročí některou z prahových hodnot, které uvádí Příloha č. 6 tohoto zákona. Zákon uvádí dva druhy prahových hodnot koncentrací – informativní a regulační, které jsou vztaženy na konkrétní počet, resp. poměr měřicích lokalit v dané oblasti o minimální rozloze 100 km² [5].

Nízkoemisní zóny (NEZ) představují oblasti, do kterých je omezen vjezd motorových silničních vozidel způsobujících větší znečištění, mimo vozidla označená

tzv. emisní plaketou. Ta je vydávána na základě plnění emisních norem EURO, případně i dle data první registrace vozidla. Zároveň musí existovat i objízdna trasa vedoucí mimo danou NEZ pro vozidla bez emisní plakety. Podmínky pro zavedení nízkoemisní zóny uvádí §14 zákona O ochraně ovzduší a lze je vyhlásit v lázeňských oblastech, zvláště chráněných územích či oblastech, kde došlo k překročení některého z imisních limitů [2].

3.4 Imisní limity

Zákon č. 201/2012 rovněž stanovuje imisní limity pro řadu znečišťujících látek. Tab. 3.2 uvádí imisní limity pro ochranu zdraví pro vybrané látky v hodinových a 24hodinových koncentracích a současně maximální počet jejich překročení. Zároveň jsou v tabulce uvedeny dolní a horní meze posuzování imisních limitů [5].

Tab. 3.2 Imisní limity pro ochranu zdraví [3]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Mez pro posuzování [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Imisní limit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] LV
		Dolní LAT	Horní UAT	
SO ₂	1 hodina	-	-	350 max. 24x za rok
	24 hodin	50 max. 3x za rok	75 max. 3x za rok	125 max. 3x za rok
NO ₂	1 hodina	100 max. 18x za rok	140 max. 18x za rok	200 max. 18x za rok
	1 rok	26	32	40
PM ₁₀	24 hodin	25 max. 35x za rok	35 max. 35x za rok	50 max. 35x za rok
	1 rok	20	28	40
PM _{2,5}	1 rok	12	17	25
Pb	1 rok	0,25	0,35	0,5
CO	maximální denní 8hod. klouzavý průměr	5 000	7 000	10 000
Benzen	1 rok	2	3,5	5

Tab. 3.3 dále uvádí přehled imisních limitů pro ochranu ekosystému a vegetace, které se týkají oxidu siřičitého a oxidů dusíku. V případě hodnot NO_x se jedná o součet objemových poměrů NO a NO₂ vyjádřený v jednotkách hmotností koncentrace NO₂. V další tabulce (tab. 3.4) najdeme imisní limity pro celkový obsah znečišťujících látek v částicích PM₁₀ vyhlášené pro ochranu zdraví lidí.

Tab. 3.3 Imisní limity pro ochranu ekosystémů a vegetace [3]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Mez pro posuzování [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		Imisní limit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] LV
		Dolní LAT	Horní UAT	
SO ₂	Rok a zimní období (1. 10 – 31. 3.)	8	12	20
NO _x	1 rok	19,5	24	30

Tab. 3.4 Imisní limity pro ochranu zdraví – celkový obsah v částicích PM₁₀ [3]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Mez pro posuzování [ng/m^3]		Imisní limit [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] LV
		Dolní LAT	Horní UAT	
As	1 rok	2,4	3,6	6
Cd	1 rok	2	3	5
Ni	1 rok	10	14	20
Benzo(a)pyren	1 rok	0,4	0,6	1

3.5 Povinnosti provozovatelů a sazby poplatků za znečišťování

Mezi povinnosti provozovatele stacionárního zdroje patří dle §17 zákona č. 201/2012 především dodržování emisních limitů a emisních stropů, dodržování technických podmínek provozu, spalování paliv určených výrobcem nebo povolených v provozu nebo předkládání informací o provozu a emisích zdroje příslušnému orgánu ochrany ovzduší na vyžádání. V neposlední řadě je zde i povinnost úhrady poplatku za znečišťování, jehož výše závisí na množství vypouštěných látek. Následující tabulka ukazuje sazby poplatků za jednotlivé znečišťující látky v nejbližších letech (v Kč/t) [5].

Tab. 3.5 Sazby poplatků za znečišťování [5]

	do r. 2016	2017	2018	2019	2020	od r. 2021
TZL	4 200	6 300	8 400	10 500	12 600	14 700
SO₂	1 350	2 100	2 800	3 500	4 200	4 900
NO_x	1 100	1 700	2 200	2 800	3 300	3 900
VOC	2 700	4 200	5 600	7 000	8 400	9 800

3.6 Mezinárodní úmluvy o ochraně ovzduší

Znečišťování ovzduší představuje v současnosti problém v globálním měřítku, z čehož vyplývá zavedení legislativy ochrany životního prostředí na mezinárodní úrovni. Problematikou ochrany ovzduší se výrazněji zabývají mezinárodní organizace (např. OSN) přibližně od 80. let 20. století. Jako zástupce mezinárodních úmluv, které se týkají životního prostředí, si uvedme především Rámcovou úmluvu OSN o změně klimatu [4].

Rámcová úmluva OSN o změně klimatu (dále jen „Úmluva“) byla schválena na Konferenci OSN o životním prostředí a rozvoji v roce 1992 v Rio de Janeiro a v platnost vstoupila v březnu 1994. Česká republika pak Úmluvu podepsala a ratifikovala v roce 1993. Základními pilíři, o které se Úmluva opírá, jsou:

- ochrana klimatického systému ve prospěch příštích generací,
- odpovědnost ekonomicky vyspělých zemí za rostoucí koncentrace skleníkových plynů a poskytnutí pomoci zemím rozvojovým,
- ochrana oblastí, které jsou více náchylné na negativní dopady znečišťování prostředí,
- neodkladnost řešení problémů v oblasti ochrany ovzduší.

Neméně významný je i Kjótský protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu z roku 1997, který pojednává zejména o snižování emisí skleníkových plynů. Platnost Kjótského protokolu byla před třemi lety prodloužena do roku 2020 a tzv. Kjótský protokol II byl schválen všemi členskými státy EU a zhruba desítkou dalších zemí, jmenujme např. Austrálii [18].

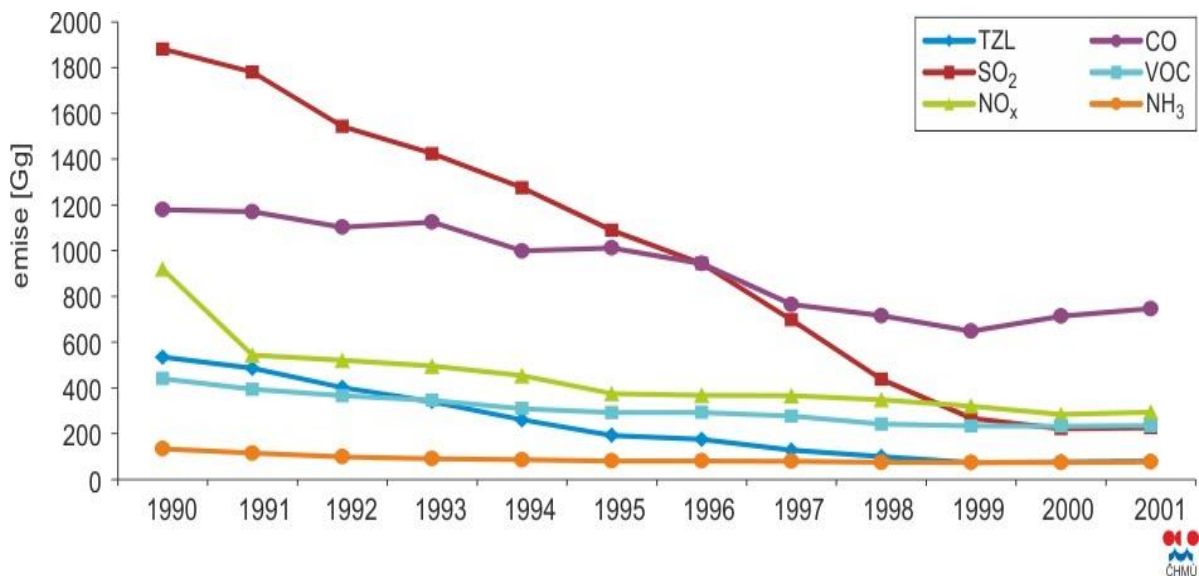
V ČR rozvíjí mezinárodní spolupráci úsek ochrany ovzduší ČHMÚ s Evropskou agenturou pro životní prostředí a s Joint Research Centre [3].

4. SOUČASNÝ STAV A VÝVOJ KVALITY OVZDUŠÍ

4.1 Vývoj kvality ovzduší v ČR

Po negativním vývoji znečištění ovzduší před rokem 1989 došlo v 90. letech k významnému zlepšení kvality ovzduší v České republice díky mnoha investicím do snižování emisí. V roce 1991 nabyl platnosti zákon č. 309/1991 O ochraně ovzduší, který poprvé zavedl pojem emisní limit do české legislativy. Ke zlepšení kvality ovzduší tak výrazně přispěla modernizace zdrojů emisí, náhrada fosilních paliv zemním plynem a zvýšení sazeb za vypouštění znečišťujících látek. Vliv měla i restrukturalizace průmyslu po r. 1989 [2] [3].

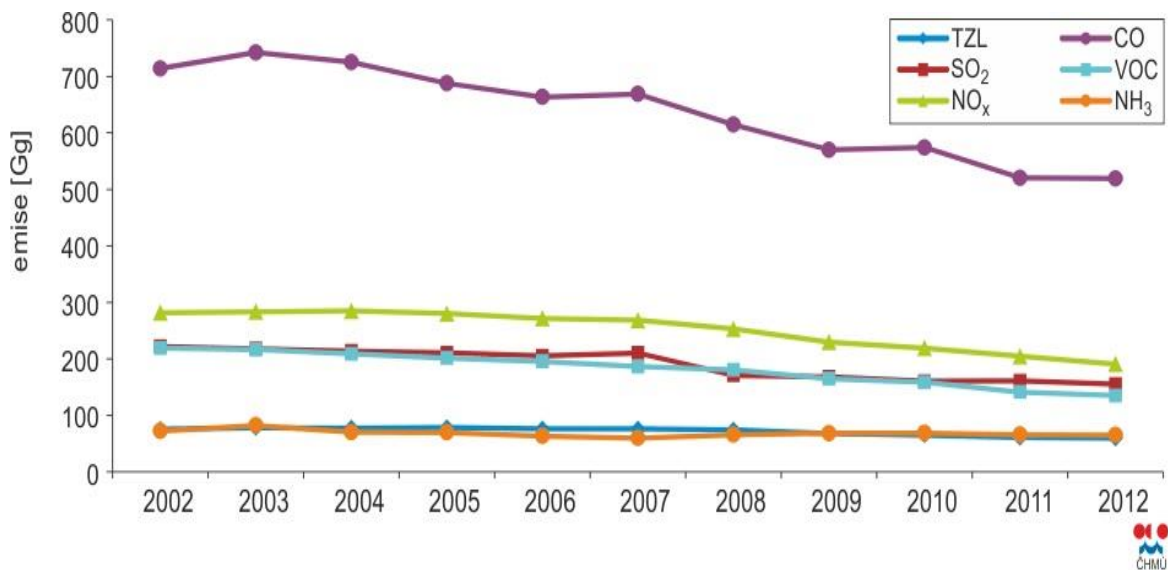
Trend vývoje úrovně znečišťování v letech 1990 až 2001 ukazuje graf níže. V tomto období je nejvýraznější pokles emisí tuhých znečišťujících látek a oxidu siřičitého, který činí až 85%, resp. 88%. Ostatní zobrazené znečišťující látky zaznamenaly pokles v rozmezí zhruba 40 – 70 % [3].



Obr. 4.1 Vývoj emisí znečišťujících látek v letech 1990 – 2001[3]

V dalším období, tedy po roce 2000, se vývoj emisí odvíjí od uplatňování nových výrobních i odlučovacích technologií, platnosti nové legislativy z roku 2002, související se vstupem ČR do Evropské Unie, a rozvoje automobilové dopravy a průmyslu. Poslední zmiňovaný aspekt má za následek stagnaci až mírné zhoršení kvality ovzduší i přes nová opatření. Z hlediska vývoje do roku 2012 (viz obr. 4.2) lze

však říci, že množství vypouštěných znečišťujících látek nadále klesá, byť mnohem méně výrazně než v předchozím desetiletí [1] [2].



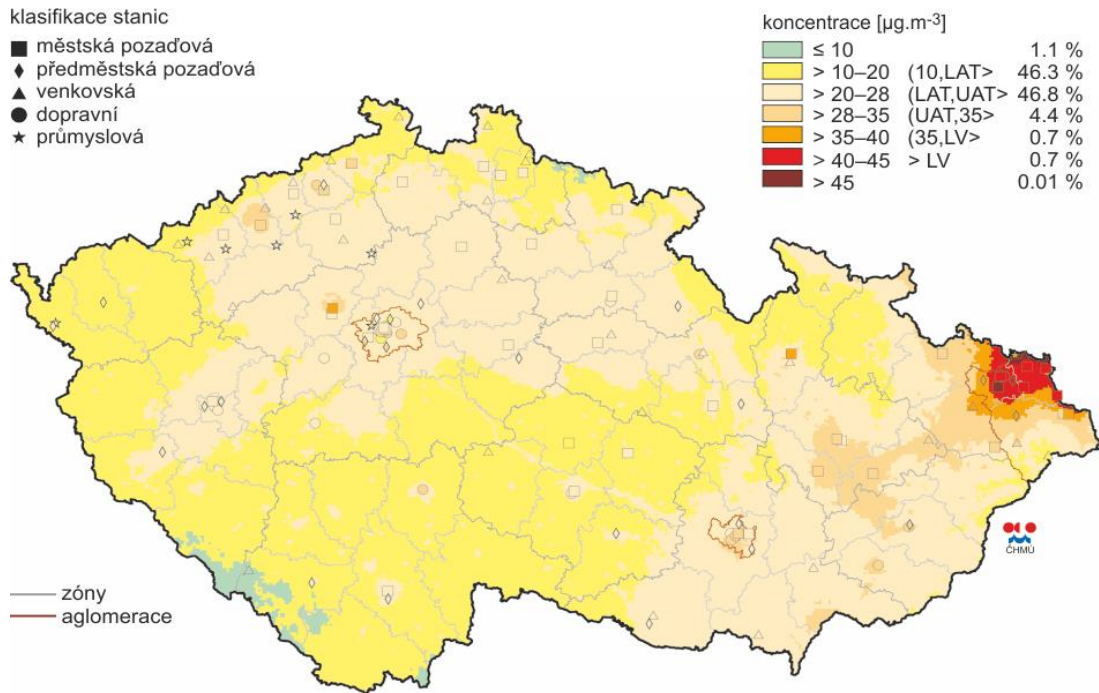
Obr. 4.2 Vývoj emisí znečišťujících látek v letech 2002 – 2012[3]

V roce 2012 nabyl platnosti nový zákon o ochraně ovzduší, o němž blíže pojednává předchozí kapitola a který zavádí přísnější emisní limity. Nová legislativa se rovněž více zaměřuje na sektor lokálního vytápění, který má na emisích velmi významný podíl. K příznivějšímu vývoji kvality ovzduší by rovněž měla přispět další modernizace zdrojů emisí a mezinárodní závazky k dalšímu omezování znečišťování [3].

4.2 Kvalita ovzduší v ČR

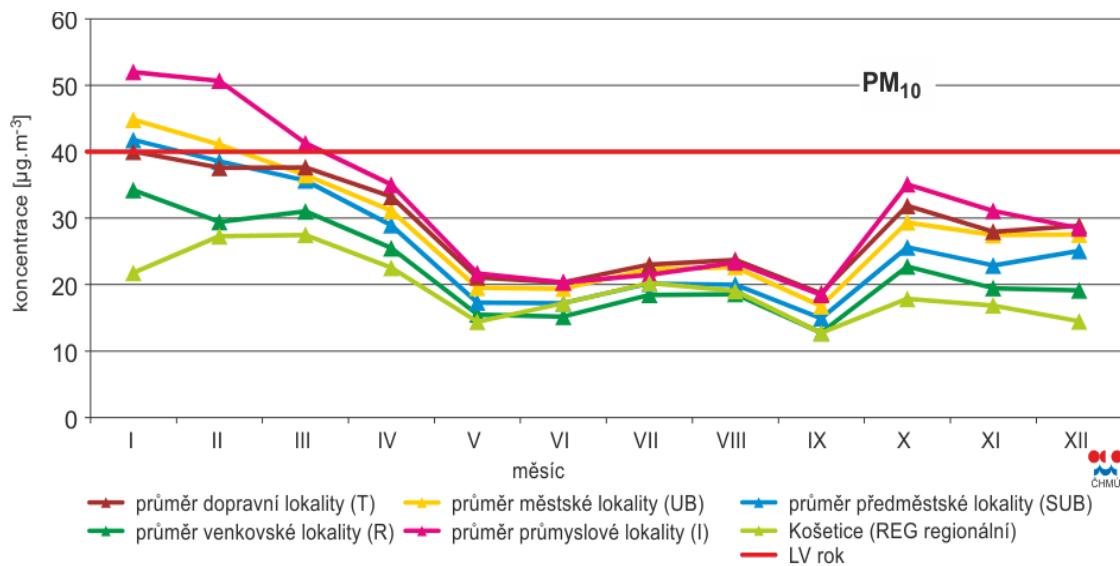
V současné době představuje největší problém u nás znečištění ovzduší suspendovanými částicemi frakce PM₁₀, resp. PM_{2,5} [3].

Dle údajů ČHMÚ z roku 2013 byl imisní limit částic PM₁₀ překročen na 5,7 % území ČR s cca 15,9 % obyvatel v případě 24hodinové koncentrace (viz obr. 4.3), roční imisní limit pak byl překročen na 0,7 % území s 4,8 % populace ČR. Z obrázku jsou rovněž patrné nejvíce zasažené oblasti ČR, tedy území Moravskoslezského kraje, Ostravsko a Karvinsko [3].



Obr. 4.3 Pole 36. nejvyšší 24hodinové koncentrace PM_{10} v roce 2013 [3]

Zaměříme-li se na roční chod koncentrací v jednotlivých měsících roku 2013 (viz obr. 4.4), pak nejvyšší hodnoty vykazují chladné zimní měsíce, což nejvíce souvisí s potřebou vytápění a horšími rozptylovými podmínkami, které jsou v zimním období častější [3].



Obr. 4.4 Roční chod průměrných měsíčních koncentrací PM_{10} v roce 2013 [3]

V případě částic frakce $PM_{2,5}$ pak byl v roce 2013 překročen roční imisní limit na 2,4% území ČR s cca 9,6 % obyvateli. Dle údajů ČHMÚ byl procentuální podíl rozlohy oblastí s překročeným limitem nižší než v předcházejícím roce, přesto se průměrná roční koncentrace částic $PM_{2,5}$ nepatrně zvýšila. Roční chod průměrných koncentrací je pak podobný jako u frakce PM_{10} , zejména co se týče vyšších koncentrací v zimních měsících [3].

Poměr frakcí $PM_{2,5}$ a PM_{10} závisí na umístění dané lokality a především je ovlivněn ročním obdobím. V roce 2013 se tento poměr v rámci celé ČR pohyboval v rozmezí hodnot 0,68 až 0,82 [3].

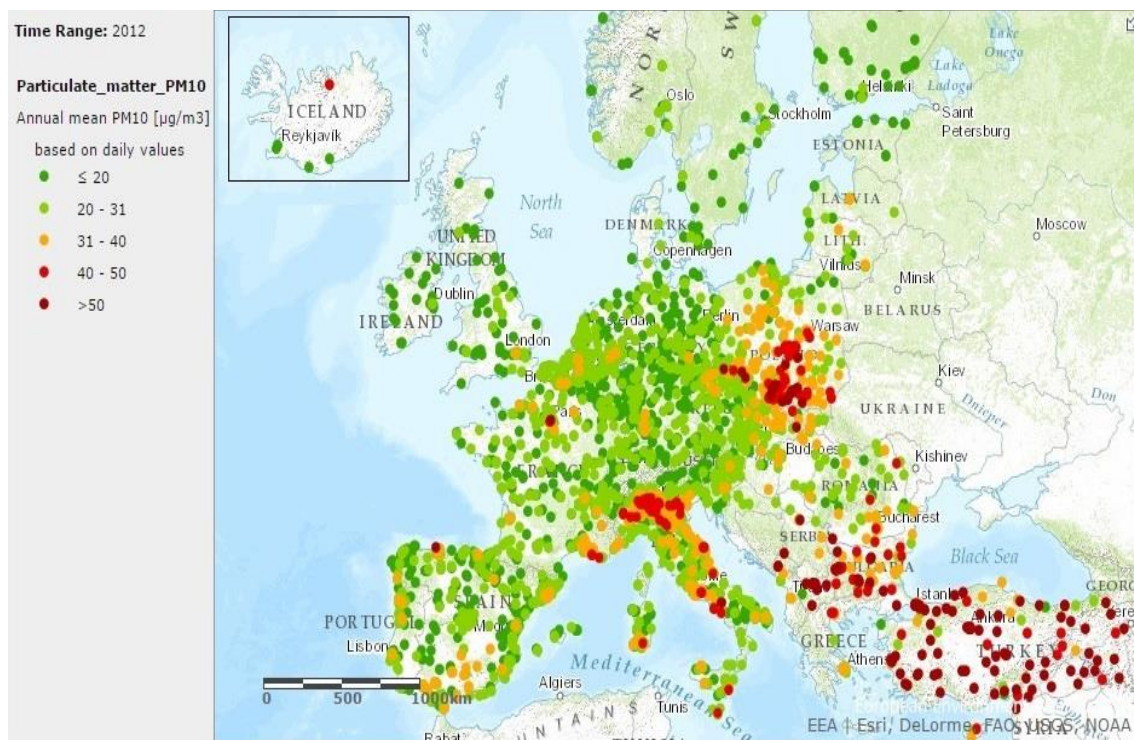
Hodnoty imisí oxidu siřičitého v České republice se v současnosti daří dlouhodobě udržovat pod imisními limity, což je způsobeno zejména rozsáhlým odsiřováním a změnou používaných paliv. Vyjma let 2009 a 2010, kdy došlo k mírnému nárůstu imisí SO_2 , je trend znečišťování touto látkou nadále klesavý a průměrné koncentrace překračují imisní limity pouze výjimečně [3].

Znečištění oxidy dusíku je v současnosti největší problém pro oblasti zatížené dopravou, odkud pochází největší množství emisí této látky. Nejvyšší koncentrace NO_x u nás tak bývají naměřeny hlavně v aglomeracích větších měst (Praha, Brno, Ostrava). Z toho vyplývá, že imisní limity jsou překračovány hlavně v těchto oblastech. Dle údajů ČHMÚ z roku 2013 došlo k překročení ročního imisního limitu na 4,4% stanic z celkových 90 lokalit [3].

4.3 Úroveň znečištění částicemi PM_{10} v zahraničí

Mezi organizace sledující kvalitu ovzduší v rámci lidského zdraví v celosvětovém měřítku patří mimo jiné Světová zdravotnická organizace (World Health Organization). Ta každoročně vyhodnocuje úroveň znečištění částicemi PM_{10} a $PM_{2,5}$ v databázi venkovního znečištění v městských aglomeracích pro celkem 1 600 měst v 91 zemích světa. Podle posledních údajů se průměrné koncentrace částic PM_{10} v městských aglomeracích na jednotlivých kontinentech, pohybují v rozmezí 26 – 208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Průměrné nejvyšší koncentrace byly zjištěny v zemích na východě Středomoří, naopak nejnižší průměrné hodnoty vykazují ekonomicky vyspělé země. Celosvětový průměr v městské aglomeraci pak činí 71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [7].

Podrobnější přehled o znečištění částicemi PM_{10} v Evropě znázorňuje mapa níže (viz obr. 4.5). Zde jsou patrné vyšší hodnoty průměrných ročních koncentrací v Turecku, Bulharsku a některých částech Itálie a Polska oproti zbytku Evropy. Naopak nejlepší úroveň kvality ovzduší lze pozorovat v severských zemích, Velké Británii, Německu a zemích Beneluxu.



Obr. 4.5 Průměrné roční koncentrace PM_{10} v Evropě v roce 2012 [8]

5. TECHNICKÉ NORMY ČSN ISO 7708, ČSN EN 12341

5.1 ČSN ISO 7708 Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků z hodnocení zdravotních rizik

5.1.1 Předmět normy

Předmětem této normy je definice konvence pro odběr vzorků velikostních frakcí, které musí být používány při hodnocení možných účinků částic vdechovaných na pracovišti a vně budov na zdraví. Norma definuje konvence pro frakce, které jsou vdechovatelné, thorakální a respirabilní, extrathorakální a tracheobronchiální. Frakce je možné vypočítat z již definovaných konvencí. Tyto konvence slouží k určení hmotnostních zbytků a vyhodnocení celkového povrchu nebo počtu částic v odebíraném vzorku [9].

5.1.2 Termíny a definice použité v normě

1. Konvence pro odběr vzorků: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro jednotlivé aerodynamické průměry částic přibližně odpovídá:
 - V případě vdechovatelné konvence poměru hmotnostní koncentrace částic vstupujících do dýchacího ústrojí k odpovídající hmotnostní koncentraci částic před tím, než byly částice ovlivněny přítomností exponované osoby a vdechováním;
 - V případě ostatních konvencí poměru hmotnostní koncentrace částic vstupujících do dýchacího ústrojí k hmotnostní koncentraci částic vstupujících do dýchacího ústrojí. Tyto ostatní konvence je možno vyjádřit i jako poměry k hmotnostní koncentraci polévatého prachu.
2. Aerodynamický průměr částice: průměr koule o hustotě 1 g/cm^3 se stejnou konečnou rychlostí způsobenou gravitační silou v klidném ovzduší, jako má částice za obvyklých podmínek teploty, tlaku a relativních vlhkosti.
3. Vdechovatelná frakce: hmotnostní zlomek aerosolových částic, které jsou vdechnuty nosem a ústy. Vdechovatelná frakce závisí na rychlosti a směru pohybu vzduchu, na frekvenci dýchání a dalších faktorech.
4. Vdechovatelná konvence: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení vdechovatelné frakce.

Vzorkovací křivka pro přístroje, které odebírají vdechovatelnou frakci pro všechny směry proudění, je dána pro rychlost $u < 4$ m/s. Procento počtu E_1 odebíraných aerosolových částic o aerodynamickém průměru a_1 [μm] je dáno vztahem:

$$E_1 = 50 (1 + \exp [-0,06 a_1]) \quad (5.1)$$

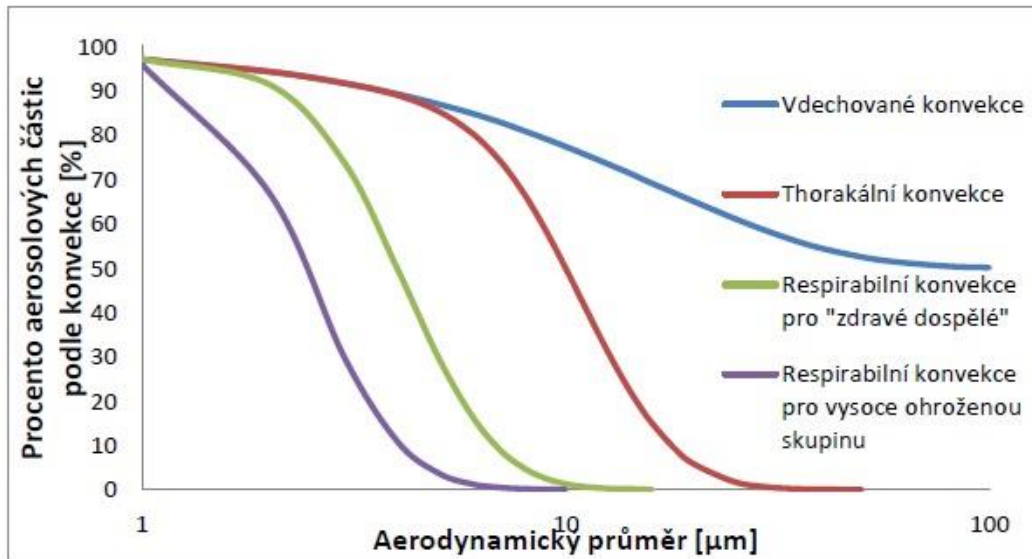
Experimentální údaje pro $a_1 > 100$ μm prozatím neexistují a tudíž nelze tuto rovnici uplatnit pro větší částice. Pro rychlost proudění $u > 4$ m/s je možno použít rovnici (5.2), jejíž užití je však omezeno pro částice o $a_1 < 90$ μm a nejvyšší rychlost $u = 9$ m/s.

$$E_1 = 50 (1 + \exp [-0,06 a_1]) + 10^{-3} u^{2,75} \exp [0,055 a_1] \quad (5.2)$$

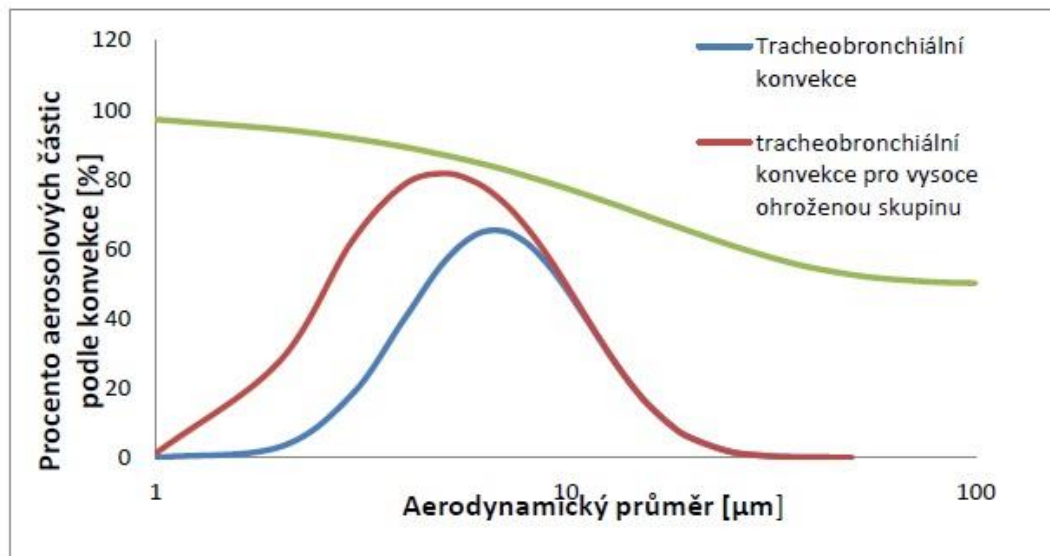
5. Extrathorakální frakce: hmotnostní zlomek vdechnutých částic, které nepronikají za hrtan
6. Extrathorakální konvence: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení extrathorakální frakce. Tato konvence se vypočítá jako rozdíl vdechovatelné a thorakální konvence ($E_1 - E_T$) pro každý aerodynamický průměr a_1 .
7. Thorakální frakce: hmotnostní zlomek vdechovaných částic pronikajících za hrtan
8. Thorakální konvence: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení thorakální frakce. Tato konvence se označuje jako E_T a lze ji vypočítat z vdechovatelné konvence E_1 .
9. Tracheobronchiální frakce: hmotnostní zlomek vdechnutých částic pronikajících za hrtan, ale nepronikajících do dýchacích cest bez řasinkového epitelu
10. Tracheobronchiální konvence: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení tracheobronchiální frakce. Lze ji vypočítat jako rozdíl thorakální a respirabilní konvence ($E_T - E_R$) pro každý aerodynamický průměr a_1 .
11. Respirabilní frakce: hmotnostní zlomek vdechnutých částic, které pronikají do dýchacích cest, kde není řasinkový epitel
12. Respirabilní konvence: specifikace přístrojů k odběru vzorků pro stanovení respirabilní frakce
13. Aerosolové částice: všechny částice obklopené vzduchem v daném objemu vzduchu

5.1.3 Přístroje pro měření konvencí frakcí částic

Pro účely měření frakcí není zcela možné zkonstruovat přístroje tak, aby udávaly hodnoty, přesně odpovídající daným konvencím. Co ovšem lze, je určení pravděpodobnosti, se kterou leží charakteristiky přístroje v určitém rozmezí a to díky zkoušení přístroje. Toto srovnání dává možnost přezkoušení přístroje za pomoci omezeného počtu nutných proměnných, viz obr. 5.1 a 5.2 [9].



Obr. 5.1 Vdechovatelná, thorakální a respirabilní konvence jako procenta z aerosolových částic [16]



Obr. 5.2 Vdechovatelná a tracheobronchiální konvence jako procenta z aerosolových částic [16]

5.2 ČSN EN 12341 Kvalita ovzduší – Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM₁₀ a PM_{2,5}

5.2.1 Předmět normy

Hlavním důvodem vzniku této normy [10] je jednotné hodnocení kvality ovzduší v Evropské unii a jejím úkolem je poskytování jednotné metodiky měření hmotnostních frakcí PM₁₀ a PM_{2,5} v aerosolových částicích venkovního prostředí. Norma byla vydána v souladu s ustanovením Směrnice 2008/50/EC Evropského parlamentu a rady o kvalitě vnějšího ovzduší a čistším ovzduší pro Evropu, v ČR vstoupila v platnost v prosinci 2014 a je dostupná prozatím jen v anglickém jazyce. Tímto byly nahrazeny dvě starší normy, konkrétně se jedná o ČSN EN 12341 z roku 2000 a ČSN EN 14907, která byla vydána o šest let později [10].

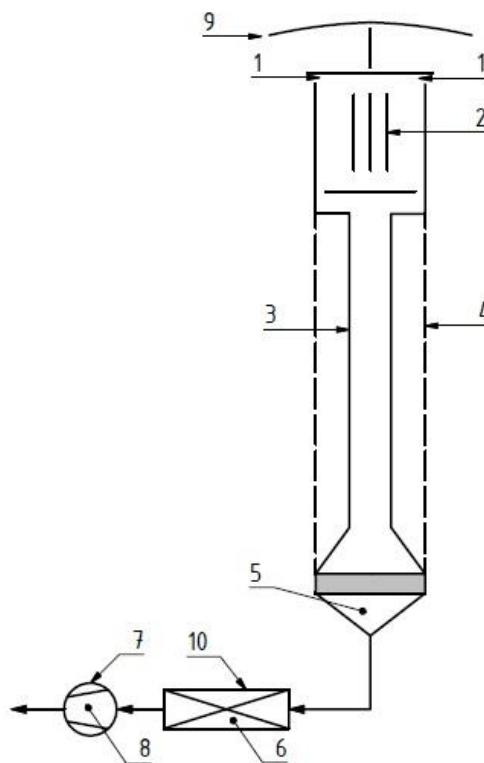
Tato normovaná metodika se zaměřuje především na sjednocení a vylepšení měřicích metod, které se používají ve staničních sítích monitoringu ovzduší s ohledem na návaznost na výstupy z předchozích normovaných metodik. Vzhledem k tomu, že prozatím neexistují referenční materiály PM_{2,5}, je měřená veličina stanovena pouze konvenčně [10].

V této normě je zahrnuto následující:

- popis normované gravimetrické měřicí metody pro frakce PM₁₀ a PM_{2,5} za použití jednotlivých filtrů,
- přehled charakteristik měřicího postupu včetně způsobu vyhodnocování výsledků a jejich nejistot,
- technické a konstrukční požadavky na měřicí zařízení vhodné pro aplikaci normované metody (viz Obr. 5.4), schéma uspořádání měřicí aparatury (viz Obr. 5.3),
- postup stanovení, zda měřicí metody, které se neřídí touto normou, odpovídají normované metodě [10].

5.2.2 Princip metody a schéma měřicího zařízení

Podstatou této metodiky je nasávání vnějšího ovzduší za stálého průtoku, který činí $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$, vzorkovacím zařízením, jehož konstrukční provedení je znázorněno na obr. 5.4. Hmotnost částic PM_{10} , resp. $\text{PM}_{2,5}$, se určí jako rozdíl hmotností filtru předtím a potom, co byl vystaven proudu znečištěného vzduchu za předem určených konstantních podmínek. Měření se provádí po dobu 24 hodin. Rozsah koncentrací, kdy je tato metoda použitelná, je určen v rozmezí od $1 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ do $150 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro frakci PM_{10} , resp. do $120 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$ pro frakci $\text{PM}_{2,5}$. Schéma měřicí aparatury fungující na základě impakčního principu je znázorněno na obrázku níže [10].

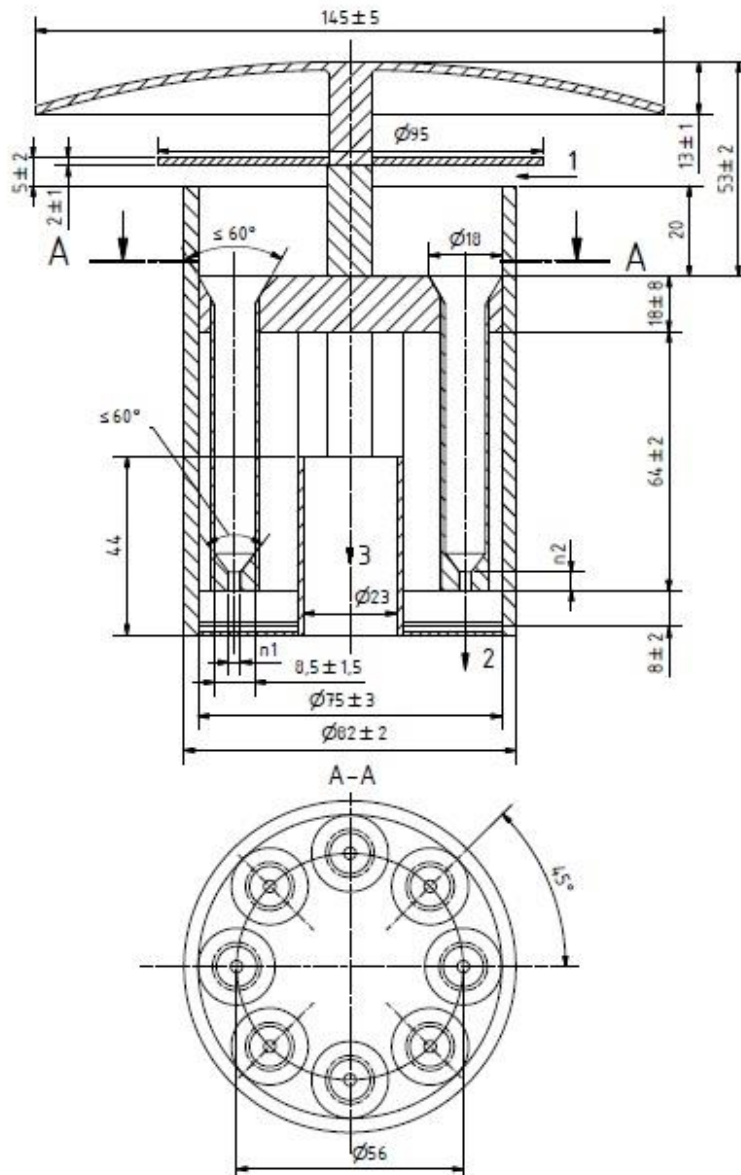


Obr. 5.3 Schéma měření [10]

Vysvětlivky:

1. vzorkované ovzduší (T_a, p_a)
2. vstupní část nárazového systému
3. spojovací potrubí
4. obal vstupní části vzduchu
5. pouzdro s filtrem
6. měřidlo průtoku
7. čerpadlo
8. systém řízení průtoku
9. měření teploty T_a a tlaku p_a
10. měření teploty T a tlaku p

5.2.3 Normovaná konstrukce vstupního otvoru vzorkovacího systému



Obr. 5.4 Konstrukce vstupního otvoru vzorkovacího systému [10]

Vysvětlivky:

Tolerance rozměrů, které nejsou určeny ve schématu: $\pm 0,2$ mm, resp. $\pm 0,5^\circ$

1. vzorkované ovzduší
2. odvod kondenzátu
3. potrubí k filtru

n1 - vnitřní průměr trysky: 2,6 mm pro $PM_{2,5}$, 6,5 mm pro PM_{10}

n2 - délka trysky: $(3,7 \pm 0,1)$ mm pro $PM_{2,5}$, $(7,0 \pm 0,1)$ mm pro PM_{10}

6. IMISNÍ MONITORING V ČESKÉ REPUBLICE

6.1 Úvod do problematiky

Záznamy o kvalitě ovzduší v České republice jsou pořizovány prostřednictvím sítě měřicích stanic v souladu se zákonem č. 201/2012 O ochraně ovzduší. Jedná se o tzv. imisní monitoring, který provádí Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ). Státní síť měřicích stanic je navržena tak, aby bylo zaručeno sledování kvality ovzduší na celém území ČR [2].

Monitoring kvality ovzduší se provádí následujícími způsoby:

- měření úrovně znečištění ovzduší na určených místech (kontinuálně nebo jednorázově), jedná se o tzv. stacionární měření;
- měření imisí, které v porovnání se stacionárním měření splňují méně přísné požadavky na kvalitu údajů (tzv. orientační měření);
- výpočet úrovně znečištění ovzduší (tzv. modelování);
- stacionární měření ve všech aglomeracích a zónách, kde se úroveň znečištění pohybuje blízko horní meze imisního limitu pro posuzování vybraných znečišťujících látek, nebo ji překračuje;
- kombinace prvních tří výše zmíněných metod v zónách, kde znečištění nepřesahuje horní mez pro posuzování;
- modelování v oblastech, kde nedochází k překračování dolní meze pro posuzování [6].

Hodnocení kvality ovzduší, které probíhá každoročně, se opírá o data ze stanic imisního monitoringu, která se pravidelně archivují v imisní databázi Informačního systému kvality ovzduší (ISKO). Data pořízená ČHMÚ jsou pak dále doplňována údaji z měření, která jsou prováděna autorizovanými osobami a řadou dalších organizací, které se podílejí na mapování kvality ovzduší v ČR (např. zdravotní ústavy, ČEZ, městské úřady, aj.) [2].

6.2 Automatický imisní monitoring (AIM)

Imisní monitoring, zastřešovaný ČHMÚ, se dělí na dvě hlavní složky: manuální imisní monitoring (MIM) a automatický imisní monitoring (AIM). Měřicí stanice AIM fungují v nepřetržitém provozu a naměřená data jsou posílána do center ČHMÚ v reálném čase. Manuální imisní monitoring pak probíhá dodatečně v laboratořích ČHMÚ po vzorkování.

V České republice najdeme téměř dvě stovky stanic imisního monitoringu, z nichž více než stovka spadá pod ČHMÚ a zbytek provozují jiné instituce, jak ukazuje tab. 6.1. Automatizované stanice měří koncentrace oxidu siřičitého (SO₂), oxidu dusnatého (NO), oxidu dusičitého (NO₂) a prachových částic (PM₁₀). Vybrané stanice potom monitorují i koncentrace ozonu (O₃), oxidu uhelnatého (CO) a těkavé organické látky (benzen, toluen, xylen) [3] [6].

Tab. 6.1 Přehled měřicích stanic v ČR podle vlastníka v roce 2013 [3]

Zóna/aglomerace	ČHMÚ	ČEZ	KMon	P + Š	SV	ZÚ	Celkem
Brno	6		5		1		12
Ostrava/Karviná/Frýdek-Místek	14	2	1		6		23
Praha	14					3	17
Zóna Jihovýchod	10				4		14
Zóna Jihozápad	12		5			4	21
Zóna Moravskoslezsko	2				2		4
Zóna Severovýchod	23	1			1	5	30
Zóna Severozápad	21	11		1		4	37
Zóna Střední Čechy	9			2		4	15
Zóna Střední Morava	11		2		1		14
Celkem	122	14	13	3	15	20	187

Vysvětlivky:

KMon – komunální monitoring

P + Š – průmysl a školství

SV – spoluvlastníci ČHMÚ

ZÚ – Zdravotní ústav

6.3 Používané metody měření imisí tuhých látek

Automatizované stanice imisního monitoringu používají celou řadu měřicích metod pro jednotlivé znečišťující látky, jmenujme například iontovou a plynovou chromatografii, pH-metrii, UV fluorescenci, UV absorpci či atomovou a molekulovou absorpční a emisní spektrometrii. Metody, používané ke stanovení tuhých znečišťujících látek jsou:

GRV – Gravimetrie

Při této metodě je vzorek odebírán filtrací venkovního ovzduší přes vybraný filtr (používá se membránový nitrocelulóзовý materiál o střední velikosti pórů 0,85 μm , teflonový filtr o střední velikosti pórů 2 μm nebo materiál ze skleněných vláken s účinností zachytu větší než 99,5 %). Gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace je založena na rozdílu hmotnosti filtru po expozici znečištěného vzorku ovzduší a čistého filtru před samotným měřením [6].

Příklad konkrétního použití: suspendované částice (SPM) na manuálních stanicích [6].

RADIO – Radiometrie (absorpce beta záření)

Podstata této metody spočívá v absorpci beta záření vybraných slabých izotopů (např. ^{14}C nebo ^{85}Kr) ve vzorku, který se zachytí na filtračním materiálu. Rozdíl absorpce beta záření filtrem před a po expozici je úměrný hmotnosti zachycených prášných částic. Z toho je potom odvozen údaj o koncentraci zachyceného prachu [6].

Příklad konkrétního použití: SPM, PM_{10} na AIM stanicích [6].

TEOM – Oscilační mikrováhy

Oscilační mikrováhy měří hmotnost vzorku, který se zachytává na výměnném filtru, podle změny frekvence kuželovitého nosiče. Nasávaný vzorek vzduchu prochází přes filtr, který zachytává prachové částice, a dále postupuje dutým kuželovým elementem přes elektronické ovládání průtoku do vývěvy [6].

Příklad konkrétního použití: PM_{10} na stanicích AIM HS

6.4 Informační systém kvality ovzduší (ISKO)

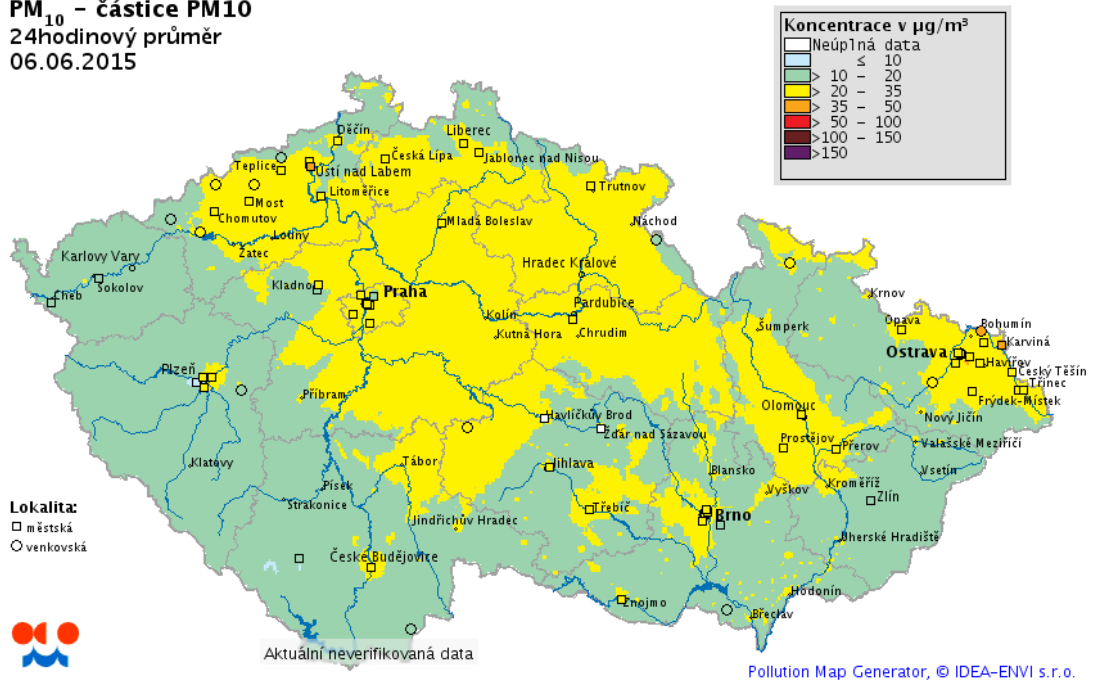
Tuto databázi provozuje ČHMÚ, konkrétně pak Úsek ochrany čistoty ovzduší (ÚOČO). Jak již bylo řečeno v úvodní stati této kapitoly, ISKO slouží k shromažďování, vyhodnocování a archivaci dat ze sítě stanic imisního monitoringu. Tato data jsou pak každoročně zpracována v publikaci „Znečištění ovzduší na území České republiky“ a zároveň jsou dostupná na webu ČHMÚ (pouze grafická a tabelární část) [2] [3].

Na základě tzv. indexů kvality ovzduší, které odpovídají jednotlivým stavům konkrétních znečišťujících látek, jsou sestavovány mapy, které lze vyhledat na stránkách ČHMÚ. Mapy ukazují úroveň znečištění jednotlivými látkami (hodinové i denní průměry), nicméně jsou pouze orientační vzhledem k tomu, že mohou obsahovat neverifikovaná a neúplná data. Ukázka map je na obr. 6.1 a 6.2 a přehled indexů kvality ovzduší pro vybrané látky pak shrnuje tab. 6.2 [3].

Tab. 6.2 Indexy kvality ovzduší pro vybrané znečišťující látky [3]

Index	Kvalita ovzduší	SO ₂ 1h µg/m ³	NO ₂ 1h µg/m ³	CO 8h µg/m ³	O ₃ 1h µg/m ³	PM ₁₀ 1h µg/m ³
1	velmi dobrá	0 - 25	0 - 25	0 - 1000	0 - 33	0 - 20
2	dobrá	> 25 - 50	> 25 - 50	> 1000 - 2000	> 33 - 65	> 20 - 40
3	uspokojivá	> 50 - 120	> 50 - 100	> 2000 - 4000	> 65 - 120	> 40 - 70
4	vyhovující	> 120 - 350	> 100 - 200	> 4000 - 10000	> 120 - 180	> 70 - 90
5	špatná	> 350 - 500	> 200 - 400	> 10000 - 30000	> 180 - 240	> 90 - 180
6	velmi špatná	> 500	> 400	> 30000	> 240	> 180

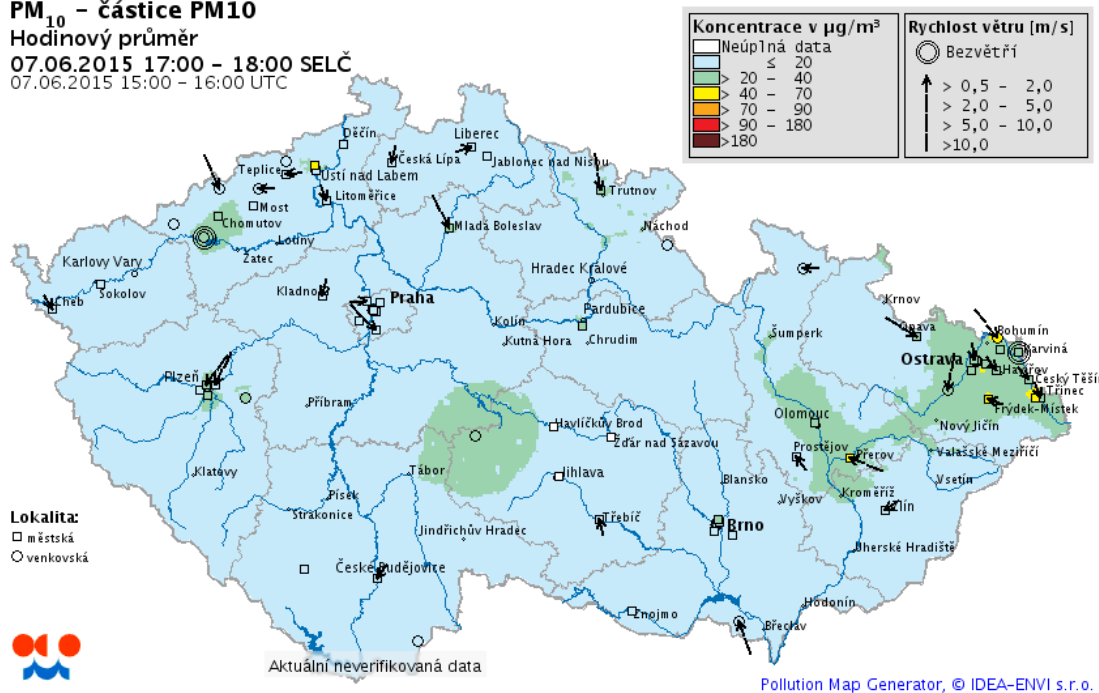
PM₁₀ – částice PM10
24hodinový průměr
06.06.2015



Obr. 6.1 Mapa 24hodinových koncentrací PM₁₀ vygenerovaná systémem ISKO [3]

PM₁₀ – částice PM10
Hodinový průměr

07.06.2015 17:00 – 18:00 SELČ
07.06.2015 15:00 – 16:00 UTC



Obr. 6.2 Mapa hodinových koncentrací PM₁₀ vygenerovaná systémem ISKO [3]

7. METODY A ZAŘÍZENÍ PRO TŘÍDĚNÝ ODBĚR VZORKŮ PM_{10} A $PM_{2,5}$

7.1 Úvod

Tato část práce je věnována seznámení se s dvěma nejrozšířenějšími způsoby odběru vzorků imisí včetně zjednodušeného popisu zařízení, které jsou k odlučování tuhých emisí určeny. Jedná se o metodu využívající odstředivý princip odlučování (cyklónové třídění) a o metodu impakční, jejíž podstatou je setrvačný odlučovací princip. V současnosti se ve stanicích AIM na našem území využívá impakční metoda, v souladu s nejnovější technickou normou ČSN EN 12341, nicméně v dřívější době (přibližně do roku 1997) byla běžně používána cyklónová metoda [13].

Impaktory nahradily cyklónové odlučovače v souvislosti s implementací normy ČSN EN 12341 do legislativy České republiky. Přispěly tomu i výsledky experimentů z roku 1995 na Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT, o kterých pojednává článek [12]. Z nich vyplynulo, že v té době používaný cyklón typu KALMAN o průměru $D = 43$ mm neodlučuje při jmenovitém průtoku vzduchu $3 \text{ m}^3/\text{h}$ s požadovanou mezí odlučivosti $a_{1,m} = 10 \text{ } \mu\text{m}$, ale s mnohem nižší ($a_{1,m} = 3 - 4,5 \text{ } \mu\text{m}$). Současně byly testovány hlavice typu VIP (Verewa Instruments Praha), které měly doplnit tříděný odběr vzorků na stanicích AIM, a dle výsledků, které uvádí výše zmíněný článek [12] rovněž nesplnily požadovanou mez odlučivosti.

Nedostatkem setrvačného principu odlučování je závislost třídících vlastností hlavice na povrchové úpravě a kvalitě impakční plochy, s čímž souvisí i nároky na pravidelnou kontrolu a údržbu. Díky tomu se v současnosti používaný setrvačný princip jeví v porovnání s cyklóny jako méně výhodný a méně praktický [13].

7.2 Cyklonové (vírové) odlučovače

Základním principem vírových odlučovačů (cyklónů) je využití odstředivé síly působící na částice plynu, které vstupují do válcové (kuželové) části cyklonu. Odstředivá síla vyvolává v radiálním směru relativní rychlost částice u_ρ , která je kolmá k odlučovacími plochám a lze ji vyjádřit vztahem:

$$u_{\rho} = \frac{a_1^2 \cdot 1000}{18\eta} \cdot \frac{v_t^2 \cdot 2}{D} \quad (7.1)$$

kde u_{ρ} označuje radiální odlučovací rychlost, v_t tangenciální rychlost, D průměr cyklonu, a_1 aerodynamický průměr částice a η dynamickou viskozitu plynu [11].

Vírové odlučovače charakterizuje jejich jednoduchá konstrukce, malá spotřeba materiálu, nenáročná obsluha a relativně malá tlaková ztráta ($\Delta p_z = 600$ až $1\,000$ Pa v optimálním režimu). Výhody cyklónů spočívají především v použitelnosti v náročných provozech, při vyšších koncentracích částic i vyšších teplotách plynu. V současné době však tento typ odlučovačů jako samostatná jednotka vyhovuje emisním limitům pouze ve výjimečných případech (např. dřevozpracující průmysl, speciální odlučovače u kotlů na spalování biomasy). V běžné praxi se proto cyklony uplatňují jako první odlučovací stupeň složitějších odlučovacích systému, zvláště pak u technologií s vysokými vstupními koncentracemi částic [1].

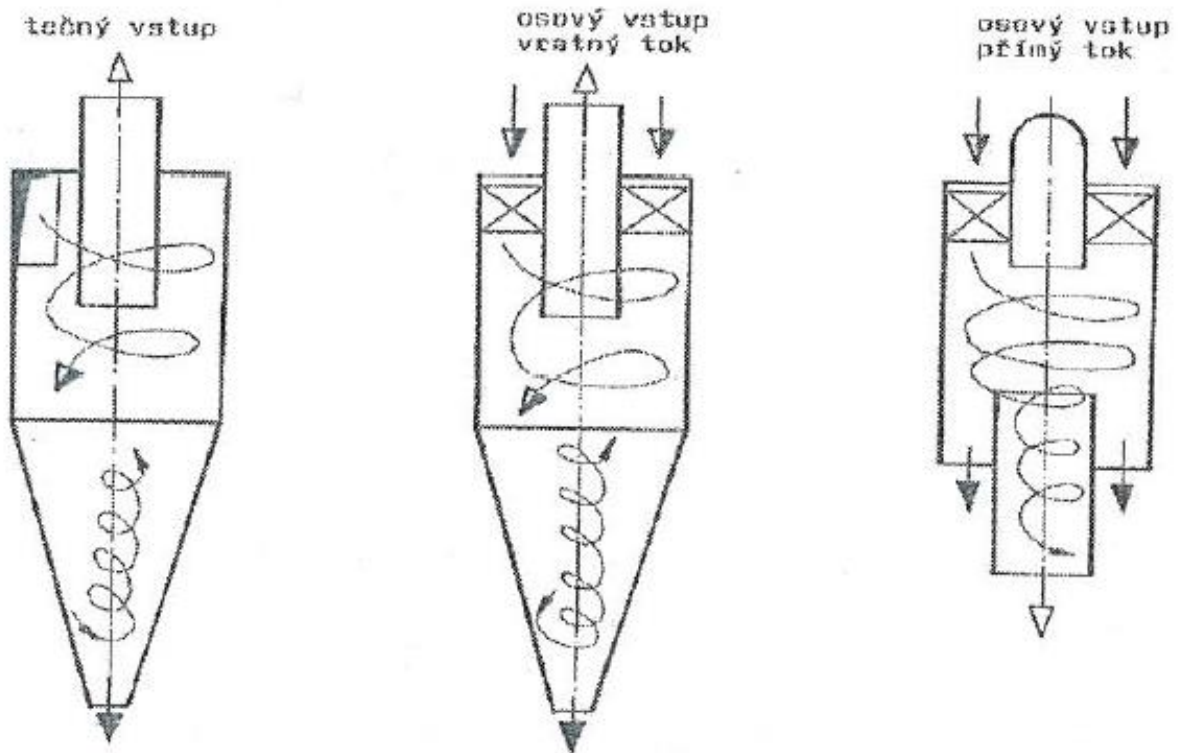
Mez odlučivosti $a_{1,m}$ se u těchto typů suchých odlučovačů pohybuje v poměrně širokém rozmezí hodnot ($2 - 40 \mu\text{m}$), což závisí na typu odlučovače, jeho velikosti, objemovém průtoku a parametrech protékajícího plynu. Rovněž platí, že odlučovací schopnosti vírových odlučovačů se dají vyjádřit Stokesovým kritériem Stk_m pro mez odlučivosti $a_{1,m}$, který definuje vztah:

$$Stk_m = \frac{\tau_{c,m} \cdot v_d}{D} = \frac{a_{1,m}^2 \cdot 1000}{18\eta} \cdot \frac{v_d}{D} = \frac{a_{1,m}^2 \cdot 1000}{18\eta} \cdot \frac{4V}{\pi D^3} \quad (7.2)$$

kde $\tau_{c,m}$ značí dobu relaxace částice pro mez odlučivosti $a_{1,m}$ a v_d tzv. fiktivní rychlost ve válcové komoře.

Podle způsobu, kterým se u cyklonu dosahuje rotace plynu, lze tyto odlučovače (články) rozdělit na tři základní typy (viz obr. 7.1):

- s tečným vstupem
- s osovým vstupem a vratným tokem
- s osovým vstupem a přímým tokem.

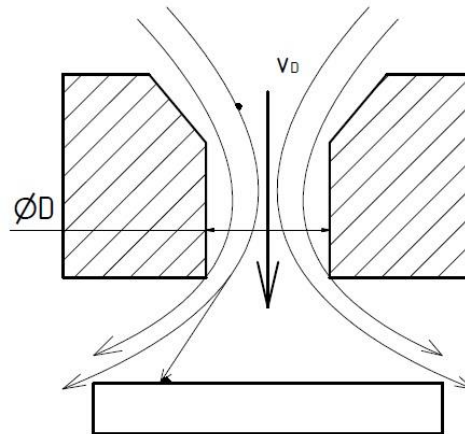


Obr. 7.1 Základní typy vírových odlučovačů – článků [1]

Nejrozšířenější je cyklon s tečným vstupem a tímto typem je rovněž imisní hlavice zkoumaná v rámci této práce. Plyn je přiváděn do cyklonu vstupní trubkou o průměru d a dál proudí do odstředivé komory, skládající se z válcové a kuželové části. Zde koná plyn sestupný spirálovitý pohyb směrem k výmetnému otvoru, kde se proud plynu obrací v osovém směru a pohybuje se ve spirále směrem vzhůru, jak je naznačeno na obr. 7.1 vlevo. Na částice pak působí odstředivá síla, díky které se pohybují směrem ke stěnám cyklonu a kde se sestupným pohybem po spirále postupně dostávají do výsypky. [11]

7.3 Impaktory

Impaktory představují zařízení, která fungují na setrvačném principu odlučování částic. Podstatou procesu je průchod plynu přes vhodně profilované a uspořádané překážky, na nichž se zachytávají větší částice, jak je ukázáno na zjednodušeném schématu (viz obr. 7.2) [11].



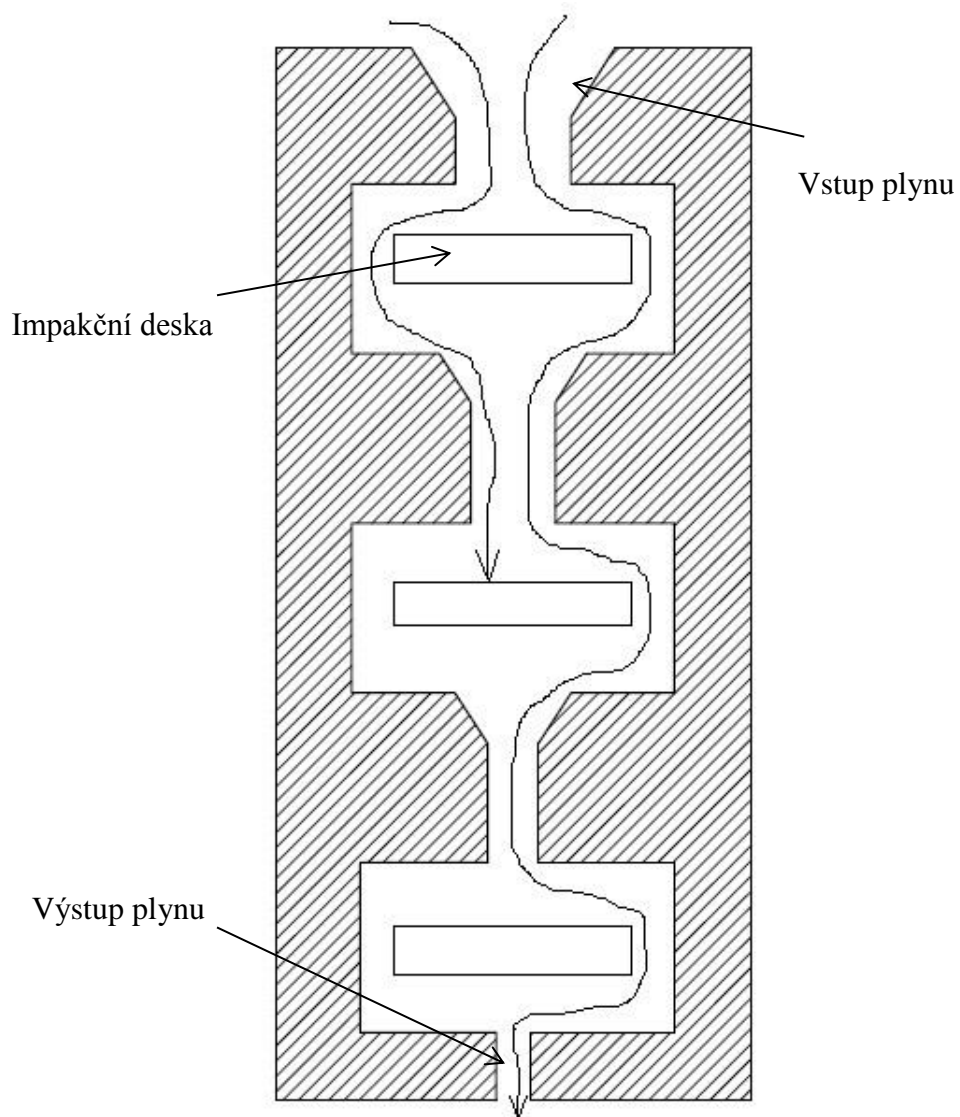
Obr. 7.2 Princip setrvačného odlučovače

Měřicí zařízení, která se v současnosti využívají pro imisní monitoring, se vyrábějí v řadě provedení – od jednostupňových, přes kaskádové až po virtuální [15]. Jako příklad výrobce impaktorů lze uvést firmu Dekati, v jejímž katalogu je možno nalézt především kaskádové typy odlučovačů (ukázka viz Obr. 7.3).



Obr. 7.3 Ukázka třístupňového kaskádového odlučovače od firmy Dekati [17]

Odlučovací komora je složena z více pater, na každém z nich se odlučují částice o jiné velikosti (čím více pater, tím menší částice lze tímto způsobem odloučit). V případě tohoto konkrétního odlučovače lze jednotlivá patra přidávat či odebírat, což zajišťuje použití pro širší rozsah frakcí PM (v tomto konkrétním případě lze odlučovat i částice s mezí odlučivosti 1 μm) [17]. Schéma postupu proudu vzduchu je naznačeno na obr. 7.4.



Obr. 7.4 Zjednodušené schéma kaskádového impaktoru

8. DOSAVADNÍ VÝZKUM IMISNÍ HLAVICE PM_{10} NA ÚSTAVU TECHNIKY PROSTŘEDÍ

Výzkum v oblasti cyklónového odlučování probíhá na Ústavu techniky prostředí FS ČVUT již řadu let, s čímž je samozřejmě spjat vývoj imisních hlavice pro odlučování tuhých částic PM_{10} a $PM_{2,5}$. V posledních letech o problematice cyklónových odlučovačů a vývoji jejich geometrie pojednávaly diplomové, resp. bakalářské práce [14], [15] a [16], jejichž výstupy budou na následujících stranách popsány. Tato práce využívá získané poznatky a dále na ně navazuje.

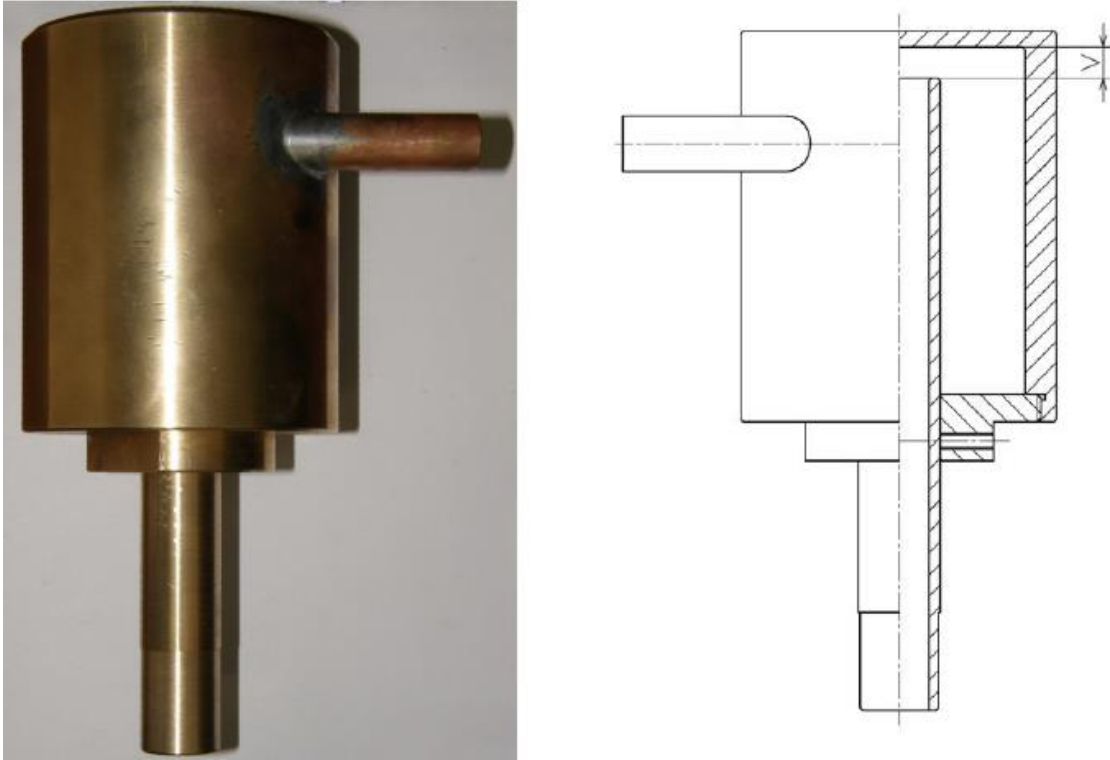
8.1 Diplomová práce „Tříděný odběr vzorků imisí“

Úkolem této diplomové práce bylo ověřit třídící vlastnosti odlučovače VIP (Verewa Instruments Praha), který se v České republice používal na stanicích AIM do roku 2000 jako součást vícestupňového třídícího zařízení pro frakci PM_{10} , a zhodnotit zda vyhovuje požadavkům na vlastnosti třídící částic $PM_{2,5}$, resp. PM_{10} . V případě, že by dané zařízení tento požadavek nespĺňovalo, bylo třeba navrhnout takovou konstrukci zařízení, která by tato kritéria splňovala [14].

Vzhledem k tomu, že VIP třídíč nespĺnil dané požadavky, byla navržena dvě zařízení pro tříděný odběr – pro frakci $PM_{2,5}$ a PM_{10} . S ohledem na zadání této práce bude dále věnována pozornost pouze imisní hlavici PM_{10} .

Průměr hlavice byl navržen $D = 64$ mm a vzduch byl přiváděn do třídíče vstupní trubicí o průměru $d = 12$ mm. Testování nově navržené hlavice bylo provedeno na prašné trati v laboratoři ÚTP se zkušebními prachy E1 a F3, při konstantním průtoku vzduchu $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ a při vysunutí výstupní trubice $v = 8, 30$ a 52 mm. Hodnota hmotnostního mediánu částic $a_{1,med,M}$ je $12,1 \text{ } \mu\text{m}$ u prachu F3 a $9,4 \text{ } \mu\text{m}$ u E1 [14].

Schéma odlučovače je na z obrázku níže, pro názornost je zde vyznačen rozměr vysunutí v .



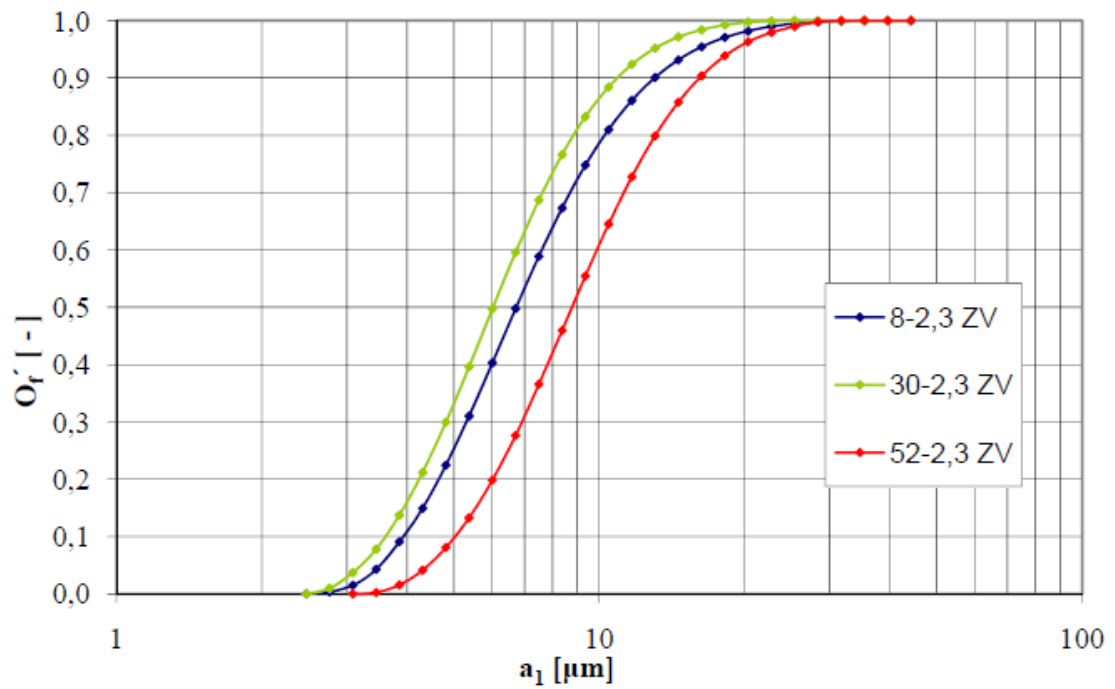
Obr. 8.1 Konstrukce cyklónu D64 [14]

Korigované frakční odlučivosti v závislosti na aerodynamické velikosti částice ukazují grafy (viz obr. 8.2 a 8.3), z nichž vyplývají meze odlučivosti (frakční odlučivost třídíče $O_f(a_{1,1}) = 50\%$) pro oba prachy. Způsob korigování křivek frakční odlučivosti je vysvětlen v kapitole 9.6. Rozsah hodnot této veličiny v závislosti na vysunutí výstupní trubice je potom shrnut v tab. 8.1.

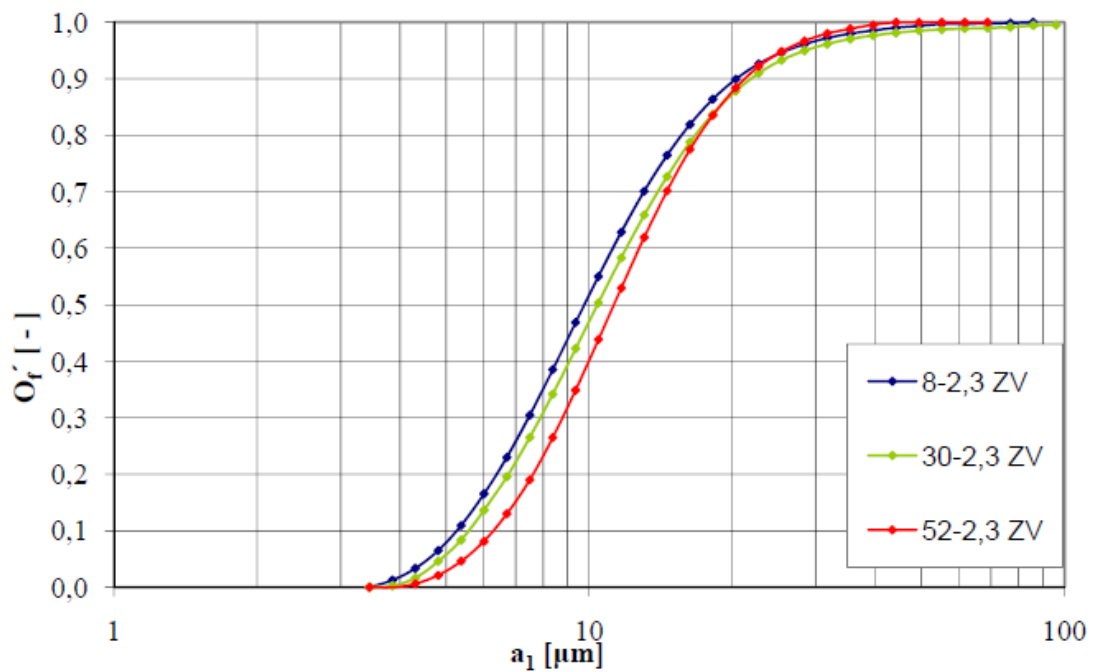
Tab. 8.1 Rozmezí hodnot meze odlučivosti $a_{1,m}$ pro zkoušené prachy E1 a F3 [14]

Zkoušený prach	Mez odlučivosti $a_{1,m}$ [μm]
E1	9,8 – 11,3
F3	6,0 – 8,8

Na základě těchto dat můžeme říci, že pro prach E1 navržený cyklón splňuje určené požadavky, v případě prachu F3 však nikoliv. Výstupy experimentu tak ukázaly, že je třeba provést více ověřovacích měření, případně upravit konstrukci článku tak, aby mohl být použit jako třídíč frakce PM_{10} . Nově upravený článek by bylo nutné znovu experimentálně ověřit [14].



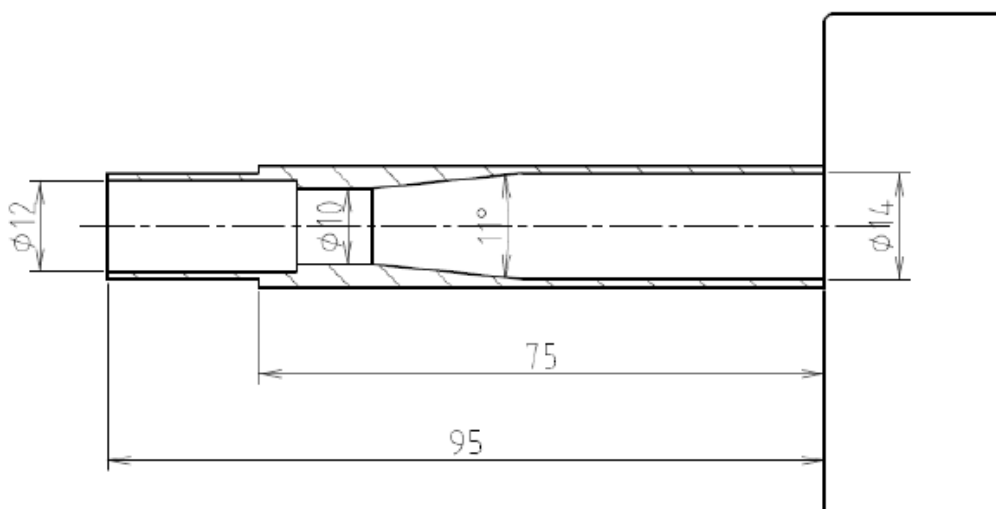
Obr. 8.2 Korigované frakční odlučivosti přepočtené na aerodynamické průměry částic s vysunutími trubice $v = 8, 30$ a 52 mm pro prach E1 [14]



Obr. 8.3 Korigované frakční odlučivosti přepočtené na aerodynamické průměry částic s vysunutími trubice $v = 8, 30$ a 52 mm pro prach F3 [14]

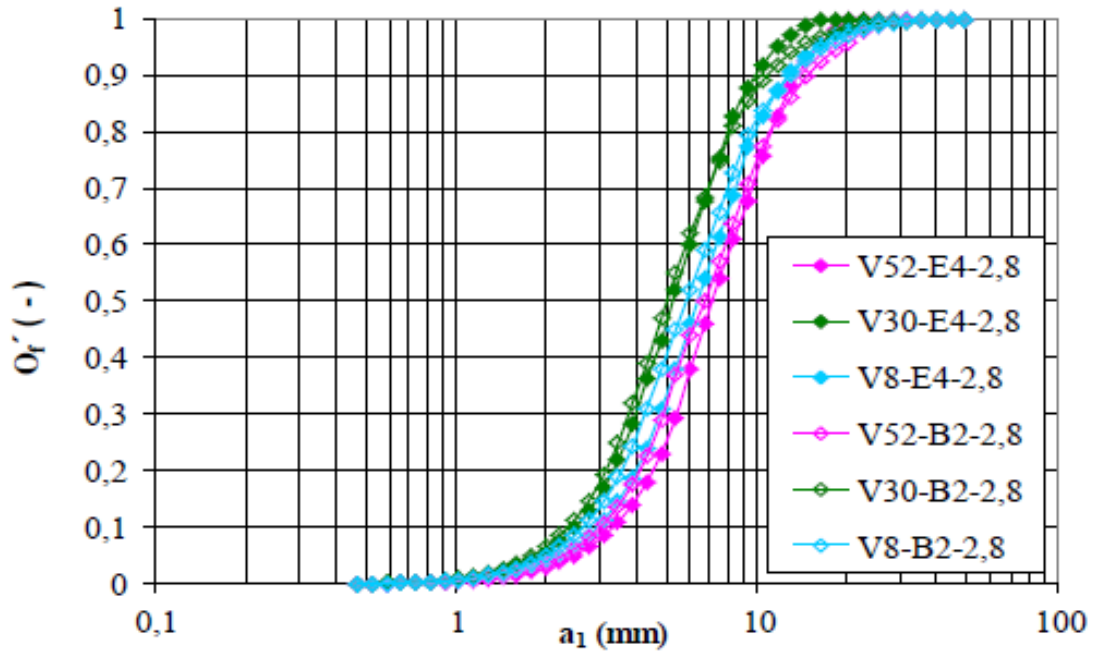
8.2 Diplomová práce „Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM10“

Těžištěm této diplomové práce byla úprava geometrie cyklónu D64 tak, aby splňoval požadavky na třídiče frakce PM₁₀, a jeho následné otestování. Konstruktivní úpravy byly provedeny na vstupní trubici cyklónu, jejíž průměr byl zvětšen z 12 mm na 14 mm (viz obr. 8.4), vnitřní průměr třídiče zůstal stejný. Účelem této úpravy bylo snížit rychlost plynu na vstupu a zvýšit tak mez odlučivosti $a_{1,m}$ oproti předchozímu provedení cyklónu D64.



Obr. 8.4 Upravená vstupní trubice cyklónu [15]

Testování cyklónu pak bylo provedeno pro dva zkušební prachy (B2 a E4) pro tři různá vysunutí výstupní trubky ($v = 8, 30$ a 52 mm stejně jako v případě práce [14]). Hodnoty mezí odlučivosti pro oba prachy při frakční odlučivosti $O_f(a_1) = 50\%$ vyšly v přibližném rozmezí $a_{1,m} = 4,0 - 7,1$ μm (viz obr. 8.5) a cyklón tím pádem nesplňuje vlastnosti třídiče frakce PM₁₀. Dokonce lze říci, že vlivem úprav došlo k mírnému zhoršení funkce zařízení jako třídiče PM₁₀. Bylo by ovšem možné takto upravený odlučovač použít k odlučování jemnějšího prachu s mezí odlučivosti 5 μm [15].



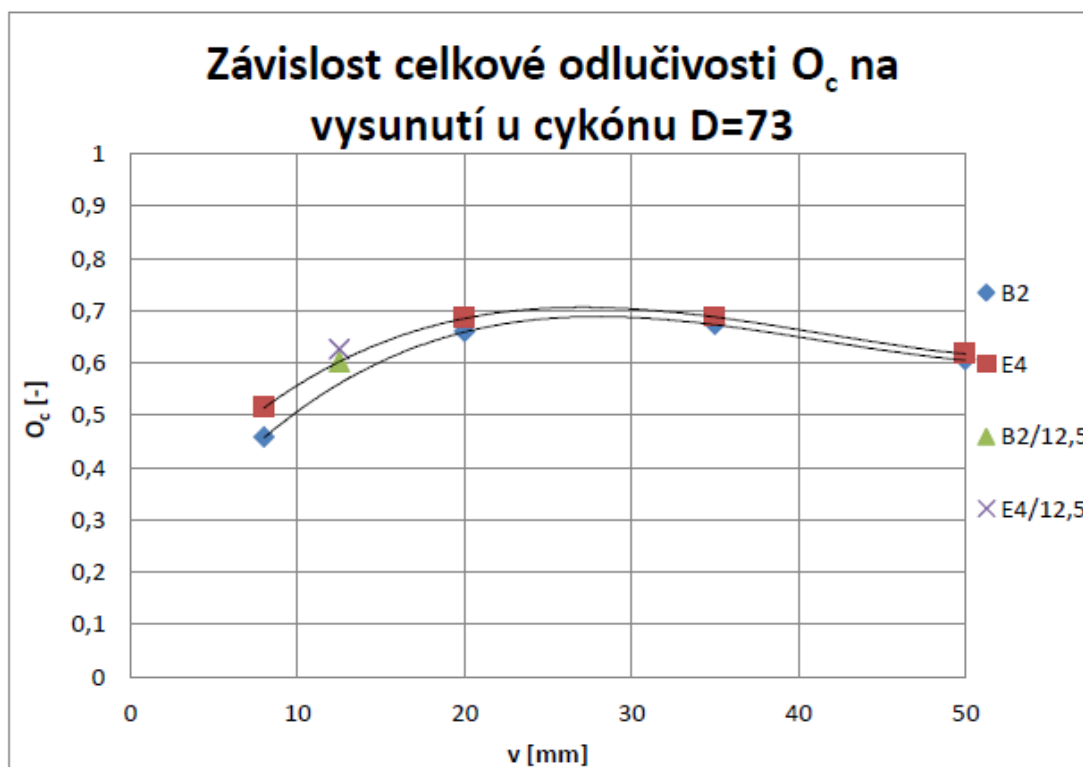
Obr. 8.5 Korigované závislosti frakční odlučivosti O_f' na aerodynamickém průměru částic pro prachy B2 a E4 [15]

8.3 Bakalářská práce „Imisní monitoring tuhých znečišťujících látek“

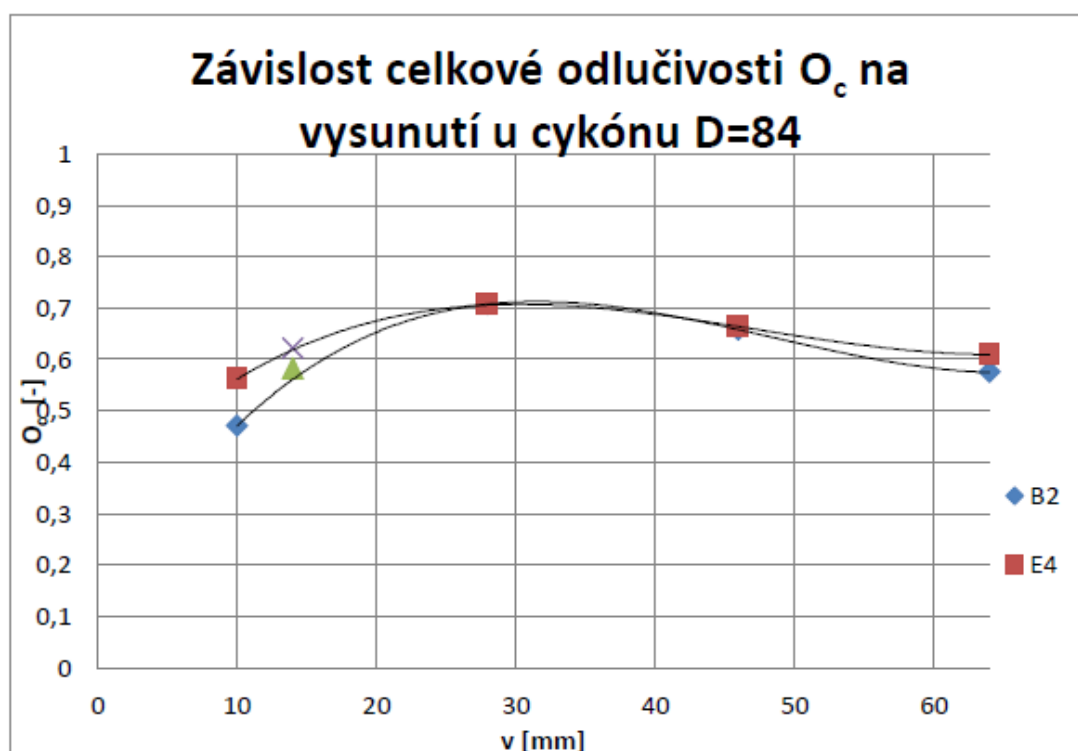
Tato práce navazuje převážně na výstupy, které přinesly diplomové práce zmiňované výše. Cílem bylo navrzení konstrukčních úprav hlavice PM_{10} a provedení orientačních zkoušek pro ověření navržených změn. Na rozdíl od práce [15] se zde mění průměr cyklónu, konkrétně byly navrzeny dva třídíče o průměrech $D = 73$ mm (ozn. D73) a $D = 84$ mm (ozn. D84). Průměry vstupních trubíc obou cyklónů se oproti výše popsanému testování nezměnily, zůstává tedy rozměr $d = 14$ mm.

Pro zkoušení obou cyklónů byly opět použity prachy B2 a E4, tentokrát však bylo měření provedeno pro čtyři různá vysunutí ($v = 8, 20, 35$ a 50 mm). Závislost celkové odlučivosti O_C na vysunutí výstupní trubice odlučovače v znázorňují grafy níže (obr. 8.6 a obr. 8.7). Pro vyhodnocení třídících schopností zde byla použita přibližná metoda, která je založena na stanovení hodnoty přibližné meze odlučivosti $a_{1,pmo}$.

Na základě zjištěných závislostí bylo navrženo optimální vysunutí výstupní trubice jak pro třídíč D73 ($v = 12,5$ mm), tak pro cyklón D84 ($v = 14$ mm). Pro takto upravené cyklóny byla provedena ještě jedna série měření [16].



Obr. 8.6 Závislost celkové odlučivosti na vysunutí výstupní trubice pro cyklón D73[16]



Obr. 8.7 Závislost celkové odlučivosti na vysunutí výstupní trubice pro cyklón D84[16]

Hodnoty přibližných mezí odlučivosti, které byly experimentem zjištěny pro oba zkoušené prachy u cyklónů D73 a D84 jsou shrnuty v tab. 8.2.

Tab. 8.2 Zjištěné hodnoty mezí odlučivosti pro cyklóny D73 a D84[16]

Cyklón	D73		D84	
Použitý prach	B2	E4	B2	E4
Mez odlučivosti $a_{1,pmo}$ [μm]	9,44	9,11	9,44	9,29

Díky experimentu se ukázalo, že hodnoty přibližných mezí odlučivosti $a_{1,pmo}$ jsou o něco menší než požadovaná mez odlučivosti $a_{1,m} = 10 \mu\text{m}$. Dále bylo zjištěno, že přibližné meze odlučivosti vycházejí trochu větší než ty skutečné, takže je potřeba cyklón dále ověřit metodou stanovení křivek frakční odlučivosti. Navržená vysunutí se navíc pohybují mimo oblast plochého maxima závislosti $O_C = f(v)$, kde je velká citlivost na změnu vysunutí výstupní trubky [16].

8.4 Cíle práce

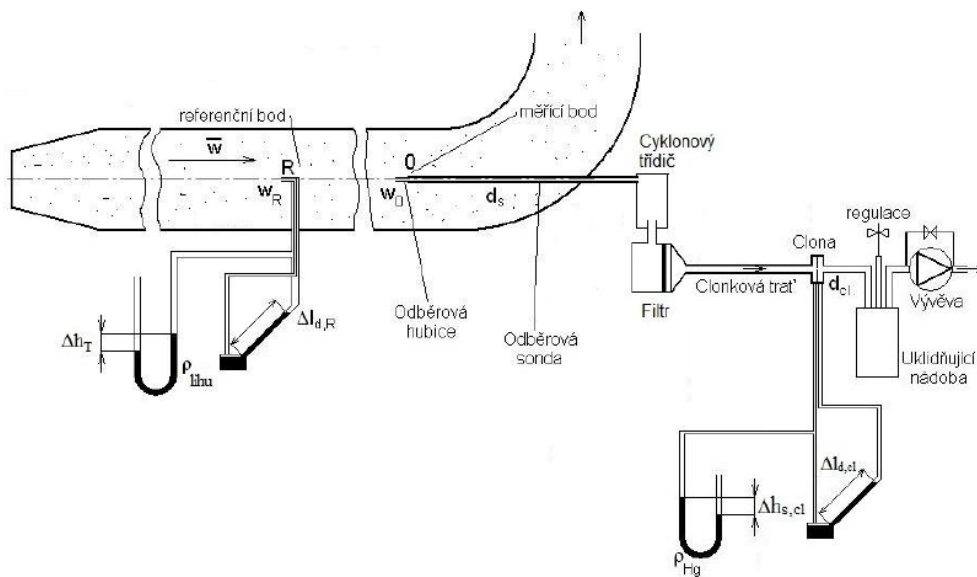
Z výstupů práce [16] vyplývá, že je třeba cyklón dále upravit a řádně ověřit tak, aby splňoval požadavky třídící frakce PM_{10} .

Cílem této bakalářské práce je popsat současný stav a způsoby měření frakcí částic PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$ a v rámci experimentální části navrhnout úpravu stávající hlavice PM_{10} , ověřit a vyhodnotit třídící schopnosti na zkušební trati.

9. METODIKA EXPERIMENTU

9.1 Popis prašné tratě a funkce jednotlivých zařízení

Pro účely experimentálního ověření cyklónu D73 byla použita vodorovná prašná trať o vnitřním průměru 97 mm a délce 4 m, která je umístěna v laboratoři Ústavu techniky prostředí, Fakulty strojní, ČVUT. Schéma celé tratě včetně zapojení měřicích přístrojů je na obr. 9.1. Namísto lihového manometru byl pro měření dynamického tlaku v referenčním bodě použit digitální manometr AIRFLOW MEDM 500. Na vodorovný úsek potrubí je napojen oblouk 90°, za kterým dále pokračuje 1,5 m dlouhá vertikální část, napojená na hadicový filtr přes další oblouk. Vzduch z filtru je pak odváděn kruhovým potrubím, které je napojeno na radiální vysokotlaký ventilátor poháněný asynchronním motorem, jehož otáčky lze regulovat frekvenčním měničem.



Obr. 9.1 Schéma zkušební prašné tratě [15]

Zkoušený prach je do prašné trati podáván vibračním korýtkovým podavačem Fritsch. Určené potřebné množství prachu (viz kapitola 9.3) se vsype do násypky podavače. Prach dále postupuje přes homogenizační válec do difuzoru ejektoru, kde je koncentrovaná prachová směšována se stlačeným vzduchem o přetlaku cca 0,4 MPa. Takto je zajištěno rovnoměrné podávání prachu do potrubí [13]. Aparatura na podávání prachu je zobrazena na obr. 9.2.



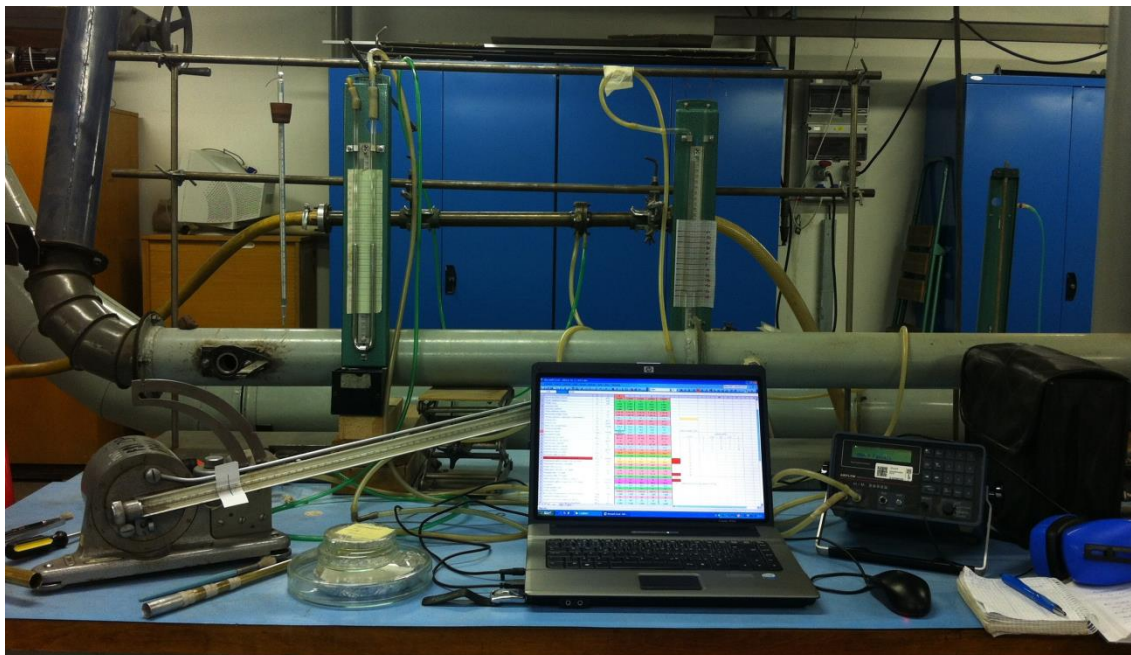
Obr. 9.2 Soustava na podávání prachu do potrubí

Vzorek aerodisperzní směsi je odebírán v místě „O“ pomocí odběrové sondy o délce 400 mm a vnitřním průměru 9,5 mm, která je umístěna v ose kanálu a napojena na zkoušený cyklón přes kónický přechodový článek. Na druhém konci je na sondu napojena odběrová hlavice o průměru ústí 10,2 mm.

Rychlost během odběru se měří v referenčním bodě „R“, který je umístěn ve vzdálenosti cca 1 m od ústí odběrové hlavice sondy. Během měření se předpokládá stejná hustota vzduchu jak v místě odběru (index O), tak v referenčním bodě (index R), tedy $\rho_o = \rho_R$. Pokud je tento předpoklad splněn, můžeme stanovit rychlostní součinitel β dle vztahu:

$$\beta = \frac{w_o}{w_R} \quad (9.1)$$

kteřý dále užijeme pro určení rychlosti ke stanovení rychlosti v odběrovém místě. Dynamické tlaky v bodech „O“ a „R“ jsou měřeny lihovým sklopným manometrem a digitálním manometrem AIRFLOW MEDM 500, statické tlaky v obou místech jsou zaznamenávány U-manometry s lihovou a rtuťovou náplní. Celou měřicí aparaturu ukazuje obr. 9.3.



Obr. 9.3 Měřicí aparatura

Vlastní odběrová aparatura je složena z odběrové sondy a testovaného třídícího zařízení, jehož výstup je napojen na zachycovač s uvnitř umístěným filtrem. Jako filtrační materiál byl při experimentu použit filtrační papír ze skelných vláken, který je k vidění na obr. 9.4.



Obr. 9.4 Filtr před (vlevo) a po expozici prachové směsi (vpravo)

Výstup zachycovače je napojen na clonkovou trať pro měření průtoku, která je přes přísávací ventil a uklidňující nádobu propojena s lamelovou vývěvou Becker. Odběrová aparatura je na obr. 9.5.



Obr. 9.5 Dva různé pohledy na odběrovou aparaturu

9.2 Metodika měření

Před začátkem měření se odečte barometrický tlak ze staničního barometru, teplota vzduchu v laboratoři a teplota vzduchu v potrubí. Dále se spočítají hustoty náplní manometrů (rtuť a líh) dle empirických vztahů:

$$\rho_{Hg} = 13\,595 - 2,45 \cdot t_{lab} \quad (9.2)$$

$$\rho_{líh} = 822,6 - 0,847 \cdot t_{lab} \quad (9.3)$$

Vlastní měření je prováděno při konstantním průtoku vzduchu $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ v potrubí, který je regulován změnou otáček ventilátoru frekvenčním měničem. V clonkové trati je pak konstantní průtok udržován přísáváním vzduchu do uklidňovací nádoby před vývěvou. Hmotnostní tok odsávaného vzorku v odběrové sondě a v testovaném cyklónu musí být stejný jako v clonkové trati, platí tedy rovnost:

$$\dot{m}_o = \dot{m}_{cl} \Rightarrow \dot{V}_o \cdot \rho_o = \dot{V}_{cl} \cdot \rho_{cl} \quad (9.4)$$

Objemový průtok vzduchu clonkovou tratí se určí ze vztahu:

$$\dot{V}_{cl} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_{cl} \cdot w_{cl} = \alpha \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi d_{cl}^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{d,cl}}{\rho_{cl}}} = K_{cl} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{d,cl}}{\rho_{cl}}} \quad (9.5)$$

kde K_{cl} označuje redukovaný průřez clony, $\Delta p_{d,cl}$ rozdíl tlaků na cloně, α součinitel kontrakce ($\alpha = 0,765$) a ε expanzní součinitel, jehož hodnota se uvažuje $\varepsilon = 0,995$.

Dosazením do vztahu (9.4) rovnici (9.5), se vyjádří průtok vzduchu cyklónem:

$$\dot{V}_o = \dot{V}_{cl} \cdot \frac{\rho_{cl}}{\rho_o} = K_{cl} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta p_{d,cl}}{\rho_{cl}}} \cdot \frac{\rho_{cl}}{\rho_o} \quad (9.6)$$

Úpravou rovnice (9.6) se dostane vztah pro tlakový rozdíl na cloně:

$$\Delta p_{d,cl} = \left(\frac{\dot{V}_o}{K_{cl}} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{cl}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{cl}}{2} = \Delta l_{d,cl} \cdot g \cdot \rho_{líh} \cdot k_{cl} \quad (9.7)$$

přičemž regulace průtoku během měření spočívá v udržování výšky sloupce sklopného manometru $\Delta l_{d,cl}$ na hodnotě, která odpovídá výšce rtuťového sloupce $\Delta h_{s,cl}$. Vztah pro $\Delta l_{d,cl}$ vyjádříme z rovnice (9.7):

$$\Delta l_{d,cl} = \left(\frac{\dot{V}_o}{K_{cl}} \cdot \frac{\rho_o}{\rho_{cl}} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{cl}}{2g\rho_{líh}k_{cl}} \quad (9.8)$$

Hustota vzduchu, který prochází clonkovou tratí ρ_{cl} , se vyjádří ze stavové rovnice ideálního plynu. Stejně tak se určí hustota vzduchu v potrubí ρ_s .

$$\rho_{cl} = \frac{p_b - \Delta p_{s,cl}}{r(t_{vz} + 273,15)} = \frac{p_b - \rho_{líh} g \Delta h_{s,cl}}{r(t_{vz} + 273,15)} \quad (9.9)$$

$$\rho_s = \frac{p_b - \Delta p_s}{r(t_{vz} + 273,15)} = \frac{p_b - \rho_{líh} g \Delta h_R}{r(t_{vz} + 273,15)} \quad (9.10)$$

kde $\Delta p_{s,cl}$ označuje rozdíl absolutních tlaků před clonkou a barometrického tlaku p_b , Δp_s statický tlak v potrubí a hodnoty $\Delta h_{s,cl}$, resp. Δh_R označují výšky sloupců rtuti a líhu v U-manometrech.

Rychlost v odběrovém bodě je určena dle potřebného průtoku cyklónem a průřezu odběrové sondy:

$$W_o = \frac{\dot{V}_o}{S_s} = \frac{\dot{V}_o}{\frac{\pi d_s^2}{4}} = \frac{4\dot{V}_o}{\pi d_s^2} \quad (9.11)$$

Dále se použije vztah (9.1) pro určení rychlosti proudění v referenčním bodě.

$$W_R = \frac{w_o}{\beta} = \frac{4\dot{V}_o}{\pi d_s^2 \beta} \quad (9.12)$$

Dynamický tlak v referenčním bodě je měřen digitálním manometrem AIRFLOW a spočítá se jako:

$$p_{d,R} = \frac{w_R^2}{2} \rho_s = \Delta l_{d,R} \cdot g \cdot \rho_{lh} \cdot k_R \quad (9.13)$$

Požadovaná hodnota dynamického tlaku se nastaví změnou otáček frekvenčního měniče.

9.3 Stanovení potřebného množství prachu

Základním požadavkem, z něhož při určování potřebného množství prachu vycházíme, je získání dostatečného množství odebíraného vzorku pro určení hmotnosti prachu, který se zachytí v jednotlivých částech odběrové aparatury, a jeho případnou analýzu. Předpokládáme-li rovnoměrné rozložení prachu v celém průřezu potrubí, pak množství vzorku, které nasaje odběrová sonda, odpovídá přibližně 1% z celkové hmotnosti podávaného prachu. Zároveň je potřeba zajistit co nejdokonalejší rozptýlení shluků prachu a zabránit jeho usazování v měřicí trati, čehož lze docílit při nižší koncentraci prachu ($c = 1 - 2 \text{ g/m}^3$) a tím pádem i nižším podávacím výkonu. Minimální množství vzorku prachu k analýze je přibližně 100 mg. Na základě tohoto požadavku a zkušeností z předchozích měření byla stanovena optimální hmotnost dávky prachu pro jedno měření $m_{analy} = 100 \text{ g}$.

Teoretickou dobu trvání jednoho odběru lze pak určit ze vztahu:

$$\tau_{teor} = \frac{m_{analy}}{\dot{m}} = \frac{m_{analy}}{\dot{M}} \cdot \frac{D^2}{d_s^2} = \frac{m_{analy}}{c \cdot \dot{V}} \cdot \frac{D^2}{d_s^2} \quad (9.14)$$

kde D a d_s označují průměry potrubí a vstupní hubice odběrové sondy, c je koncentrace prachu, \dot{V} je objemový průtok vzduchu, \dot{M} a \dot{m} jsou hmotnostní toky prachu v potrubí a v sondě. Pro určené množství prachu je takto určena teoretická doba trvání cca 20 minut, což přibližně odpovídalo i skutečné době jednoho měření.

9.4 Stanovení množství zachyceného prachu

Na konci každého jednotlivého odběru se gravimetrickou metodou určuje hmotnost zachyceného prachu v jednotlivých částech odběrové aparatury. Hmotnost prachu, který se zachytil v sondě a v přívodní trubici do cyklónu je označena m_p , dále se značí hmotnost prachu zachyceného v cyklónu m_z a označení m_v představuje hmotnost prachu zachyceného ve výstupní trubici z cyklónu, v zachytávací a na filtru. Celková hmotnost zachyceného prachu je dána vztahem:

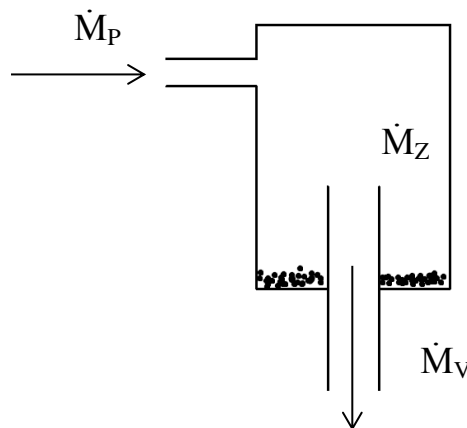
$$m_{celk} = \sum m_i = m_p + m_z + m_v \quad (9.15)$$

Vzhledem k tomu, že množství prachu, zachycené na stěnách sondy se považuje za ztrátu, součet hmotností na záchytu a výstupu se označí jako hmotnost přivedeného prachu $m_{p\check{r}}$:

$$m_{p\check{r}} = m_z + m_v \quad (9.16)$$

9.5 Stanovení celkové a frakční odlučivosti

Na obr. 9.6 je schéma hmotnostních toků testovaným cyklónem. Hmotnostní tok na přívodu do odlučovače se označí \dot{M}_p , hmotnostní tok zachycený v cyklónu \dot{M}_z a hmotnostní tok na výstupu \dot{M}_v .



Obr. 9.6 Schéma hmotnostních toků cyklónu

Prachové částice vstupující do cyklónu se v něm buď odloučí (záchyt) nebo jím projdou (výstup). Pro hmotnostní toky částic platí tento bilanční vztah:

$$\dot{M}_P = \dot{M}_Z + \dot{M}_V \quad (9.17)$$

Celkovou odlučivost cyklónu se vyjádří takto:

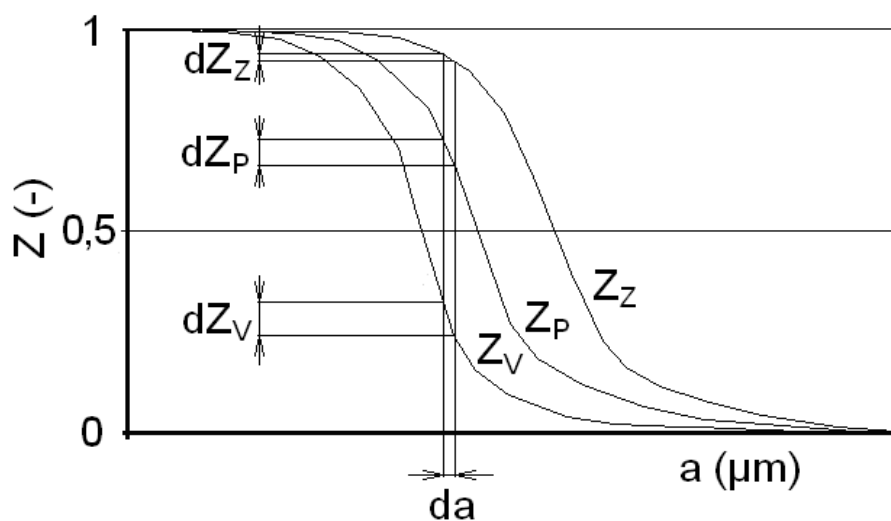
$$O_C = \frac{\dot{M}_Z}{\dot{M}_P} = \frac{\dot{M}_P - \dot{M}_V}{\dot{M}_P} = 1 - \frac{\dot{M}_V}{\dot{M}_P} = \frac{\dot{M}_Z}{\dot{M}_Z + \dot{M}_V} \quad (9.18)$$

Tato veličina však není vlastností odlučovače, ale závisí na odlučovacích schopnostech daného cyklónu, které vyjadřuje závislost frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f(a)$. Tato závislost udává odlučivost jednotlivých velikostí částic za daného provozního stavu. Výslednou frakční odlučivost lze stanovit třemi způsoby:

- metodou záchyt – přívod (Z_P , Z_Z a O_C),
- metodou záchyt – výstup (Z_V , Z_Z a O_C),
- metodou přívod – výstup (Z_P , Z_V a O_C).

Pro vyhodnocení závislosti frakční odlučivosti $O_f(a)$ byla v tomto případě použita dále popsaná metoda záchyt-výstup.

Na obr. 9.7 jsou vidět jednotlivé křivky zbytků částic v přívodu, záchytu a výstupu odlučovače.



Obr. 9.7 Průběhy křivek zbytků na odlučovači [13]

Bilanci frakčních hmotnostních toků pro každý interval velikostí částic ($a; a+da$) lze vyjádřit vztahem:

$$\dot{M}_P dZ_P = \dot{M}_Z dZ_Z + \dot{M}_V dZ_V \quad (9.19)$$

Frakční odlučivost částic O_f se pak určí jako poměr hmotnostních frakčních toků v záchyty a přívodu:

$$O_f = \frac{\dot{M}_Z dZ_Z}{\dot{M}_P dZ_P} = O_C \frac{dZ_Z}{dZ_P} \quad (9.20)$$

Podobně, frakční průnik P_f v intervalu velikostí částic ($a, a + da$) se vyjádří jako poměr hmotnostních frakčních toků na přívodu a výstupu:

$$P_f = 1 - O_f = \frac{\dot{M}_V dZ_V}{\dot{M}_P dZ_P} = (1 - O_C) \frac{dZ_V}{dZ_P} \quad (9.21)$$

Po vyjádření dZ_P z rovnic (9.19) a (9.20) vyplývá bilanční vztah mezi záchytem a výstupem:

$$\frac{O_f}{1 - O_f} dZ_V = \frac{O_C}{1 - O_C} dZ_Z \quad (9.22)$$

a po úpravě vztahu (9.21) se vyjádří frakční odlučivost O_f

$$O_f = \frac{\frac{O_C}{1 - O_C} dZ_Z}{dZ_V + \frac{O_C}{1 - O_C} dZ_Z} = \frac{\frac{O_C}{1 - O_C} \Delta Z_Z}{\Delta Z_V + \frac{O_C}{1 - O_C} \Delta Z_Z} \quad (9.23)$$

kde hodnoty diferencí u příslušných křivek ΔZ_Z a ΔZ_V odpovídají rozmezí velikosti částic Δa .

Závislost frakční odlučivosti je pro částice PM_{10} vztažena na aerodynamický průměr částice a_1 , která se dostane přepočtem:

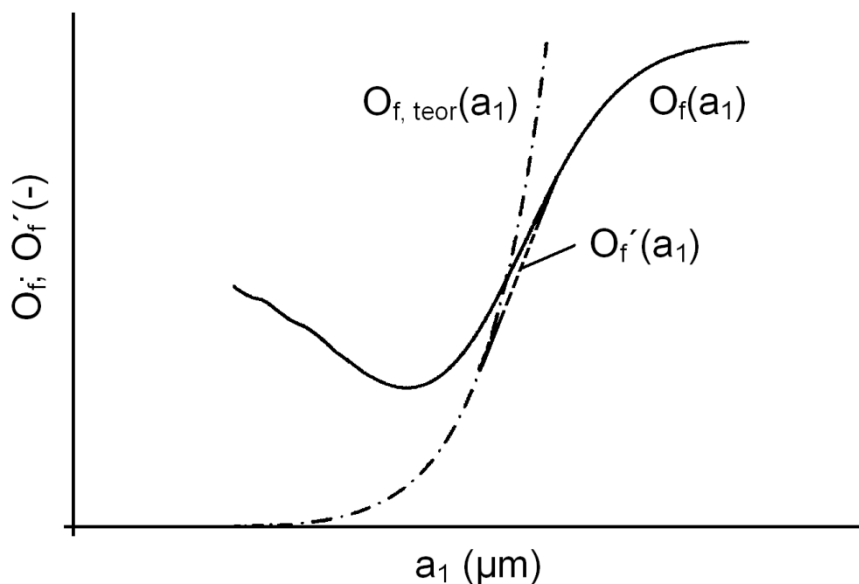
$$a_1 = a \sqrt{\frac{\rho_\xi}{1000}} \quad (9.24)$$

kde $\rho_\xi = 2260 \text{ kg/m}^3$ je hustota částic použitých elektrárenských popílků (B2 a E4).

9.6 Korekce

Charakter křivky závislosti frakční odlučivosti na aerodynamické velikosti částice vychází po analytickém vyhodnocení vzorků dle křivky $O_f(a_1)$ na obr. 9.8. Tento průběh je ovšem v oblasti jemných částic zatížen systematickou chybou. Pro odstředivý odlučovací princip totiž teoreticky platí, že křivka frakční odlučivosti se v oblasti jemných částic blíží nule. K této chybě dochází díky nedokonalému rozbíjení shluků prachových částic zkušebního prachu v průběhu experimentu. Při přípravě vzorků částic pro analýzu se shluky prachu rozbijí naopak dokonale pomocí ultrazvuku.

Křivku je tak nutné korigovat, aby odpovídala skutečnému průběhu $O_f(a_1)$. Výchozím předpokladem pro korekci je nereálnost průběhu křivky $O_f(a_1)$ v oblasti jemných částic, který je zatížen již zmíněnou systematickou chybou. Křivka v oblasti jemných částic je korigována v souladu s teoretickou závislostí $O_{f,teor}(a_1)$, která má tvar paraboly a vychází z nulové hodnoty frakční odlučivosti. V oblasti středních hodnot O_f dochází k plynulé návaznosti korigované křivky $O_f'(a_1)$ na závislost, která byla zjištěna měřením. Touto tzv. těsnou korekcí dostaneme závislost $O_f'(a_1)$ v předpokládaném tvaru „S-křivky“. Postup při korekci křivky je k vidění na obr. 9.9.



Obr. 9.8 Korekce křivky závislosti frakční odlučivosti [15]

Konečným výstupem dat z experimentu je určení korigované závislosti $O_f'(a_1)$ ve tvaru „S-křivky“ a stanovení hodnoty meze odlučivosti $a_{1,m}$ při $O_f' = 0,5$.

10. OVĚŘENÍ TŘÍDICÍCH VLASTNOSTÍ CYKLÓNU D73

10.1 Konstrukce testovaného třidiče

Charakteristické rozměry vírového článku, které mají největší vliv na odstředivou sílu působící na prachové částice, jsou vnitřní průměr třidiče D a vnitřní průměr kruhové vstupní trubice d . Dříve provedené jednotlivé úpravy konstrukce článku vycházely ze vztahu (7.2) a dosavadních výsledků měření, přičemž můžeme předpokládat přibližně konstantní hodnotu Stk_m u geometricky podobných třidičů. Z rovnice (7.2) rovněž plyne, že budeme-li zvětšovat průměr D , pak se třídící křivka $O_f(a_1)$ posune směrem do oblasti větších částic.

Neméně významný vliv na odlučovací vlastnosti třidiče má i velikost průřezu vstupní trubky a tím pádem i rychlost vzduchu na vstupu do přístroje. Ta zůstává zhruba stejná jako tangenciální složka rychlosti, která má vliv na velikost odstředivé síly a tudíž i na konečnou odlučovací rychlost u_p , kterou dostaneme ze vztahu (7.1). Odtud plyne skutečnost, že zvětšíme-li průměr vstupu d , pak se obě složky rychlosti při konstantním průtoku sníží a tudíž dojde ke zhoršení odlučovacích schopností zařízení.

Dalším faktorem, který má vliv na odlučovací vlastnosti, je vysunutí výstupní trubky v . Zde můžeme říci, že s počátečním zvyšováním této hodnoty odlučovací schopnosti zlepšují, dokud nedosáhnou hodnot plochého maxima. Zvyšujeme-li hodnotu vysunutí v dál, pak dochází ke zhoršování odlučovací schopnosti třidiče [13].

10.1.1 Cyklón D73/ Ø18 s krátkou vstupní trubicí

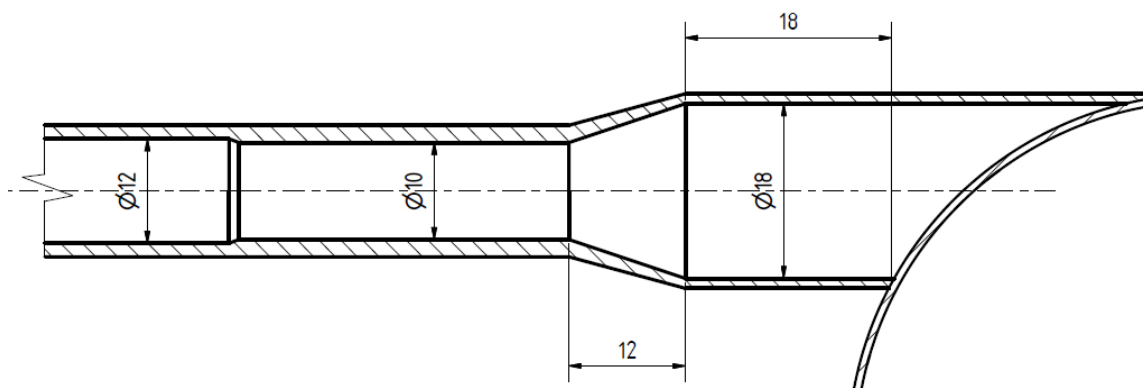
Cyklón D73 z přechozí práce [16] byl upraven změnou vstupní trubice, jejíž vnitřní průměr byl zvětšen z 16 mm na 18 mm s cílem snížit vstupní rychlost. Spojení s odběrovou sondou je realizováno kónickým přechodem a krátkou vstupní trubicí ($l/d = 0,944$), jak je vidět z obr. 10.1.

S takto upravenou imisní hlavicí byly provedeny dvě série měření pro vysunutí $v = 8$ a 20 mm s prachem B2. Celková odlučivost O_C však dosahovala vyšších hodnot než bylo předpokládáno, viz tab. 10.1.

Tab 10. 1 Výsledky měření pro cyklón D73/ ϕ 18 s krátkým vstupem

Vysunutí trubky v [mm]	8	20
Celková odlučivost O_C [%]	69,92	78,49

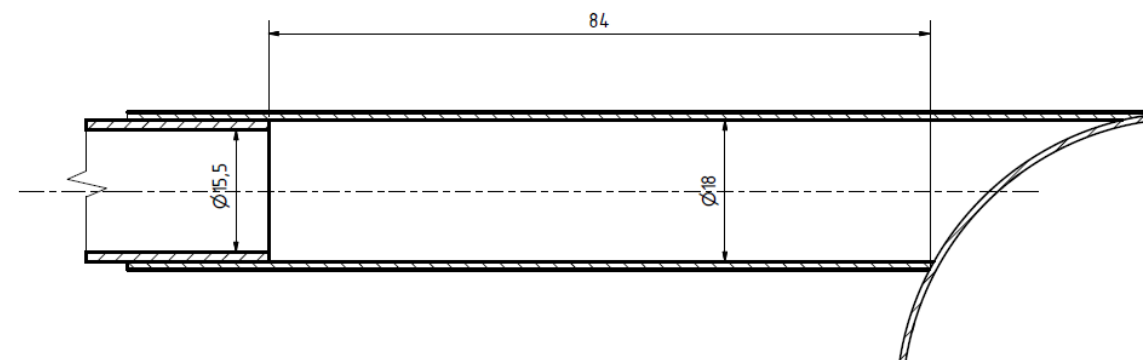
Tato měření ukázala, že odlučovací schopnosti vstupu s krátkou trubkou a krátkým kónickým přechodem odpovídají uspořádání s dlouhou vstupní trubkou o menším vnitřním průměru, což může vést k zásadním chybám při použití třídiče pro měření imisí a emisí v praxi. Výstupy z těchto dvou měření jsou uvedeny v příloze č. 1.



Obr. 10.1 Konstrukce vstupu do cyklónu (krátká vstupní trubka)

10.1.2 Cyklón D73/ Ø18 dlouhou vstupní trubkou

Na základě výše zmíněného zjištění bylo uspořádání vstupu upraveno tak, jak je vidět na obr. 10.2. Krátkou trubku na vstupu do cyklónu nahradila dlouhá trubice, kde $l/d = 4,78$.



Obr. 10.2 Konstrukce vstupu do cyklónu (dlouhá vstupní trubka)

Vnitřní průměr trubky se pak pomocí přechodového kusu postupně snižuje z hodnoty 18 mm na průměr odběrové sondy. S takto upraveným cyklónem byla prováděna ostatní měření (viz kapitola 10.2).

Testovaný cyklón ve složeném a rozloženém stavu ukazuje obr. 10.3. Konstrukční provedení třídiče je ve výkresové dokumentaci, viz příloha č. 6 - 10.



Obr. 10.3 Ukázka cyklónu D73 ve složeném (vlevo) a rozloženém stavu (vpravo)

10.2 Volba zkušební prachu a průběh experimentu

Pro experiment byly zvoleny dva zkušební prachy interně označené jako B2 ($a_{1,med,M} = 11,4 \mu\text{m}$) a E4 ($a_{1,med,M} = 12,3 \mu\text{m}$). Nejprve byla vyhodnocena celková odlučivost cyklónu O_C jako funkce vysunutí výstupní trubice v . Poté byly z analyzovaných vzorků prachu určeny korigované závislosti frakčních odlučivostí na aerodynamické velikosti částice $O_f'(a_1)$, z čehož byly následně odečteny hodnoty meze odlučivosti $a_{1,m}$ při $O_f' = 0,5$. Na základě získaných závislostí meze odlučivosti $a_{1,m}$ na vysunutí v u obou prachů byla stanovena optimální hodnota vysunutí, se kterou byla provedena série ověřovacího měření s prachem E4 pro zjištění provozní jímavosti třídiče.

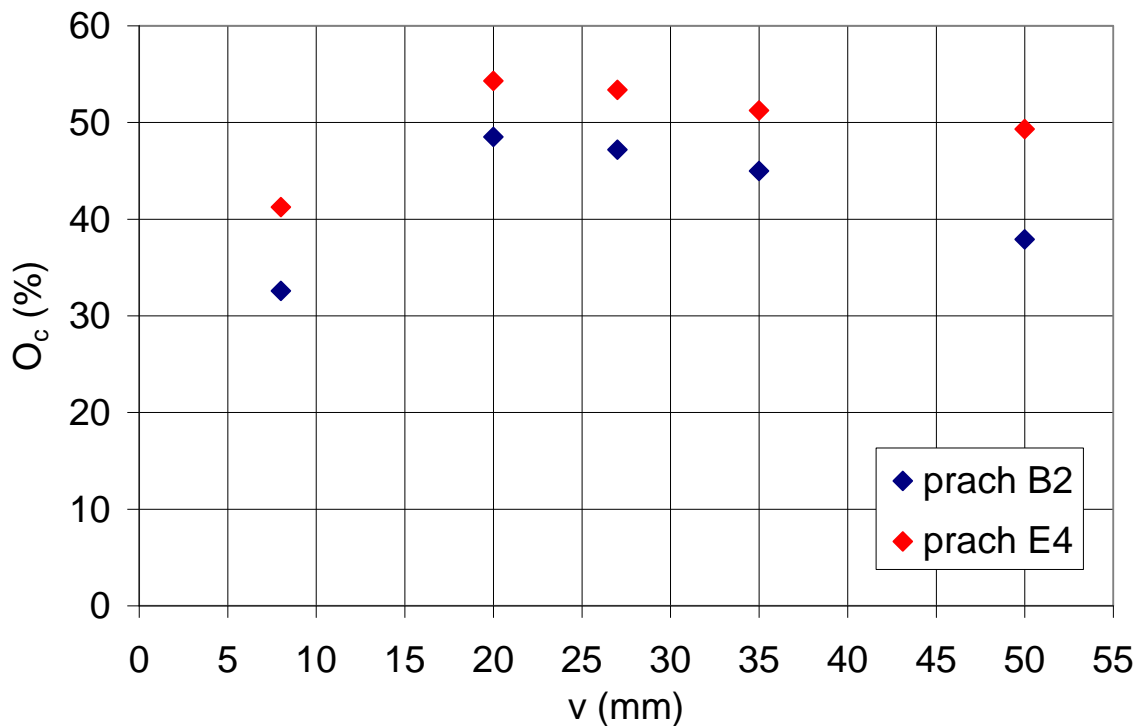
10.3 Závislost celkové odlučivosti na vysunutí výstupní trubice

Pro oba zkoušené prachy byla určena hodnota celkové odlučivosti O_C při pěti různých vysunutí výstupní trubky. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze č. 2, resp. 3.

Hodnoty celkových odlučivosti O_C pro oba prachy shrnuje tab. 10.2, grafické vyjádření závislosti $O_C = f(v)$ pak ukazuje obr. 10.4.

Tab. 10.2 Hodnoty celkové odlučivosti pro prachy B2 a E4

Vysunutí výstupní trubice v [mm]	8	20	27	35	50
Celková odlučivost O_C pro B2 [%]	32,58	48,51	47,17	44,99	37,90
Celková odlučivost O_C pro E4 [%]	41,24	54,29	53,36	51,24	49,31



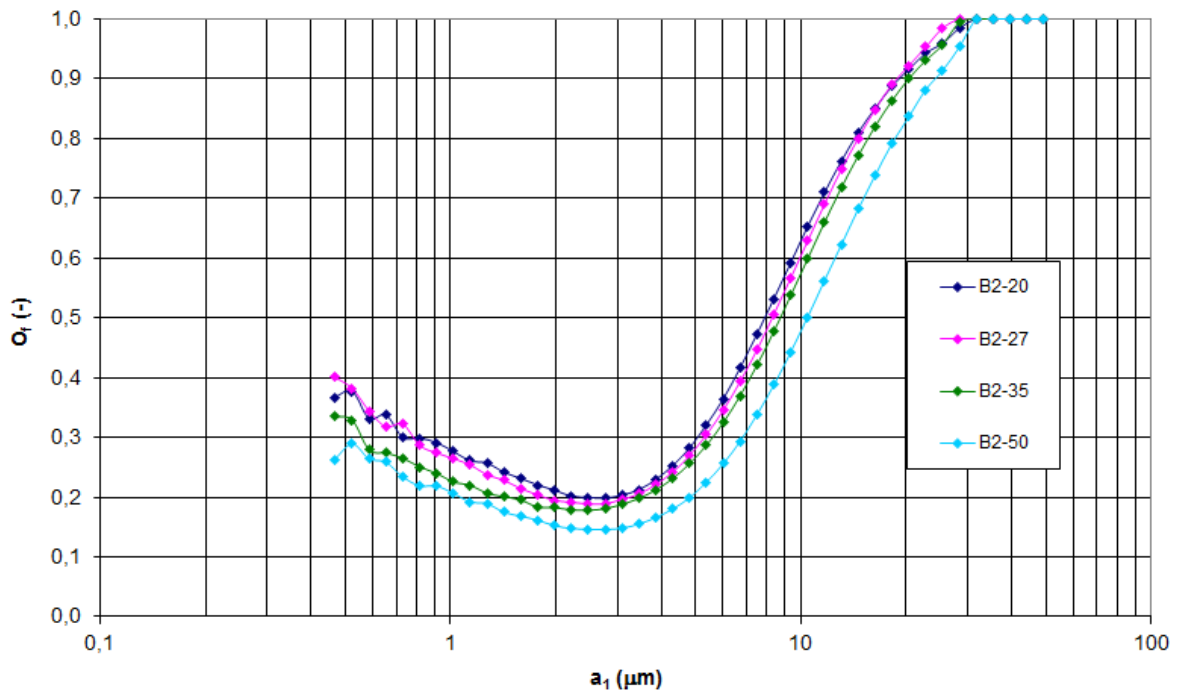
Obr. 10.4 Závislost celkové odlučivosti O_C na vysunutí v pro prachy B2 a E4

Z grafu je patrné, že pro jemnější prach B2 dostáváme hodnoty celkové odlučivosti zhruba o 6 – 11 % nižší oproti prachu E4. Z průběhu závislosti $O_C = f(v)$ lze rovněž vyčíst rychlý trend změn hodnot O_C s rostoucím vysunutím pro jeho malé hodnoty, přibližně do $v = 20$ mm. Poté se dosáhne oblasti určitého plochého maxima,

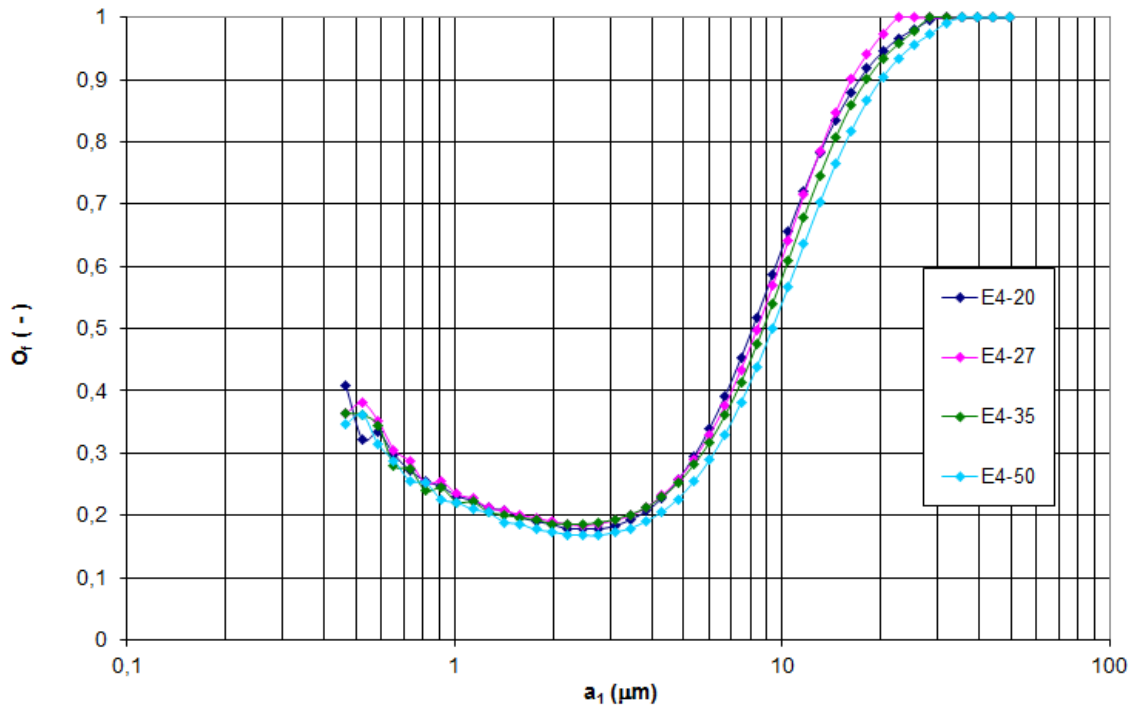
kde jsou změny třídících vlastností méně výrazné a méně závislé na přesném nastavení vysunutí. Z toho důvodu byla při dalším zpracování výsledků věnována pozornost oblasti $v \geq 20$ mm.

10.4 Frakční odlučivost a stanovení meze odlučivosti

Vzorky obou změřených prachů pro vysunutí $v = 20, 27, 35$ a 50 mm prošly analýzou a poté byla metodou záchyt – výstup stanovena závislost $O_f(a_1)$. Vzorky pro vysunutí $v = 8$ mm nebyly analyzovány z výše uvedeného důvodu strmosti závislosti $O_C = f(v)$. Výstupem analýzy jsou křivky závislosti $O_f = (a_1)$ pro oba prachy (viz. obr. 10.5 a 10.6), které však bylo potřeba ještě zkorigovat.

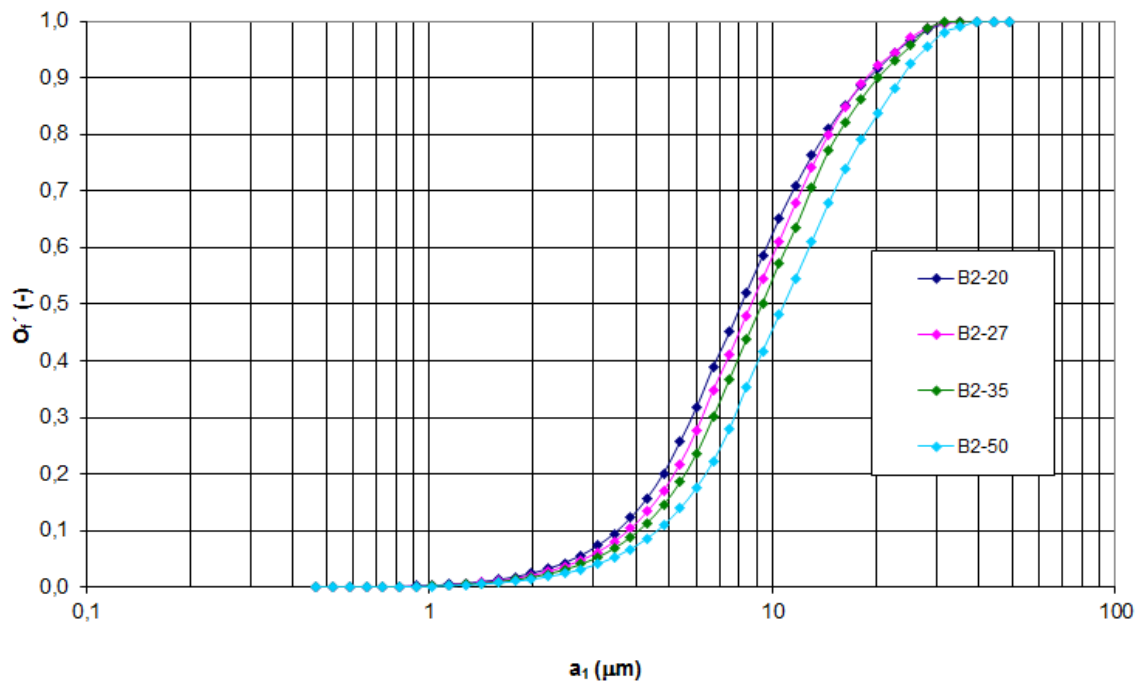


Obr. 10.5 Nekorigované křivky $O_f(a_1)$ v závislosti na vysunutí v – prach B2

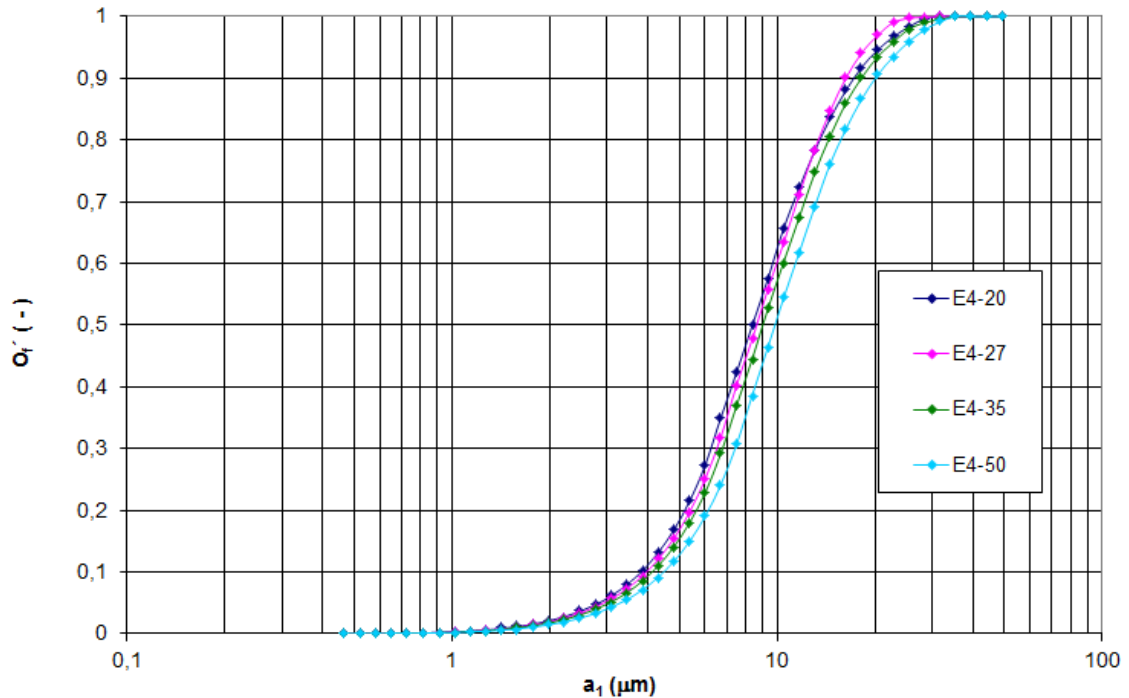


Obr. 10.6 Nekorigované křivky $O_f(a_1)$ v závislosti na vysunutí v – prach E4

Korigované závislosti $O_f'(a_1)$ pro oba prachy byly určeny metodou tzv. těsné korekce, kterou popisuje kapitola 9.6. Výsledné závislosti pro prach B2 a E4 můžeme vidět na obr. 10.7, resp. 10.8. Přehled hodnot a_1 a O_f' uvádí příloha č. 4.



Obr. 10.7 Korigované křivky $O_f'(a_1)$ v závislosti na vysunutí v – prach B2



Obr. 10.8 Korigované křivky $O_f'(a_1)$ v závislosti na vysunutí v – prach E4

Z korigovaných závislostí $O_f'(a_1)$ byly pro hodnoty frakční odlučivosti $O_f' = 0,5$ určeny hodnoty mezí odlučivosti $a_{1,m}$ pro oba zkoušené prachy, které jsou shrnuty v tab. 10.3.

Tab. 10.3 Hodnoty mezí odlučivosti $a_{1,m}$ v závislosti na vysunutí pro prach B2 a E4

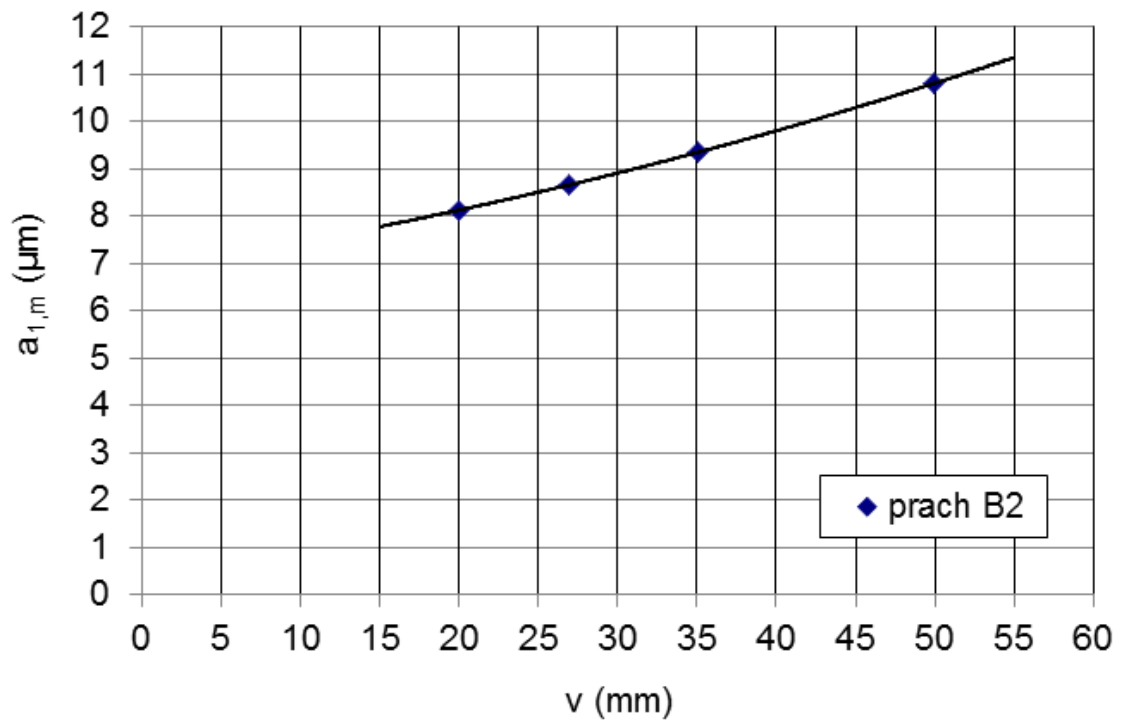
v [mm]	$a_{1,m}$ [μm]	
	prach B2	prach E4
20	8,12	8,33
27	8,68	8,66
35	9,33	9,04
50	10,81	9,86

Na základě těchto informací lze říci, že zkoušený cyklón může při vhodném vysunutí výstupní trubice vyhovovat požadavkům na třídič frakce PM_{10} .

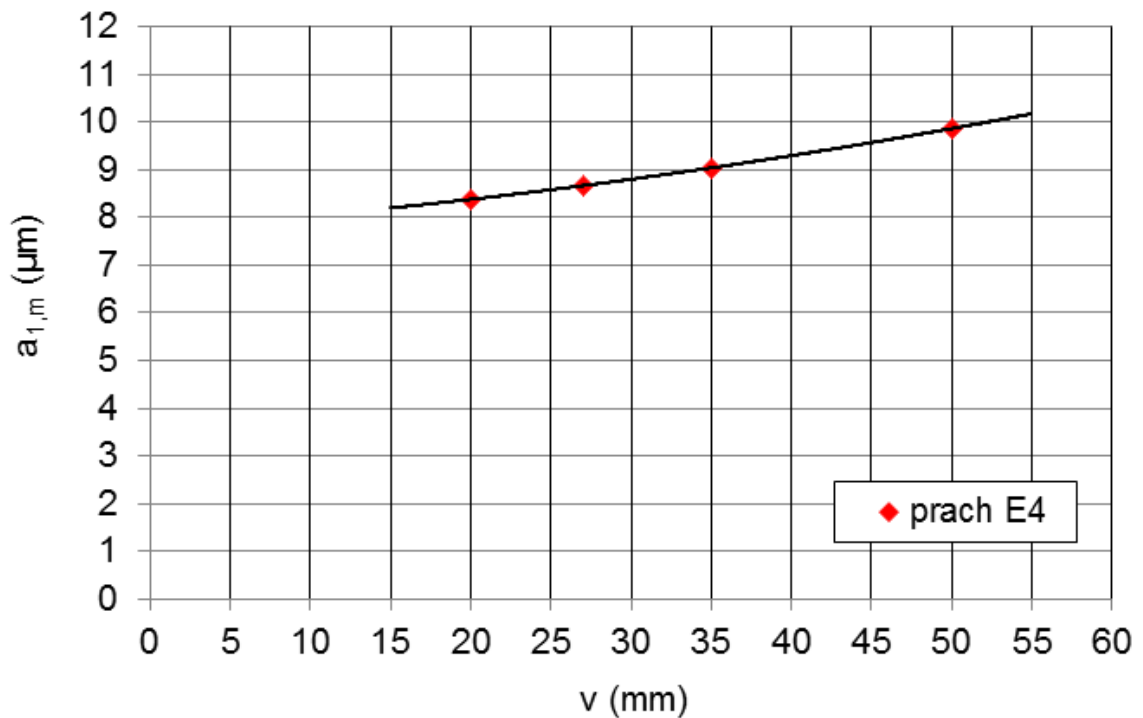
10.5 Závislost meze odlučivosti na vysunutí výstupní trubice

Závislosti meze odlučivosti na vysunutí výstupní trubky pro oba zkoušené prachy jsou vyjádřeny na obr. 10.9 a 10.10. Z obou grafických vyjádření vyplývá, že se stoupající hodnotou vysunutí v stoupá i mez odlučivosti třídiče.

Z průběhů závislostí byly určeny hodnoty vysunutí v pro požadovanou mez odlučivosti $a_{1,m} = 10 \mu\text{m}$ u obou zkoušených prachů. V případě prachu B2 se jedná o hodnotu $v = 42 \text{ mm}$, pro prach E4 vychází toto vysunutí $v = 51,8 \text{ mm}$. Na základě takto určených hodnot bylo navrženo optimální vysunutí výstupní trubky cyklónu jako střední hodnota z obou sad měření, a to $v = 47 \text{ mm}$.



Obr. 10.9 Závislost $a_{1,m} = f(v)$ pro zkušební prach B2



Obr. 10.10 Závislost $a_{1,m} = f(v)$ pro zkušební prach B2

10.6 Provozní jímavost třídače

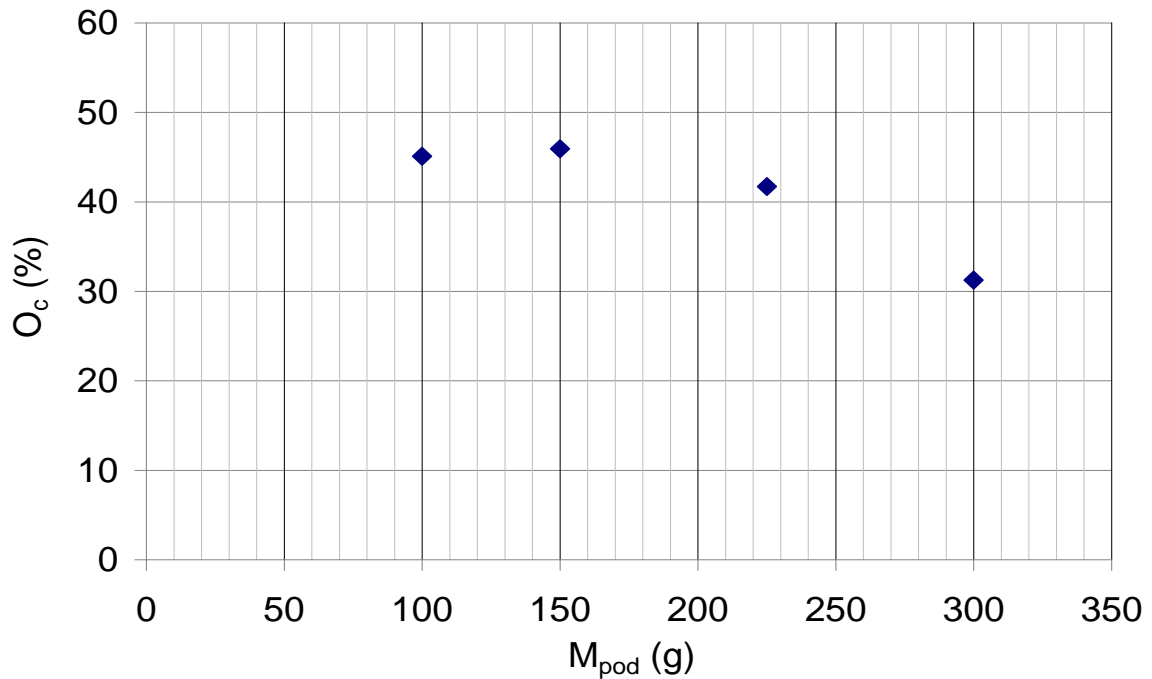
V poslední fázi měření byla zjišťována provozní jímavost cyklónu D73, tj. určení maximální hmotnosti zachyceného prachu, při němž zůstávají odlučovací schopnosti třídače nezměněné. V rámci experimentu byla provedena jedna série měření se zkušebním prachem E4 při vysunutí výstupní trubky $v = 46$ mm. Měření bylo provedeno pro čtyři různé doby provozu, během kterých bylo podáno různé množství prachu M_{pod} (viz tab. 10.4). Všechny naměřené a vypočítané hodnoty z této části experimentu jsou zaznamenány v příloze č. 5.

Tab. 10.4 Doba provozu zařízení a množství podaného prachu při měření

Doba provozu τ [min]	Množství podaného prachu M_{pod} [g]
20	100
30	150
45	225
58,5	300

Vyhodnocenou závislost celkové odlučivosti O_C na množství podaného prachu M_{pod} ukazuje obr. 10.9. Ze zjištěných dat měření plyne, že odlučovací schopnosti třídiče zůstávají konstantní ($O_C \approx 45\%$) po minimální dobu provozu cca 30 minut, během které bylo podáno 150 g prachu.

Za těchto podmínek byla hmotnost prachu zachyceného v cyklónu $M_Z = 0,57$ g, což lze považovat za odhad provozní jímavosti cyklónu M_{pj} .



Obr. 10.11 Závislost $O_C = f(M_{pod})$

Díky provozní jímavosti cyklónu lze odhadnout minimální dobu provozu cyklónu jako třídiče PM_{10} pro měření imisí bez nutnosti údržby $\Delta\tau$. Vychází se z předpokladu, že celková koncentrace tuhých příměsí (TSP) dosahuje 24-hodinového imisního limitu pro frakci PM_{10} , tedy $C_{TSP} = 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a pro uvažované složení atmosférického prachu je hodnota hmotnostního zbytku $Z_M(10 \mu\text{m}) \approx 0,2$. Pro hmotnost zachyceného prachu v cyklónu M_Z , který třídí při $a_{1,m} = 10 \mu\text{m}$, lze pak psát rovnici

$$M_Z = \dot{V} C_{TSP} Z_M(10) \Delta\tau \quad (10.1)$$

Pro hodnotu jímavosti M_{pj} stanovenou na základě experimentu a objemový průtok $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ vychází provozní doba $\Delta\tau = 24\,782 \text{ h}$, což představuje více než 1000 dnů bez potřeby údržby.

11. ZÁVĚR

V teoretické části bakalářské práce byla shrnuta platná legislativa v oblasti ochrany ovzduší (Zákon č. 201/2012 Sb.) v České republice, zmíněny některé mezinárodní úmluvy a byl zde podán stručný přehled o současném stavu kvality ovzduší. Práce se dále zabývá imisním monitoringem v ČR, popisuje druhy zařízení pro tříděný odběr vzorků frakcí PM_x a technickou normu ČSN EN 12341 pro stanovení frakce PM_{10} a $PM_{2,5}$, která je platná v celé Evropské unii.

Další část práce je potom věnována dosavadnímu výzkumu v oblasti třídění imisí na Ústavu techniky prostředí a práce navazuje na dosavadní výsledky v oblasti vývoje imisní hlavice PM_{10} . Výstupem poslední práce [16] byla dvojice imisních hlavic D73 a D84, kdy výsledky ukázaly, že třídíče odlučují s mezí odlučivosti o něco menší než je požadovaná hodnota 10 μm . Vyplynul požadavek, že je potřeba hlavice dále upravit a znovu otestovat na zkušební trati. Cílem experimentální části práce tedy byl návrh úpravy cyklónu D73, ověření a vyhodnocení jeho třídících schopností.

První úprava cyklónu D73 spočívala ve zvětšení vnitřního průměru vstupní trubky třídíče d z 16 mm na 18 mm, kde poměr l/d byl 0,944. Hodnoty celkových odlučivostí pro vysunutí výstupní trubky 8 a 20 mm vyšly v rozmezí 70 – 78%, což byly hodnoty větší než předpokládané a ukazující, že nedošlo k posunu k hodnotě meze odlučivosti 10 μm , ale spíše naopak. Třídící vlastnosti cyklónu D73/ \emptyset 18 s krátkou vstupní trubkou tak odpovídaly vlastnostem třídíče s delší vstupní trubkou o menším vnitřním průměru, proto další úprava spočívala v jejím prodloužení na délku 84 mm.

Na výsledné imisní hlavici D73/ \emptyset 18 s dlouhým vstupem ($l/d = 4,78$) byla měření při jmenovitém průtoku 2,3 m^3/h zjišťována závislost celkové odlučivosti na vysunutí výstupní trubky $O_C = f(v)$ pro dva zkušební prachy. Ukázalo se, že v oblasti vyšších hodnot vysunutí výstupní trubky v (mm) jsou změny hodnot celkové odlučivosti, a tedy i změny třídících schopností méně výrazné a méně závislé na přesném nastavení výstupní trubky. Proto byla při dalším zpracování výsledků měření soustředěna pozornost na oblast $v \geq 20$ mm.

Následně byla stanovena závislost frakční odlučivosti na aerodynamické velikosti částice $O_f = f(a_1)$, která se pomocí tzv. těsné korekce zkorigovala tak, aby se

odstranila systematická chyba vzniklá nedokonalým rozbitím shluků prachu při podávání do zkušební tratě, a lépe tak popisovala reálný stav.

Ze získaných korigovaných křivek $O_f'(a_1)$ byly určeny meze odlučivosti $a_{1,m}$ pro hodnoty $O_f' = 0,5$ a stanoveny tak závislosti $a_{1,m} = f(v)$ pro oba zkušební prachy. Na základě těchto závislostí bylo určeno vysunutí výstupní trubky, při kterém třídič dosahuje požadované hodnoty $a_{1,m} = 10 \mu\text{m}$.

Pro prach E4 lze této hodnoty dosáhnout při vysunutí $v = 51,8$ mm, pro prach B2 při vysunutí $v = 42,0$ mm. Protože zjištěné třídící schopnosti by neměly být závislé na použitém zkušebním prachu, je doporučená výsledná hodnota vysunutí stanovena jako střední hodnota z výsledků obou sérií měření, tedy $v = 47$ mm.

Závěrečnou fází experimentu bylo stanovení provozní jímavosti cyklónu, tj. stanovení maximální hmotnosti zachyceného prachu, při kterém ještě nedochází k výrazným změnám odlučovacích schopností cyklónu. Ze zjištěné hodnoty provozní jímavosti cyklónu 0,57 g, pak vyplývá provozní doba cyklónu 24 782 h, tedy více než 1000 dnů provozu bez nutnosti údržby.

Experimenty ukázaly, že upravený cyklón při objemovém průtoku $2,3 \text{ m}^3/\text{h}$ třídí podle požadavků frakce částic PM_{10} . Významnou vlastností tohoto třídiče pracujícího na odstředivém odlučovacím principu je spolehlivost a vysoká hodnota provozní jímavosti, která umožňuje jeho dlouhodobý provoz bez rizika změny odlučovacích schopností s časem. Ve srovnání s třídiči, které fungují na setrvačném (impakčním) odlučovacím principu a kde jsou odlučovací schopnosti silně závislé na druhu, kvalitě povrchové úpravy a expozici impakční plochy, je cyklón jednoduchý a především spolehlivý třídič.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hemerka, J., Vybíral, P.: Ochrana ovzduší, Nakladatelství ČVUT v Praze, 2010, ISBN 978-80-01-04646-3
- [2] Ministerstvo životního prostředí [online]: Dostupné z www.mzp.cz
- [3] Český hydrometeorologický ústav [online]: Dostupné z www.chmu.cz
- [4] Český hydrometeorologický ústav: Znečištění ovzduší na území České Republiky v roce 2012, ročenka ČHMÚ, Praha, 2013, ISBN – 978-80-87577-20-2
- [5] Zákon č.201/2012 Sb. O ochraně ovzduší
- [6] Kolektiv autorů: Kompendium ochrany kvality ovzduší, Vodní zdroje Ekomonitor spol. s r.o., Chrudim, 2008, ISBN: 978-80-86832-38-8
- [7] Světová zdravotnická organizace [online]: Dostupné z www.who.int
- [8] Evropská agentura pro životní prostředí [online]: Dostupné z www.eea.europa.eu
- [9] ČSN ISO 7708 Kvalita ovzduší – Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik, ČNI Praha 1998
- [10] ČSN EN 12341 Kvalita ovzduší – Referenční gravimetrická metoda stanovení hmotnostní koncentrace frakcí aerosolových částic PM₁₀ a PM_{2,5}, ČNI Praha 2014
- [11] Hemerka, J.: Odlučování tuhých částic, Nakladatelství ČVUT v Praze, 1994, ISBN 80-01-01088-0
- [12] Hemerka, J., Merta, M.: Experimentální ověření hlavice PM 10, Ochrana ovzduší 1995, č. 6, s. 2 - 19
- [13] Hemerka, J., Vybíral, P., Švandová, K.: Vývoj imisní hlavice PM 10, ČVUT – FS – ÚTP, připraveno k publikaci v časopise Vytápění, větrání, instalace, Praha, 2015
- [14] Poduška, V.: Tříděný odběr vzorků imisí, Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2009
- [15] Novotná, Š.: Návrh a experimentální ověření imisní hlavice PM10, Diplomová práce, Fakulta strojní ČVUT v Praze, 2012

[16] Petrák, V: Imisní monitoring tuhých znečišťujících látek, Bakalářská práce, Fakulta strojní ČVUT, 2014

[17] Katalog firmy Dekati [online]: Dostupné z www.dekati.com/products

[18] Parlamentní listy [online]: www.parlamentnilisty.cz

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Změřené a vypočtené hodnoty pro prach B2 a krátkou vstupní trubku

Příloha č. 2 - Změřené a vypočtené hodnoty pro prach B2 a dlouhou vstupní trubku

Příloha č. 3 - Změřené a vypočtené hodnoty pro prach E4 a dlouhou vstupní trubku

Příloha č. 4 - Vypočtené hodnoty pro frakční odlučivost O_f' z analýzy vzorků

Příloha č. 5 - Změřené a vypočtené hodnoty pro prach E4 při $v = 46$ mm

Příloha č. 6 - Výkres D73 – 15 – 00 Sestava

Příloha č. 7 - Výkres D73 – 15 – 01 Cyklón

Příloha č. 8 - Výkres D73 – 15 – 02 Víko

Příloha č. 9 - Výkres D73 – 15 – 03 Vstupní trubka

Příloha č. 10 - Výkres D73 – 15 – 04 Výstupní trubka