



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

NÁVRH IMPAKTORU PRO SEPARACI JEMNÝCH ČÁSTIC

DESIGN OF AN IMPACTOR FOR FINE PARTICLE SEPARATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Rigby

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jakub Rigby**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Energetika, procesy a životní prostředí
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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

Návrh impaktoru pro separaci jemných částic

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na problematiku zachytu jemných částic rozptýlených ve vzduchu. V rámci práce budou představeny obecné možnosti zachytu částic pro laboratorní odběry. Bližší pozornost bude věnována zachytu jemných částic změnou směru proudu vzduchu unášejícího částice (impakce). Uveden bude výpočet základních rozměrů jednoduchého impaktoru na základě dostupné výpočtové metodiky. Pro konkrétní zadání bude navržen vlastní impaktor a zpracována potřebná technická dokumentace.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršním způsobem představit problematiku jemných částic v ovzduší a možnosti jejich laboratorního zachytu.
2. Bližše představit funkci a základní výpočtové vztahy virtuálního impaktoru včetně dohledatelných provedení.
3. Pro zadané parametry realizovat návrh virtuálního impaktoru.
4. V laboratorních podmínkách provést ověření funkce navrženého impaktoru.

Seznam doporučené literatury:

KODAD, Daniel. Impaktor pro laboratorní zachyt jemných částic [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132266>.

ISO 23210:2009: Stationary source emissions — Determination of PM10/PM2,5 mass concentration in flue gas — Measurement at low concentrations by use of impactors. Dostupné z: <https://www.iso.org/standard/53379.html>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou separace jemných částic metodou impakce. V úvodu práce jsou představeny hlavní polutanty ovzduší, přičemž blíže je pohled zaměřen na tuhé znečišťující látky. U tohoto typu znečištění jsou uvedeny vlastnosti, principy vzniku a také legislativa a vliv na lidské zdraví. Následně jsou popsány možné metody laboratorního zachytu tuhých látek, přičemž detailně je popsána metoda impakce. Praktická část práce je zaměřena na výpočet hlavních rozměrů, konstrukci a výrobu virtuálního impaktoru. Byly vyrobeny virtuální impaktory pro separaci částic PM_{2,5} a PM₁₀ v několika konstrukčních a materiálových provedeních. V závěru bylo uskutečněno měření ověřující funkčnost navržených zařízení s ohledem na účinnost separace.

Klíčová slova

Virtuální impaktor, impakce, jemné částice, tuhé znečišťující látky

ABSTRACT

This bachelor thesis follows up fine particle separation issue with use of impaction method. The introduction is focused on main air pollutants. Closely the solid pollutants and their properties such as formation principle, legislation and human health impact are showed. Following parts describes methods of fine particle capture and closer is focused on impaction method. In the experimental part of this thesis main dimension calculation, construction and manufacturing process of virtual impactor is presented. Several construction and material types of virtual impactor has been fabricated. Finally, a separation efficiency measurement was made. This measurement confirms properties of PM_{2,5} and PM₁₀ virtual impactor.

Key words

Virtual impactor, impaction, fine particles, solid pollutants

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RIGBY, Jakub. *Návrh impaktoru pro separaci jemných částic* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139925>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Pospíšil.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh impaktoru pro separaci jemných částic** vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jiřího Pospíšila, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....
Datum

.....
Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Jiřímu Pospíšilovi, Ph.D. za cenné připomínky a čas, který mi poskytl při konzultacích bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ladislavovi Šnajdárkovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Sitkovi za pomoc s výrobou a měřením v praktické části mé práce. V poslední řadě bych rád poděkoval rodině a přátelům za finanční a morální podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Znečištění ovzduší.....	12
1.1 Vznik znečišťujících látek	12
1.2 Hlavní představitelé znečišťujících látek.....	13
1.3 Emise, imise a přenos látek v ovzduší	14
1.4 Vývoj znečištění ovzduší.....	15
2 Jemné částice	17
2.1 Mechanismy vzniku.....	17
2.2 Rozdělení a tvar jemných částic	18
2.3 Pádová rychlost.....	19
2.4 Ekvivalentní průměr částice	19
2.5 Působení jemných částic na lidské zdraví	20
2.6 Legislativa v otázce jemných částic v ovzduší	22
2.6.1 Imisní limity	22
2.6.2 Emisní limity	22
3 Technologie odlučování jemných částic v laboratorních podmínkách	24
3.1 Filtry	24
3.2 Elektrický odlučovač	25
3.3 Mokré mechanické odlučovače	26
3.3.1 Hladinový odlučovač	26
3.4 Suché mechanické odlučovače	27
4 Impakce	28
4.1 Rozdělení impaktorů dle mechanismu zachytu částic	29
4.2 Paralelní impaktor.....	29
4.3 Kaskádový impaktor	30
5 Virtuální impaktory a jejich modifikace	31
5.1 Zvyšování účinnosti separace	32
5.2 Modifikace virtuálních impaktorů	33
5.2.1 Vícetupňový virtuální impaktor	33
5.2.2 Virtuální impaktor se stabilizačním otvorem.....	33
5.2.3 Více-tryskový impaktor s přívodem vzduchu	34
5.2.4 Protiproudý virtuální impaktor.....	35
6 Návrh virtuálního impaktoru	36
6.1 Výpočet.....	37
6.1.1 Vlastnosti pracovního média.....	37
6.1.2 Cunninghamův korekční faktor	37
6.1.3 Parametry virtuálního impaktoru	38
6.1.4 Výsledné hodnoty	39
6.1.5 Účinnost separace	39
6.2 Konstrukce	40

6.2.1	Tělo impaktoru.....	40
6.2.2	Víčko.....	41
6.2.3	Těsnění.....	41
6.3	Výroba	42
7	Experimentální část	44
7.1	Popis měřicí tratě	44
7.1.1	3079 Portable Atomizer Aerosol Generator.....	44
7.1.2	Měřicí box	44
7.1.3	Impaktor	45
7.1.4	Optical Partical Sizer 3330	45
7.1.5	PALAS Promo 2000	46
7.2	Nastavení experimentu	47
7.3	Výsledky měření.....	48
7.3.1	PM 10.....	49
7.3.2	PM 2,5.....	52
ZÁVĚR.....		54
8	Citovaná literatura	56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ		59
SEZNAM PŘÍLOH		60

ÚVOD

Jedním z nejrozšířenějších polutantů ovzduší jsou tuhé znečišťující látky označované zkratkou TZL a někdy také jako jemné či prachové částice. Tento druh znečištění s sebou přináší téměř každá činnost, ať už se jedná o konání člověka či přírody samotné. V podání člověka je produkce těchto škodlivin přisuzována zejména lokální energetice, dopravě, průmyslu a zemědělství. Jelikož mohou být dopady tuhých látek v ovzduší nebezpečné živočichům, ale také celým ekosystémům je nezbytné být schopni tyto látky měřit a případně také odstraňovat zejména tam, kde za jejich původem stojí člověk.

Prvním z cílů této práce je řešerše zabývající se již zmíněnými jemnými částicemi. O těchto látkách bude pojednáno v úvodu této práce, kde bude nejdříve přiblížena problematika kvality ovzduší obecně. Budou představeny hlavní polutanty ovzduší a některé pojmy, které přináší problematika ekologie atmosféry. Protože se tato práce zabývá jemnými částicemi budou tyto látky následně blíže představeny v kontextu nejen fyzikálních vlastností a jejich původu, ale také vlivu na člověka a v neposlední řadě i tomu, jak na ně pohlíží legislativa.

Lidská činnost je významným producentem prachových částic, a proto je nutné aby chom dokázali, pokud možno co nejlépe, zabraňovat vzniku tohoto typu znečištění. Pokud však nejsme schopni eliminovat vznik jemných částic je nezbytné být schopni je následně ze vzduchu separovat. V další části této práce tak budou představeny možnosti laboratorního zachytu jemných částic. Jednou z těchto technologií, jež je využívána v několika typech odlučovačů je princip separace změnou směru proudu plynu. Tato metoda je označována jako impakce a bude jí věnován zbývajících díl této práce. V první řadě bude řešeršně představen princip tohoto typu separace a následně bude pohled zaměřen na zařízení, pro které je metoda impakce typická. Těmito zařízeními jsou impaktory.

V praktické části práce bude čtenář proveden návrhem virtuálního impaktoru. Tento postup začíná výpočtem, který je proveden dle dříve ověřených metod vycházejících z výpočtu V.A. Marpla. Cílem výpočtu je určení hlavních rozměrů trysky virtuálního impaktoru. Následně jsou vypočtené hodnoty aplikovány při konstrukci šesti prototypů impaktoru pro separaci částic o velikosti 2,5 μm a 10 μm . Všechny prvky těchto zařízení jsou zpracovány do výkresové dokumentace, která tvoří přílohy této práce. Za použití konvenčního frézování a 3D tisku je následně vyrobeno šest prototypů. Nejenom díky technologii výroby, použití vhodných materiálů a geometrií bylo mým snažením docílit co nejlepších vlastností impaktoru. Charakteristickou veličinou popisující správnou funkci tohoto zařízení je účinnost separace. V závěru práce se zaměřím na experimentální určení právě této veličiny pomocí optických metod určování koncentrace částic v nosném plynu.

1 Znečištění ovzduší

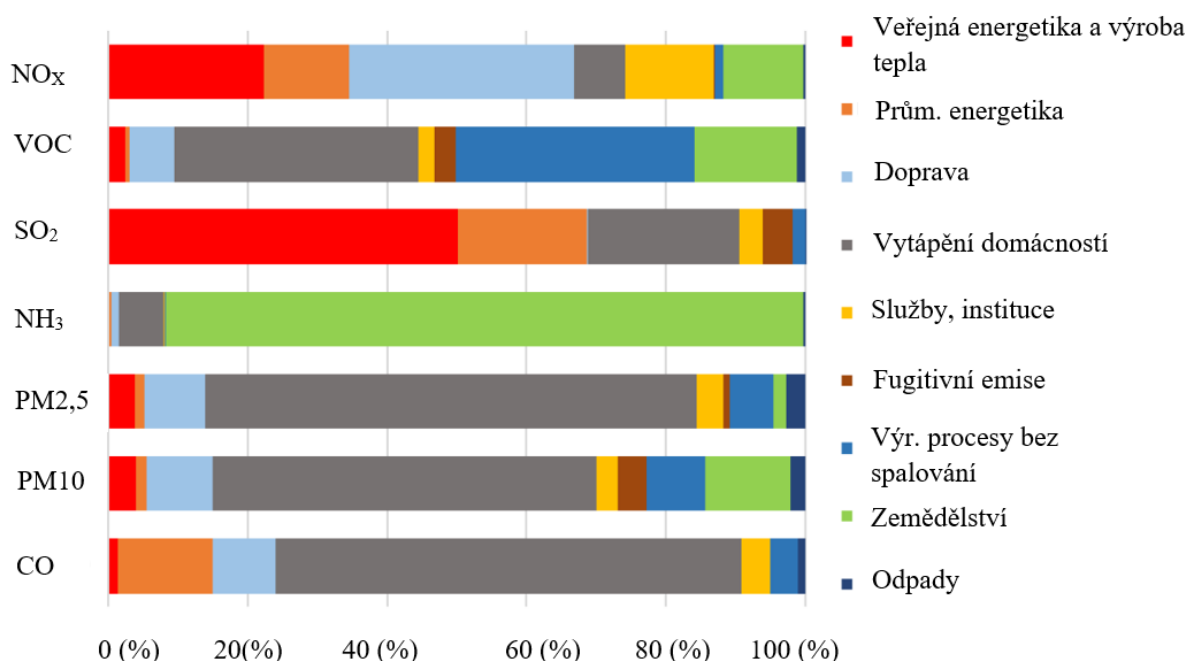
Znečišťováním ovzduší se rozumí vnášení cizích látek nebo také energie do atmosféry. To tedy znamená, že znečištění může mít charakter plyných či tuhých látek, ovšem také škodlivé elektromagnetické záření, hluk, pachy a jiné [1].

Kvalita ovzduší je zásadní faktor ovlivňující zdraví a život na naší planetě. Znečištění různého typu může mít silné negativní dopady již při malých koncentracích. Působí na všechny ekosystémy, a proto je kontrola kvality ovzduší zásadní, jelikož lidské působení má na vzniku znečištění svůj silný podíl. Obecně mají na kvalitu ovzduší v současnosti největší vliv tuhé znečišťující látky, které jsou označovány zkratkami P10, PM2,5 a PM1, dále oxid siřičitý (SO_2), oxidy dusíku (NO_x), oxid uhelnatý (CO), těkavé látky (VOC), polycyklické aromatické uhlovodíky, jejichž hlavním představitelem je benzo(a)pyren, amoniak (NH_3) a přízemní ozon (O_3). Znečištění ovzduší se projevuje zejména v aglomeracích vlivem silné dopravy a rozvinutého průmyslu, ale také v méně osídlených oblastech, kde je častěji využito lokálního vytápění na tuhá paliva a je zde intenzivní zemědělská činnost [2].

1.1 Vznik znečišťujících látek

Zemská atmosféra není stálá a dochází v ní nepřetržitě ke změnám. Do těchto změn je možné zahrnout jak pohyb okolního vzduchu a s ním spojený přenos, tak také chemické reakce, které při setrvání v atmosféře mohou nastat. Proto rozlišujeme primární znečišťování, tedy přímý přenos znečišťujících látek ze zdrojů do ovzduší a sekundární znečišťování, kterým rozumíme chemické reakce, které nastávají při setrvání a přenosu v atmosféře [1].

Obrázek 1.1 zobrazuje procentuální podíl jakým se jednotlivé zdroje podílí na vzniku znečišťujících látek v ČR v roce 2019.



Obrázek 1.1 Zdroje emisí vybraných znečišťujících látek v ČR v roce 2019 (%) [2]

1.2 Hlavní představitelé znečišťujících látek

Tuhé znečišťující látky

Suspendované částice se do atmosféry mohou v zásadě dostávat dvěma způsoby. První z nich je přírodního charakteru a může zahrnovat například drobný prach unášený větrem, popel vzniklý z lesních požárů, látky vzniklé sopečným působením nebo látky biologického původu jako je například pyl rostlin. Druhý způsob vzniku tuhých znečišťujících látek je označován jako antropogenního původu. Tento způsob je spojen především s lidskou činností, a to nejen v sektoru energetiky, ale také dopravy, zemědělství nebo stavebnictví [3].

Podrobněji bude problematika jemných částic přiblížena v kapitole 2 této práce.

Oxid siřičitý (SO_2)

Hlavním zdrojem, který je zodpovědný za vnášení oxidu siřičitého do ovzduší je energetické využití paliv s vysokým obsahem síry. Takto produkovaný oxid siřičitý v atmosféře dále reaguje a v důsledku fotochemické nebo katalytické reakce vzniká oxid sírový. Vlivem vlhkosti vzduchu se oxid sírový hydratuje a vzniká kyselina sírová. Celá reakce je dokončena, pokud se v ovzduší nachází také prašné aerosoly alkalického původu a v kombinaci s kyselinou sírovou je umožněno vzniku síranů. Oxidy síry se mohou do ovzduší dostávat také přírodními cestami, zejména pak vulkanickou činností [3].

Znečištění v podobě síranů se může na zemský povrch dostávat usazováním, a také při srážkách, kdy vznikají takzvané kyselé deště. V České republice byl tento druh znečištění největším problémem v 80. letech minulého století především vlivem spalování méně kvalitních hnědých uhlí v severních Čechách [3].

Oxid uhelnatý (CO)

Oxid uhelnatý je produktem nedokonalého spalování. Vzniká tedy při neúplné oxidaci paliva a je energeticky nevýhodný. Při jeho vzniku je spotřebována pouze polovina kyslíku a při spálení vzniká 1/3 tepelné energie oproti dokonalému spalování. V energetice se vzniku CO vyhýbáme především úpravou spalovacích teplot, množstvím a promícháním spalovacího vzduchu. V přírodě dochází k intenzivnímu odbourávání oxidu uhelnatého díky bakteriím a absorpci do půdy [4].

Z obrázku 1.1 je patrné, že velká energetika se na produkci CO v roce 2019 podílela jen v malých jednotkách procent. Tento problém je nyní otázkou především malých lokálních topenišť, kde obvykle není docíleno dokonalého spalování. Aktuální legislativa řešení tohoto typu znečišťování nepřináší, jelikož na provoz lokálního vytápění v domácnostech nejsou uvaleny emisní limity. Dalším velkým zdrojem CO je doprava a energetika v průmyslu.

Oxidy dusíku (NO_x)

Pojmem NO_x rozumíme znečišťující látky oxidů dusíku jejichž představitelé jsou oxidy dusný, dusnatý, dusičitý a dusičný. Do ovzduší se dostávají především z dopravy a při spalování s velkými přebytky vzduchu a vysokými spalovacími teplotami. Vlivem chemických reakcí ve vzduchu vzniká z oxidů dusíku kyselina dusičná, která dále reaguje s tuhými částicemi hořčíku nebo amoniaku. Stejně jako u oxidů síry jsou vzniklé částice odstraňovány z ovzduší vlivem srážek a usazováním. Na zemském povrchu se tyto látky dostávají do půdy a vody, kde při malých koncentracích mohou být prospěšné. Při větším znečištění ovšem působí negativně. Způsobují zvýšený růst vodních rostlin a za následek mají úhyn živočichů a zemědělských plodin [3].

Přízemní ozon (O_3)

Ozon je plynná látka chránící zemský povrch před nepříznivým ultrafialovým zářením, které dopadá ze slunce. Tento ozon je nazýván stratosférický a nachází se ve výšce 20-30 km nad zemským povrchem. Přízemní ozon někdy nazývaný také jako troposférický ozon vzniká přírodní cestou pronikáním ze stratosféry do nižších vrstev. Druhým způsobem vzniku je antropogenní původ, který je spojen především s druhotnými reakcemi v ovzduší. Ozon tímto

způsobem vzniká kombinací slunečního záření, a výskytu oxidů dusíku společně s těkavými organickými látkami (VOC) v ovzduší. Výskyt přízemního ozonu ve vyšších koncentracích je tedy doménou především novodobé historie, jelikož jeho vznik je charakteristický pro místa se silným zatížením automobilní dopravou [3].

Přízemní ozon působí problémy především v letních měsících, protože v této době vzniká nejvíce v důsledku silného slunečního záření a tvoří takzvaný letní smog někdy označován jako smog Los Angeleského typu právě kvůli jeho vzniku v lokalitách s vysokou intenzitou dopravy. Při menších koncentracích má dráždivé účinky na oční spojivky a dýchací cesty. Pokud překračuje denní osmi hodinovou koncentraci nad $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ může způsobovat zánětlivou reakci dýchacích cest a vede ke zvýšené úmrtnosti [5].

Aromatické uhlovodíky

Sloučeniny tří a více benzenových jader nazýváme polycyklické aromatické uhlovodíky. Aromatické uhlovodíky s hlavním představitelem benzo(a)pyrenem vznikají při nedokonalém spalování organických paliv. Pokud probíhá spalování s velkým nedostatkem spalovacího vzduchu v rozmezí teplot $500\text{--}800^\circ\text{C}$ vznikají radikály uhlovodíků a z nich poté aromatické uhlovodíky. Mezi hlavní zdroje aromatických uhlovodíků je řazeno pomalé spalování v domácích topeništích, doprava, koksování uhlí a výroba hliníku [4].

Amoniak (NH_3)

Amoniak je součástí koloběhu dusíku a je vytvářen při rozkládání organických sloučenin. V půdě se amoniak přeměňuje na kyselinu dusičnou, ta je základní surovinou dodávající dusík rostlinám. Toto jsou důvody, proč může být zařazen k nejhodněji využívaným látkám při výrobě hnojiv a následném použití v zemědělství. Na obrázku 1.1 je zřejmé, že amoniak je přibližně z 90 % produkován právě zemědělstvím především při rozkladu zvířecích biologických odpadů a používání již zmíněných hnojiv. V této době nachází další uplatnění také v chladiřnictví, kde nahrazuje více škodlivé freony [3].

Problémy s amoniakem v ovzduší nastávají již při malých koncentracích, kdy způsobuje kašel a podráždění dýchacích cest. Při velkých koncentracích nebo dlouhodobém kontaktu pak může způsobovat záněty kůže, očí a dýchací potíže. Při nadměrném používání v zemědělství může také pronikat do spodních vod a znehodnocovat je [6].

VOC

Zkratka VOC pochází z anglického volatile organic compound, tedy skupina těkavých organických látek. Pod tímto pojmem udává zákon o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb., že: „Těkavou organickou látkou (VOC) jakákoli organická sloučenina nebo směs organických sloučenin, s výjimkou methanu, která při teplotě 20°C má tlak par $0,01 \text{ kPa}$ nebo více nebo má odpovídající těkavost za konkrétních podmínek jejího použití.“

Emise VOC pochází zejména z lokálního vytápění a výrobních procesů bez spalování. Účastní se následně v ovzduší reakcí s oxidy dusíku a dávají vzniknout například přízemnímu ozonu [3].

1.3 Emise, imise a přenos látek v ovzduší

Základními pojmy v oblasti ochrany a kvality ovzduší jsou emise a imise. První zmíněný pojem popisuje znečišťování ovzduší, tedy vnášení nebo vypouštění cizích látek ze zdroje do ovzduší. Emise popisujeme jako hmotnostní toky vypouštěných látek v absolutních hodnotách nebo za časový interval. Imise popisují aktuální stav ovzduší neboli obsah látek, které ovlivňují stav ovzduší. Bývají nejčastěji udávány v $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ppm (partes per milion) a ppb (partes per bilion) neboli jedna miliontina a miliardtina sledovaného celku. Rozdíl v koncentracích látek u emisí a imisí bývá v několika řádech, jelikož mezi jednotlivými stavy probíhá interakce s okolní atmosférou a dochází k promísení se vzduchem [1].

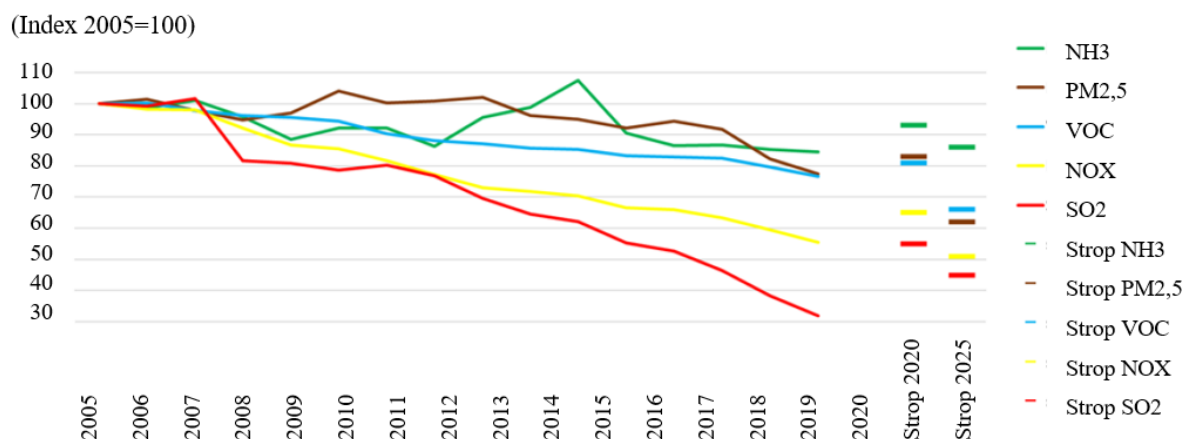
Při této interakci dochází nejenom k přenosu látek, ale také k různým reakcím. Od základních chemických reakcí jako jsou například oxidace a redukce, přes změny skupenství vlivem změn teploty a tlaku až po fotochemické reakce. Souboru těchto změn a přenosu látek v ovzduší říkáme transmise. Většina z výše uvedených dějů se odehrává v troposféře, tedy části atmosféry kolísající mezi 8 až 11 km nad zemským povrchem. V této části se nachází většina atmosférické vlhkosti přispívající k přeměnám látek v ovzduší [1] [7].

1.4 Vývoj znečištění ovzduší

Kvalita ovzduší se ve vyspělých zemích každoročně zlepšuje, především díky zavádění a dodržování emisních stropů, využívání ekologických principů výroby energie nebo zdokonačováním zařízení v dopravě a průmyslu.

Protože se o znečištění ovzduší začala společnost více zajímat na konci minulého století je také největší pokrok při snižování koncentrace znečišťujících látek přisuzován období mezi lety 1990-2000. Od této doby se tato čísla každoročně snižují a tento trend vývoje emisí ukazuje obrázek 1.2, kde jsou také zobrazeny přepočítané emisní stropy dle směrnice Evropského parlamentu a Rady 2016/2284 [2].

Snižování emisí oxidu siřičitého bylo po devastaci lesů vlivem kyselých dešťů v 70. a 80. letech minulého století rapidní. Hlavní podíl na snížení SO_2 mělo zavedení odsiřování u velkých energetických zdrojů. Od té doby Česká republika snížila tento druh znečištění na minimum. Podobný charakter má také snižování emisí oxidů dusíku, které jsou ovlivněny především modernizací vozového parku. U emisí amoniaku a VOC není pokles tak výrazný, to může být způsobeno vlivem zemědělství, kde je nadále využíváno amonných hnojiv [2].



Obrázek 1.2 Vývoj emisí vybraných znečišťujících látek v ČR a emisní stropy pro roky 2020 a 2025 [2]

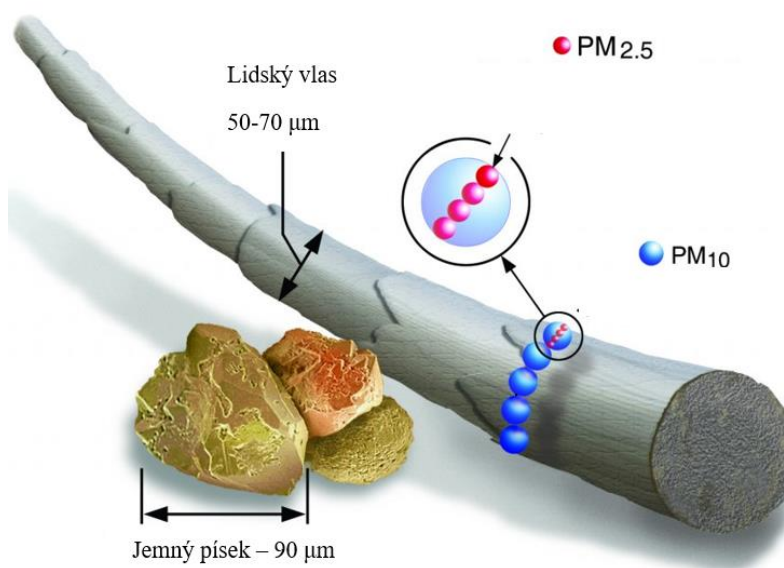
Vývoj suspendovaných částic PM_{10} a $\text{PM}_{2,5}$, které pochází především z lokálních topenišť se také každoročně snižuje. V roce 2019 a 2020 nebyla roční průměrná koncentrace PM_{10} překročena na žádné měřicí stanici. Překročení denní průměrné koncentrace PM_{10} bylo mezi lety 2018 a 2019 sníženo z 31 % stanic na pouhých 5 %. Pokud srovnáme vývoj částic PM_{10} mezi lety 2019 a 2020, došlo ke snížení na pouhých 2 % stanic kde došlo k překročení denních imisních limitů [8] [9]. Tento pokles je výrazný a vypadá velmi pozitivně, ovšem zvyšování cen energií přispívá u mnoha domácností k návratu k tuhým palivům, a proto je velice pravděpodobné že v budoucnu budou tato čísla stagnovat nebo mírně růst.

Částice $\text{PM}_{2,5}$ prošly mezi léty 2019 a 2020 legislativním vývojem v Evropské politice o znečišťování ovzduší. Oproti imisnímu limitu $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, který platil do roku 2019 došlo ke zpřísnění na limitní průměrnou roční koncentraci $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I přes zpřísnění došlo v roce 2020 k překročení imisního limitu pouze na 0,04 % území ČR [9].

Příznivý vývoj u suspendovaných částic je spojen s několika faktory, prvním z nich je obměna kotlů v domácnostech na kotle lepších emisních tříd, a to také díky takzvaným kotlíkovým dotacím. Další faktory jsou spojené s dopravou a velkými energetickými zdroji. U obou případů dochází k postupné modernizaci, v jejímž důsledku dochází ke snižování jak primární tvorby suspendovaných částic, tak sekundární. Tedy snižování oxidů dusíku, jejichž vysoké koncentrace mají za následek také tvorbu tuhých znečišťujících látek.

2 Jemné částice

Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.2 této práce tuhé znečišťující látky mohou být nepochybně zařazeny k hlavním polutantům ovzduší. Jejich vznik je spojen téměř s každou činností, ať už se jedná o působení člověka či přírodních jevů. Tuhé znečišťující látky jsou obecně v literatuře rozdělovány do tří kategorií, hrubé (coarse particles), jemné (fine particles) a ultra jemné částice (ultrafine particles). Toto rozdělení vnímá jako jemné částice tuhé látky s aerodynamickým průměrem do $2,5\text{ }\mu\text{m}$. V kontextu této práce jsou za jemné částice považovány tuhé látky označovány zkratkou PMx. Toto označení pochází z anglického particulate matter neboli tuhá částice, s aerodynamickým průměrem menším nebo rovno $x\text{ }\mu\text{m}$. S ohledem na dopady na zdraví člověka se můžeme setkat s označením PM10, PM2,5 a PM1. Pro představu jsou na obrázku 2.1 srovnány velikosti částic PM10 a PM2,5 s lidským vlasem a zrnkem jemného písku. Je patrné, že tyto částice jsou okem nepozorovatelné.



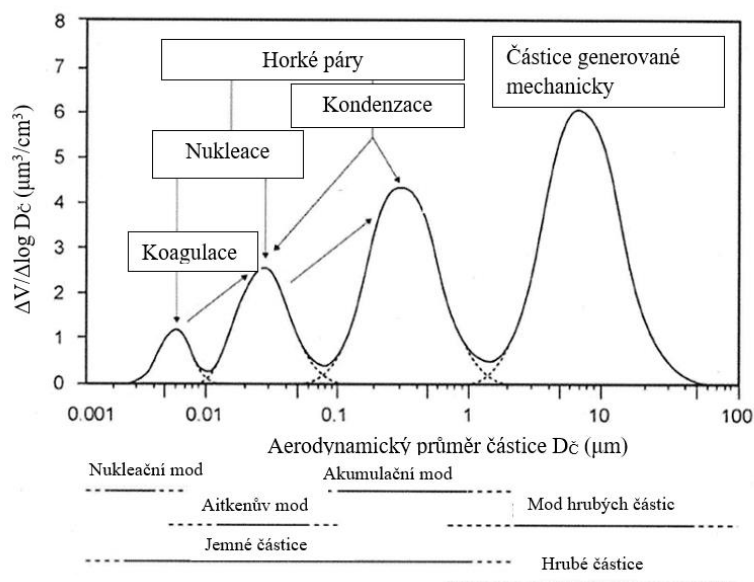
Obrázek 2.1 Srovnání velikosti jemných částic [10]

2.1 Mechanismy vzniku

V atmosféře se mohou nacházet částice různých velikostí a s různými vlastnostmi, které lze přisuzovat především způsobu jakým vznikaly. Všechny částice lze rozdělit až do pěti řádů dle jejich velikosti a v těchto skupinách budou sdílet také stejné vlastnosti. Pouze velikost částic však není pro popis nejvhodnější a pro přesnější určení skupin je vhodné brát v potaz vlastnosti jako počet částic, jejich povrch nebo hmotnost ve zvoleném objemu. Pomocí tohoto rozdělení je dána velikostní distribuce částic, kterou je možné charakterizovat statisticky. Vhodnou charakteristikou pro popsání dané skupiny je pomocí aerodynamického průměru částice, s nejvyšší četností ve vybraném objemu. Toto rozdělení v závislosti právě na aerodynamickém průměru je pak nazýváno jako mod. Na obrázku 2.2 můžeme vidět distribuční křivku objemu suspendovaných částic se zobrazením základních modů a mechanismů vzniku [3].

Nejpočetnější částice jsou PM1 s velikostí do $1\text{ }\mu\text{m}$, které vznikají primárně nukleací. Dále se tyto částice formují vlivem koagulace (shlukování), kondenzací par na povrchu a dalších reakcí. Postupně se takto formují, ovšem nedosáhnou velikostí hrubých částic, protože rychlost reakcí je příliš pomalá. Nejčastěji vznikají jako druhotné produkty při spalování fosilních paliv, například v dopravě. U takto malých částic spočívá problém v jejich snadném přenosu i na velké vzdálenosti. Mají velmi malou hmotnost a pádovou rychlost, proto mohou

v ovzduší přetrvávat v řádech jednotek týdnů. Hrubší částice velikostí PM_{2,5} až PM₁₀ vznikají mechanickým působením, otěrem nebo při rozvření již usazených sedimentů na povrchu. Protože jsou větší dochází u nich poměrně k rychlému usazování a mohou být distribuovány pouze na kratší vzdálenosti jednotek kilometrů [3].



Obrázek 2.2 Distribuční křivka objemu suspendovaných částic a rozložení módů [3]

2.2 Rozdělení a tvar jemných částic

Do skupiny jemných částic lze zařadit více pojmů jako, prach, popílek, aerosol a dým. Prachem se rozumí směs plynu a částic, které vznikají mechanicky. Do této skupiny řadíme částice, jež se do plynu (vzduchu) dostaly mletím, drcením a například také abrazí. Pokud částice vzniknout spalovacím procesem jsou označovány jako popílek [11].

Pojem aerosol nemusí být vždy úplně jasný a zahrnuje jak pevné látky, tak kapalnou fázi. Hlavním kritériem pro označení aerosol je schopnost dlouhého setrvání ve vzduchu, proto bývají tyto částice obecně do velikosti 1 μm. Pojem aerosol tedy neuvádí princip vzniku, ale pouze velikost daných částic. Může ovšem vznikat jak rozmělněním, v tom případě je označován jako disperzní, tak reakcemi v ovzduší či kondenzací, poté je označován jako kondenzační. Dým označuje opět částice tuhé i kapalně fáze, s tím rozdílem, že za jejich vznikem stojí pouze kondenzace par [11].

Výše uvedené rozdělení je spojeno také s tvarem částic. Kulového tvaru nabývají částice vzniklé při kondenzaci či krystalizaci. Tímto způsobem mohou vznikat například produkty spalování. U nepravidelných tvarů stojí za vznikem mechanická činnost, tento druh můžeme pozorovat u jemného prachu vzniklého již dříve zmíněným mletím či abrazí. Další častý způsob vzniku nepravidelných tvarů je shlukování neboli koagulace menších částic [3].

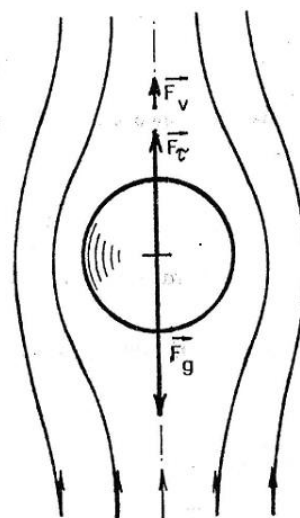
Tři základní druhy tvaru částic jsou izometrické (korpuskulární), laminární (ploché) a fibrilární (vláknité). U prvně zmíněného tvaru jsou si rozměry ve třech na sebe kolmých osách téměř rovny a tento tvar je přisuzován částicím vzniklým primárně, tedy bez dalšího shlukování. Zbylé dva druhy někdy také označované jako neizometrické nemají všechny rozměry podobné a jejich chování je v prostoru vzhledem k okolnímu prostředí méně předvídatelné. Laminární částice mají dva rozměry výrazně odlišné od třetího. U fibrilárních částic je jeden rozměr výrazně větší než zbývající [11].

2.3 Pádová rychlost

S rostoucími rozměry částic roste také jejich hmotnost a tím pádem velikost gravitační síly, která na ně působí. Vzniklá rovnováha sil, tedy síla buzená tíhovým zrychlením (F_g), třecí (F_τ) a vztlaková síla (F_v) má za následek vznik výsledné síly a pádové rychlosti, tedy rychlosti, jakou dochází k usazování částic na povrch. Síly působící na částici jsou znázorněny na obrázku 2.3. U velmi malých částic je tíhová síla oproti ostatním zanedbatelná. Jestli dojde u částice ke vzniku pádové rychlosti nebo ne záleží také na faktu, zda je její velikost větší než střední volná dráha molekul [11].

Střední volná dráha molekul definuje průměrnou vzdálenost, jakou molekula urazí mezi dvěma srážkami. Pokud je tedy částice větší, než střední volná dráha molekul její pádová rychlost se řídí Stokesovým vztahem, rovnice 2.1. Výsledkem je rychlost, kterou se částice pohybuje v klidném plynném prostředí [11].

U částic do velikosti přibližně $0,1 \mu\text{m}$ kdy se jejich velikost přibližuje k velikosti střední volné dráhy molekul se uplatňuje takzvaný Brownův pohyb. Jedná se o náhodný pohyb částic způsobený přenosem energie a hybnosti [1].



Obrázek 2.3 Síly působící na částici v ustáleném prostředí [11]

$$w_s = \frac{(\rho_\varepsilon - \rho)gD_\varepsilon^2}{18\eta} \quad (2.1)$$

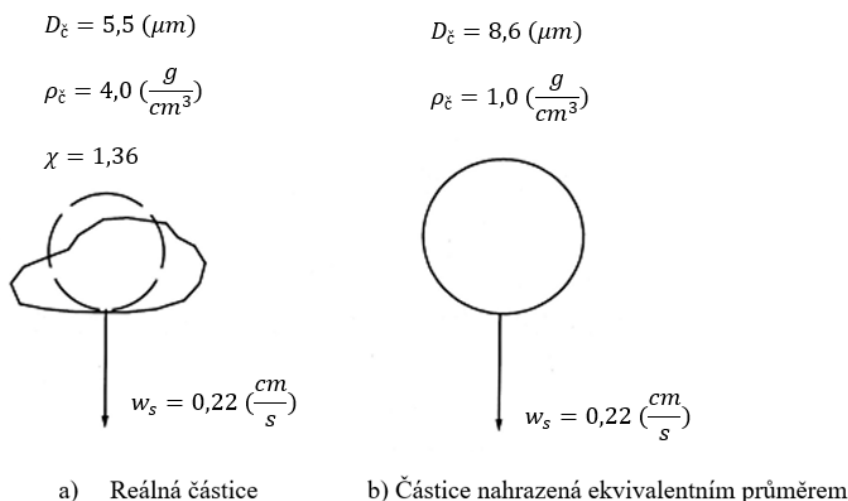
Kde

w_s	pádová rychlost	(m/s)
ρ	hustota vzduchu	(kg/m ³)
ρ_ε	hustota částice	(kg/m ³)
g	tíhové zrychlení	(m/s ²)
D_ε	průměr částice	(m)
η	dynamická viskozita vzduchu	(Pa·s)
χ	dynamický tvarový faktor	(-)

2.4 Ekvivalentní průměr částice

Jak již bylo zmíněno tvar částic není vždy ideální a může v různých směrech nabývat velkých rozdílů. Tvar, a tedy aerodynamické vlastnosti jsou pro návrh odlučovačů jako je například virtuální impaktor klíčové. Uvažovat při výpočtech nepravidelné tvary částic není vhodné, proto se pro výpočty odlučovačů částic užívá pojem ekvivalentní průměr (velikost) částice. V anglické literatuře se stejný pojem označuje jako aerodynamic diameter, tedy aerodynamický průměr částice. Technik pro určení tohoto rozměru je několik, vycházejících například z velikosti průmětu, povrchu či objemu částice [11].

V případě výpočtů v této práci je použit princip zjištění ekvivalentní velikosti částice dle pádové rychlosti, obrázek 2.4. Jedná se o nahrazení částice o nepravidelném rozměru o dané hustotě, za částici s jednotkovou hustotou 1000 kg/m^3 , stejnou pádovou rychlostí jako původní částice a kulovým tvarem o daném průměru [12].



Obrázek 2.4 Nahrazení částice za částici s ekvivalentním průměrem [12]

2.5 Působení jemných částic na lidské zdraví

Výše v této kapitole byly popsány některé vlastnosti jemných částic, především tvar, velikost a způsob vzniku od něhož se odvíjí chemické složení. Tato specifika jsou určující také pro dopad na člověka a jeho zdraví. Pevné částice mohou pronikat do lidského těla především dýchacím traktem. Zde je velikost a tvar vdechovaných částic hlavním ukazatelem toho, jaké dopady mohou mít. Největší částice jsou zachyceny v horních cestách dýchacích a následně z těla vyloučeny v podobě hlenu, neměly by představovat pro organismus větší rizika. Částice PM10 mohou dýchacími cestami doputovat až do dolních cest dýchacích. Jemné částice PM2,5 se dostávají do průdušinek a frakce PM1 do plicních sklípků odkud mohou být dopraveny krví do celého těla, kde největší riziko spočívá v mozku a srdci [5].

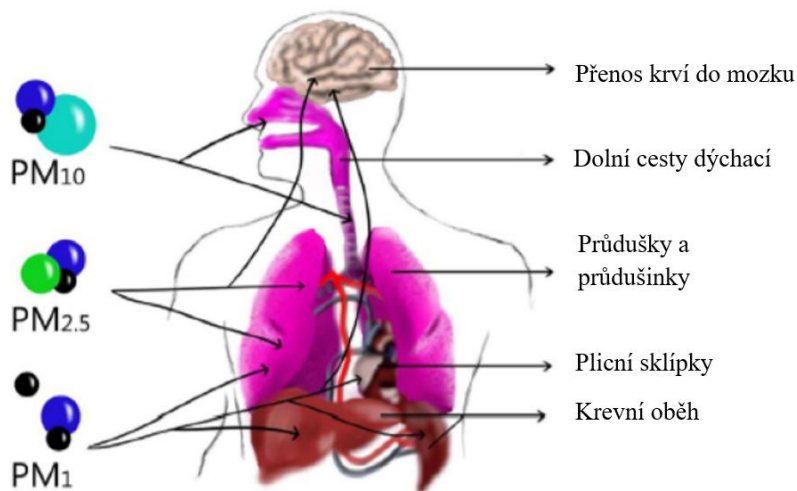
Velikostní frakce, které mohou mít dopad na lidské zdraví a jejich měření popisuje norma. S ohledem na zachycení v lidském dýchacím traktu je touto normou rozlišováno 5 frakcí tuhých látek, a to. Vdechovatelná frakce, zde jsou zařazeny hmotnosti zlomky aerosolových částic, které se do lidského těla mohou dostat nosem či ústy. V extrathorakální frakci jsou obsaženy částice, které neproniknou lidským tělem dále než do hrtanu. Naopak thorakální frakce obsahuje částice pronikající za hrtan. U zbývajících dvou, tedy tracheobronchiální a respirabilní frakce jsou aerosoly vdechnuty rovněž za hrtan. Rozdíl v nich spočívá v tom, že v místě proniknutí respirabilní frakce se již na dýchacích cestách nenachází takzvaný řasinkový epitel [13].

V závislosti na tom, jak hluboko do lidského těla se částice dostanou závisí také druh onemocnění, jaké mohou působit. Mezi respirační onemocnění mohou patřit podráždění sliznic dýchacích cest a změna struktury řasinkové tkáně, které následně vedou ke vzniku infekcí a chronických onemocnění. Mají velmi negativní vliv na srdce a cévní ústrojí a mohou vést k akutní srdeční příhodě. V roce 2013 byly částice PMx zařazeny Mezinárodní Agenturou pro výzkum rakoviny mezi prokázané lidské karcinogeny [5].

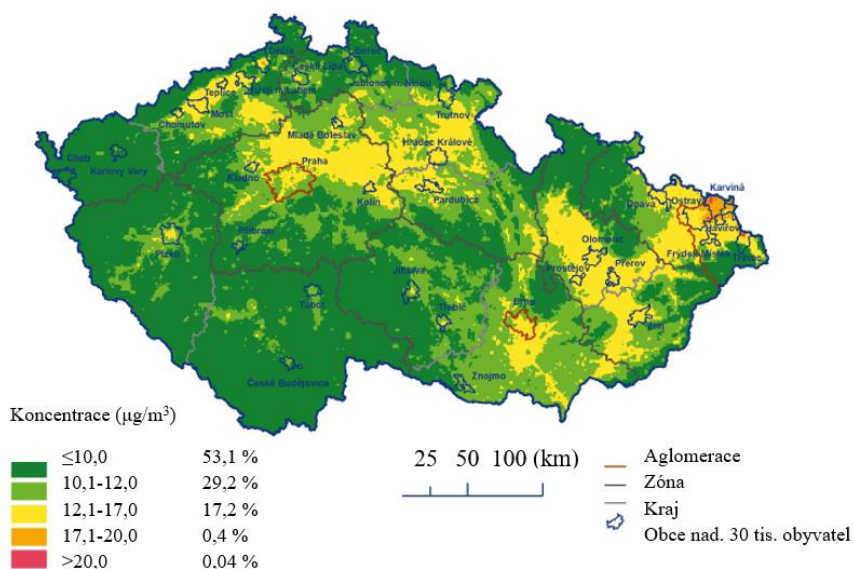
Světová zdravotnická organizace (WHO) v roce 2021 vydala doporučení pro koncentraci tuhých částic, které by neměly představovat nebezpečí pro lidský organismus. Následující hodnoty jsou však pouze teoretické a již bylo dokázáno, že částice PM2,5 mohou u citlivějších osob být nebezpečné již při hodnotách $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Částice PM10 by neměly představovat větší riziko při průměrných roční/denní koncentracích $15/45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. U částic PM2,5 je tato hodnota pro průměrnou roční/denní koncentraci $5/15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [14].

Tyto hodnoty je možné srovnat se stavem ovzduší v České republice v roce 2020, který je zobrazen na obrázku 2.6 v podobě mapy průměrné roční koncentrace částic PM2,5. Zde je

patrné, že necelých 20 % celého území České republiky bylo vystaveno nebezpečným koncentracím po delší dobu daného roku. Překročení koncentrace $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ v jednotkách případů však proběhlo na 99 % (80 z 81) měřících stanic [5].



Obrázek 2.5 Přenos jemných částic v lidském těle [14]



Obrázek 2.6 Průměrné roční koncentrace částic $\text{PM}_{2,5}$, 2020 [9]

Používanými ukazateli škodlivosti látek jsou hodnoty předčasné úmrtnosti a ztracených let života. Vztáhneme-li tyto faktory na tuhé částice například v již zmíněném roce 2020 získáme, že navýšení předčasného úmrtí dojde v rozmezí 0 – 8,25 %, přičemž vyšší hodnoty jsou pro velká města a průmyslové oblasti. Data o druhém zmíněném faktoru, tedy ztracených letech života byly v době psaní této práce dostupné pouze pro rok 2019. Z těchto dat vyplývá, že průměrný člověk žijící v České republice starší 30 let ztratil v tomto roce vlivem tuhých znečišťujících látek v ovzduší 2,9 dne života [5].

2.6 Legislativa v otázce jemných částic v ovzduší

Otázka ochrany ovzduší byla do mezinárodní legislativy zahrnuta v roce 1979 v podobě Úmluvy Evropské hospodářské komise Organizace spojených národů o dálkovém přeshraničním znečišťování ovzduší (CLRTAP). Ta popisuje vztahy a povinnosti zahrnutých států v oblasti znečišťování ovzduší a přenosu těchto látek. Tato úmluva byla v následujících letech doplněna osmi protokoly, které se vyjadřovaly blíže k problémům znečišťování. Posledním z nich byl takzvaný Göteborgský protokol (1999), na jehož základě byl například upraven Zákon o ochraně ovzduší č. 86/2002 Sb. o nařízení vlády č. 351/2002 Sb., které formulovalo závazné emisní stropy pro některé znečišťující látky. Významnou změnou v otázce znečištění tuhými látkami byla revize právě Göteborgského protokolu v roce 2012. Tato revize řadí mezi znečišťující látky také částice PM_{2,5}. Jelikož se toto promítlo do Evropské politiky byla v tomto roce vydána v České republice revize Zákona o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. [3].

Tento zákon podléhá předpisům Evropské unie a je složen ze tří vyhlášek, z nichž dvě se týkají problematiky jemných částic. První z nich popisuje způsoby vyhodnocení a posuzování imisních limitů a to vyhláška č. 330/2012 Sb., ta byla nahrazena v roce 2020 vyhláškou č. 68/2020 Sb. Druhou je vyhláška č. 415/2012 Sb., která udává přípustné emisní limity. I ta byla již nahrazena vyhláškou č. 216/2019 Sb.

2.6.1 Imisní limity

Imisní limit představuje mezní hodnotu znečištění ovzduší, která je dána legislativou dle Zákona o ochraně ovzduší č. 201/2012 Sb. Jedná se o hmotnostní koncentraci dané látky obsažené v jednom krychlovém metru vzduchu za normálních podmínek. Posuzování imisního limitu je prováděno dle tří kritérií. První z nich je již zmíněná koncentrace, dalším je doba průměrování, tedy časový úsek, který uvažujeme při výpočtu průměrné hodnoty. Posledním kritériem je počet překročení v daném časovém intervalu. Zákon udává imisní limity pro ochranu zdraví lidí, ekosystémů a vegetace. V neposlední řadě se zaměřuje na lokality, v jakých je nutné provádět měření [15]. Výběr hodnot imisních limitů TZL viz tabulka 2.1 níže.

Tabulka 2.1 Imisní limit TZL pro ochranu zdraví lidí [15]

Znečišťující látka	Doba průměrování	Limit (µg/m ³)	Max. počet překročení
PM ₁₀	24 hodin	50	35
PM ₁₀	1 kalendářní rok	40	0
PM _{2,5}	1 kalendářní rok	20	0

2.6.2 Emisní limity

Emisní limit udává limitní množství znečišťování ovzduší určitým zdrojem. Základní rozdělení emisních limitů je dle vyhlášky č. 415/2012 Sb. na obecné a specifické emisní limity. Hodnota emisních limitů je obdobně jako u imisních limitů udávána pomocí hmotnostní koncentrace dané znečišťující látky na metr krychlový za normálních podmínek. Obecné emisní limity jsou rozděleny dle znečišťující látky a jsou uvedeny v příloze 9. vyhlášky č. 415/2012 Sb. Specifické rozdělení emisních limitů je provedeno dle jednotlivých stacionárních zdrojů do 11 základních oblastí viz tabulka 2.3, které se dále dělí podrobněji dle výkonu, použitého paliva, výrobní technologie a dalších [15] [16].

Tabulka 2.2 Obecné emisní limity pro TZL [16]

Název znečišťující látky	Hmotnostní tok (g/h)	Hmotnostní koncentrace (mg/m ³)
Tuhé znečišťující látky	≤2 500	200
	>2 500	150

Tabulka 2.3 Oblasti rozdělení stacionárních zdrojů [15]

1	Energetika – spalování paliv
2	Tepelné zpracování odpadu, nakládání s odpady a odpadními vodami
3	Energetika – ostatní
4	Výroba a zpracování kovů a plastů
5	Zpracování nerostných surovin
6	Chemický průmysl
7	Potravinářský, dřezpracující a ostatní průmysl
8	Chovy hospodářských zvířat
9	Použití organických rozpouštědel
10	Nakládání s benzinem
11	Ostatní zdroje

3 Technologie odlučování jemných částic v laboratorních podmínkách

Způsobů, kterými jsme schopni odstraňovat jemné částice z nosného plynu je mnoho. V zásadě u každého z nich dochází k odloučení tehdy, pokud dojde ke kontaktu částice s odlučovací plochou. Může to být styk s pevnou stěnou, s tekutinou či s jinou již odloučenou částicí. U odlučovacích zařízení dochází velmi často ke kombinaci jednotlivých principů, obecně však můžeme technologie odlučování tuhých látek rozdělit do těchto skupin [11]:

- Filtry
- Elektrické odlučovače
- Mokré mechanické odlučovače
- Suché mechanické odlučovače

Technologií, které se skrývají pod tímto rozdělením je nespočet a drtivá většina z nich se využívá spíše v průmyslu a velké energetice například při odprašování spalin. Tato kapitola nemá za cíl představovat tyto technologie, nýbrž se zaměřuje na shrnutí vybraných způsobů zachytu tuhých částic, kterých je využíváno v laboratořích.

3.1 Filtry

Filtry jsou zařízení, na kterých dochází k odloučení v porézní vrstvě. Základní principy zachytu částic na filtru jsou setrvačnost, difuze a intercepce. U filtrů stejně jako u mechanických odlučovačů dochází k usazování částic vlivem setrvačnosti. Tohoto jevu se využívá především u větších částic, které nejsou schopny udržovat stejný směr proudění jako plyn a při změně směru během obtékání dojde k jejich nárazu a zaklínění mezi elementy filtru. Pro lepší usazování vlivem setrvačnosti jsou tedy vhodné velké rychlosti proudění a velké částice. Naopak je tomu u principu difuze, kdy pro lepší zachyt je vhodná malá rychlost proudění a malé částice do 0,1 μm . Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3 u takto malých částic dochází k převýšení Browanova pohybu nad ostatními vlivy. Ten má za následek kontakt částice s filtrem a usazení. Třetím principem je intercepce, někdy označována také jako přímé zachycení, kdy dostatečně malá částice s malou setrvačností pohybující se v okolí vlákna filtru se zachytí při kontaktu s ním. Přičemž k zachycení může dojít i při podélném obtékání [11].

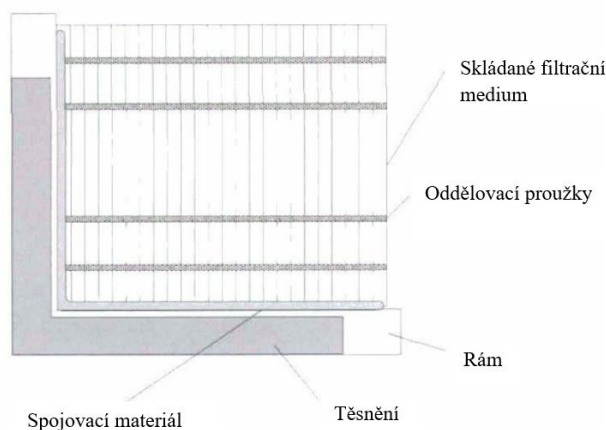
Filtry lze rozdělit podle použití na průmyslové a filtry atmosférického vzduchu. Průmyslové filtry jsou aplikovány tam, kde jsou vysoké koncentrace částic v nosném plynu a dochází u nich tedy k většímu zanášení a vytváření takzvaného filtračního koláče, který je nutné po určitém čase odstranit mechanicky nebo regenerací filtrační vrstvy. V laboratorních podmínkách jsou využívány spíše filtry atmosférického vzduchu s jemnější porézní vrstvou, u kterých se obvykle regenerace neprovádí. Materiály filtrů mohou představovat širokou škálu závislou na dané aplikaci a velikosti odlučovaných částic. Použity mohou být sypké materiály, porézní hmoty, textilie nebo také vrstvy z mikrovlákn [11].

Speciální skupinu filtrů používaných pro nejúčinnější separaci jemných částic tvoří filtry EPA (efficiency particulate air – účinný filtr vzduchu pro odlučování částic), HEPA (high efficiency particulate air – vysoce účinný filtr vzduchu pro odlučování částic) a ULPA filtry (ultra low particulate air – filtr vzduchu s velmi nízkým průnikem). Tyto filtry jsou využívány v nejnáročnějších aplikacích, jako poslední stupně u vzduchotechniky nebo ve farmaceutickém průmyslu, kde čistota prostředí je zásadním faktorem. Standardizací a rozdělení filtrů dle účinnosti provádí norma ČSN EN 1822-1. Dle této normy jsou filtry rozděleny do tříd E, H, U a následně do jednotlivých podtříd dle účinnosti odloučení částic. Toto rozdělení ukazuje tabulka 3.1 v podobě výběru z již zmíněné normy [17].

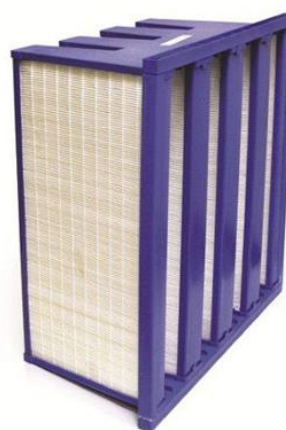
Tabulka 3.1 Rozdělení EPA, HEPA a ULPA filtrů [17]

Třída filtru	Celková hodnota Účinnost (%)	Lokální hodnota Účinnost (%)
E10	≥ 85	-
E11	≥ 95	-
E12	$\geq 99,5$	-
H13	$\geq 99,95$	$\geq 99,75$
H14	$\geq 99,995$	$\geq 99,975$
U15	$\geq 99,9995$	$\geq 99,9975$
U16	$\geq 99,99995$	$\geq 99,99975$
U17	$\geq 99,999995$	$\geq 99,999975$

Filtr se skládá z několika základních prvků. Prvním z nich je rám, který je určen pro uchycení filtrační vložky, popřípadě těsnění a dále slouží jako příruba pro spojení s ostatními prvky. Obvykle bývá vyroben z materiálů odolných vůči korozi, například nerezových ocelí, hliníkových slitin nebo plastů. Filtrační vložka bývá zpravidla vytvořena ze skelných nebo keramických vláken o průměru do 1 μm . Ve speciálních aplikacích se mohou objevit také polymerní materiály. Takto vyrobená vložka má tloušťku v řádech desetin milimetru. Aby se zvýšil filtrační efekt musí být jednotlivé vložky v těsné blízkosti u sebe, toho může být docíleno pomocí hliníkových oddělovacích proužků nebo pomocí takzvaného minipleat designu viz obrázek 3.1. V tomto provedení jsou hliníkové proužky nahrazeny oddělovači vyrobenými z lepidla nebo ze stejného materiálu jako filtrační vložka. Pro dokonalé těsnění je filtrační vložka s rámem spojena pomocí různých druhů lepidel, silikonu nebo epoxidu. Z důvodu vysoké tlakové ztráty má filtrované medium tendenci spíše obtékat filtrační vložku než procházet skrz ni, proto je využito gelové těsnění, které tomuto obtékání zabraňuje [18].



Obrázek 3.1 Filtr s využitím minipleat designu [18]



Obrázek 3.2 HEPA/ULPA filtr [19]

3.2 Elektrický odlučovač

Zařízení, která pracují na velmi odlišném fyzikálním principu, než ostatní druhy odlučovačů jsou elektrické odlučovače. Zachycení nečistot probíhá rovněž usazením při styku s plochou odlučovače nebo již odloučenou částicí, ovšem mechanismus, kterým je částice hnána proti této ploše je vyvolán elektrickým polem. V elektrických odlučovačích vzniká pole od tří různých zdrojů. Elektrické pole vzniká rozdílem potenciálu elektrod, mezi nabitými částicemi a od náboje iontů. Částice o daném náboji nacházející se mezi elektrodami v poli o elektrické intenzitě je ke stěně přitahována Coulombovou silou, která působí kolmo na směr proudění. Takto vzniklá rovnováha sil dává za vznik usazovací rychlosti. Podobně tomu bylo u dříve zmíněné pádové

rychlosti, která působí na částici ve volném prostředí. Usazené částice tvoří na elektrodách nánosy, které je nutné po čase odstranit oklepáním. Elektrické odlučovače se vyznačují velmi nízkou tlakovou ztrátou a schopností separovat i velmi jemné frakce. Výhodou je možnost velkých objemových průtoků znečištěného plynu, a proto jsou tato zařízení v dnešní době využívána spíše ve velké energetice [11].

3.3 Mokrý mechanický odlučovač

Jak již napovídá název u mokrých mechanických odlučovačů je k separaci tuhých látek využíváno kapalné medium v kombinaci s mechanickým prvkem. Podobně jako u suchých odlučovačů jsou základními principy, na kterých tato zařízení pracují setrvačnost a působení odstředivé síly. Částice, která vstoupí do odlučovače je vlivem jedné z těchto složek nebo jejich kombinací přivedena ke kapalnému médiu a zde dochází k odloučení. V zásadě existují čtyři možnosti, jak k tomu může dojít. Je to kontakt částice s kapičkami rozptýlenými v určitém objemu, náraz částice na smáčený povrch při obtékání plynu kolem něj, dalším způsobem je odloučení při styku s hladinou a poslední z možných způsobů představuje usazení či zachycení částic na zpěněné kapalině. Ze zmíněných možností pak vychází praktické využití v podobě sprchových, vírových, proudových, hladinových a pěnových odlučovačů [11].

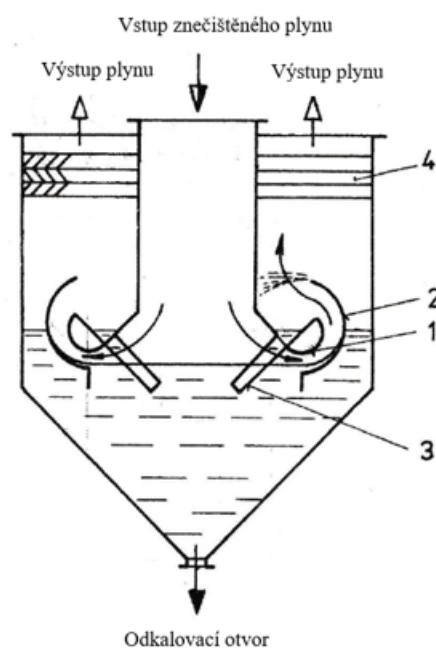
Výhodami při využití mokrých odlučovačů je možnost separace abrazivních částic, možnost odloučení i velmi jemných frakcí a vysokých koncentrací. Mezi nevýhody je možné zařadit vznik odparu pracovního média při separaci z plynů o vyšších teplotách, dále vznik kalů a s nimi spojená nutnost odpadového hospodářství. Hlavními nevýhodami jsou poměrně vysoká spotřeba pracovního média (nejčastěji vody), ochlazení plynu na poměrně nízké teploty a v poslední řadě vznik koroze [11].

Jak již bylo zmíněno nemá tato kapitola za cíl představit všechny technologie, a proto bude pohled dále upřen pouze na jednu z nich, a to hladinový odlučovač. U ostatních technologií vzniká řada problémů, ať už se jedná o horší odlučivost částic, velkou spotřebu vody nebo o nutné rozsáhlé odpadové hospodářství, které je pro použití v laboratorních podmínkách limitující.

3.3.1 Hladinový odlučovač

U odlučovačů jako je právě hladinový odlučovač nebo jemu velmi podobný mokrý kaskádový odlučovač dochází při odlučování ke kombinaci styku částic s hladinou, se stěnou a v poslední řadě i vodní mlhou. Znečištěný plyn vstupuje do odlučovače v prostředí části, kde je tryskou urychlen a prochází úzkým otvorem mezi naváděcími lopatkami (1) a hladinou. Část tuhých látek je odloučena již v tomto místě impakcí, tedy usazením na hladině vlivem setrvačných sil. Zatím neodloučené částice putují dále a spolu s nosným plynem unášejí kapičky vody.

Jakmile tato směs doputuje na hranu usměrňovacích lopatek (2) dochází k rozstříku a vytvoření jakési vodní sprchy. Částice, u kterých nedošlo k odloučení na hladině ani na plochách lopatek jsou nyní separovány právě zde při nárazu na rozptýlené kapičky vody. Všechny nečistoty, které se



- 1 – Naváděcí lopatky
- 2 – Usměrňovací lopatky
- 3 – Odtokový kanál
- 4 – Odlučovač kapiček

Obrázek 3.3 Hladinový odlučovač
[11]

podářilo odloučit stékají po stěnách kanálu (3) a následně sedimentují na dně nádoby. Tohoto jevu je s výhodou využíváno, jelikož částice zde usazené není nutné dále filtrovat s využitím odpadového hospodářství. Čištění takového zařízení je prováděno pouze odstraněním usazených nánosů ve spodní části. Plyn zbavený nečistot putuje dále přes odlučovač kapiček (4). Ten může mít podobu žaluziového odlučovače nebo bludiště tvořeného sadou ploch s nesouběžnými otvory. Tento typ odlučovače dokáže separovat frakce do 1 μm [11].

3.4 Suché mechanické odlučovače

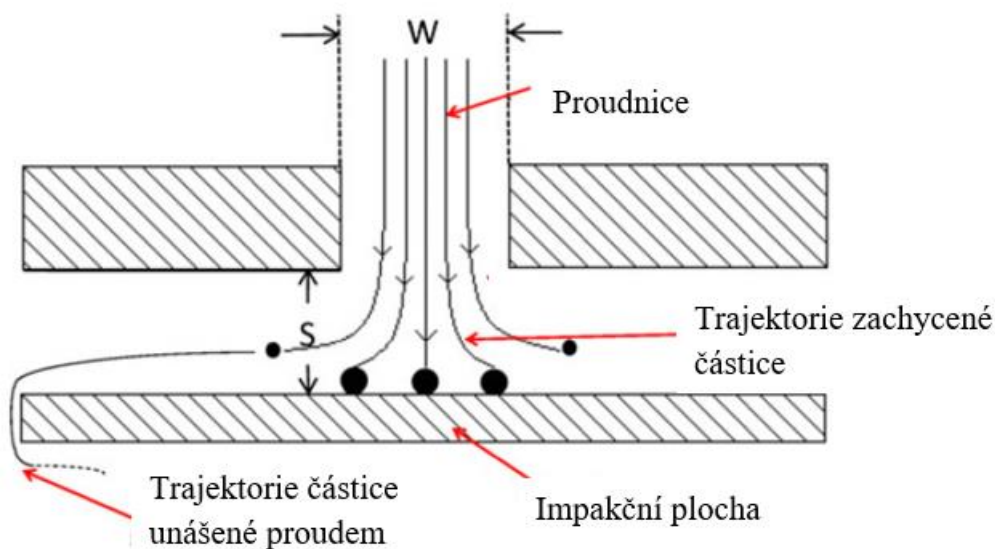
Jedním ze základních rozdělení zařízení určených k separaci částic jsou suché mechanické odlučovače. Do této kategorie se řadí zařízení, u nichž dochází k odloučení z pravidla při styku s pevnou stěnou vlivem dříve zmíněných setrvačných, gravitačních, odstředivých účinků či jejich kombinací. Stejně jako tomu bylo u jiných zařízení i tyto odlučovače jsou hojně využívány k odprašování zejména spalín. Nejznámější a nejpoužívanější z nich jsou cyklony dále různé druhy prašníků a odlučovačů využívající žaluziových či lamelových přepážek [11].

Jelikož je tato práce věnována návrhu virtuálního impaktoru bude metodě zachytu jemných částic změnou směru proudu věnována samostatná následující kapitola s názvem Impakce.

4 Impakce

Impaktor a metoda impakce rozhodně není vynález posledních let, avšak jeho historie sahá do druhé poloviny 19. století. Tehdejší impaktory byly využívány při zkoumání chorob a jejich primárním účelem bylo umožnit zachycení menších částic k následnému zkoumání pod mikroskopem. V průběhu následujících let došlo k jejich zdokonalení a první kaskádový impaktor, který by se dal považovat za podobný těm používaným v současnosti sestavil pan Ken May roku 1945. Ve druhé polovině 20. století především díky rozvoji výpočetní techniky došlo v tomto oboru k ohromnému vývoji a vytvoření nespočtu modifikací, které umožnily, aby se impaktory dostaly na dnešní úroveň. Nejpreciznější zařízení dokážou v současnosti separovat částice až do velikosti pouhých setin mikrometru [20].

V anglickém jazyce bývají zařízení pracující na principu impakce označovány jako inertial impactors tedy v doslovném překladu setrvačné impaktory. Z toho lze snadno odvodit, že mechanismem pohánějícím záchyt částic je setrvačnost. Pokud je částice unášena plynem a ten změni směr proudění dochází k působení setrvačných sil, které mají snahu udržet částici v původním směru a sil od proudu vzduchu, které strhávají tuto částici spolu s nosným plynem. Na částice mohou působit i jiné vlivy, jako například pádová rychlost, která byla v této práci popsána již dříve nebo odstředivá síla. Tyto složky jsou zde minoritní, jelikož předpokládáme že zařízení je v klidu a nerotuje a síla kterou proud strhává částice je mnohem větší než síla gravitační. U velmi malých částí pak přichází v úvahu Brownův pohyb. Ten je však potřebné v úvahu brát pouze u částic o velikosti menší než $1\text{ }\mu\text{m}$ [21].



Obrázek 4.1 Princip impakce [22]

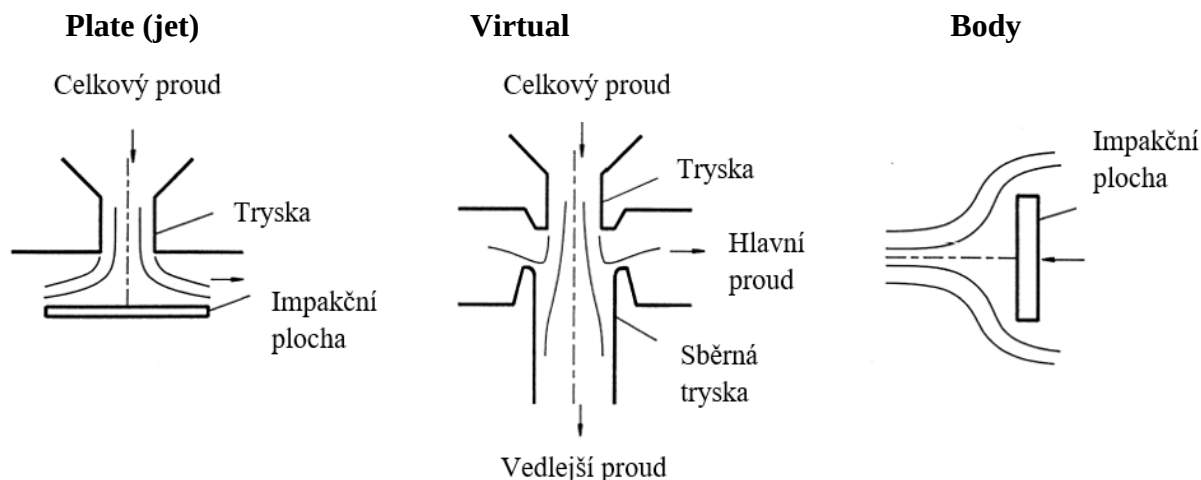
Na obrázku výše je schematicky zobrazen detail jednostupňového impaktoru. Na tomto schématu můžeme snadno pozorovat chování částic, které vstupují skrze trysku impaktoru. Příliš velké a hmotné částice mají příliš velkou hybnost a nejsou schopny dále následovat proud nosného plynu. U těchto částic nastává náraz do impakční plochy a jejich zachycení. Malé částice po průchodu tryskou pouze zakříví svoji trajektorii a jsou dále unášeny proudem. Tento poměrně jednoduchý princip je důvodem, proč jsou impaktory hojně využívány [21].

V kapitole 2.4 byla popsána základní vlastnost částic, a to aerodynamický průměr částice. Tato vlastnost je nyní určující pro to, jaká frakce má být v impaktoru zachycena. Pokud by odloučení probíhalo ideálně dojde na impakční ploše k záchytu všech částic o požadovaném aerodynamickém průměru a větším. Všechny částice menší, než je tento rozměr by pokračovaly v proudu dál. Toto ovšem není možné a reálně jsou impaktory navrhovány tak, že pro danou

frakci dojde k odloučení 50 % všech požadovaných částic této frakce. Pro zvýšení účinnosti se proto v praxi využívají zařízení, kde je více než jeden impakční stupeň [23].

4.1 Rozdělení impaktorů dle mechanismu zachytu částic

Variací tvarů a provedení impaktorů je možné v literatuře najít nespočet, všechny tyto varianty je obecně možné rozdělit do tří základních skupin, které můžeme vidět na obrázku 4.2. Na první a nejvíce využívané skupině byl již dříve demonstrován i princip impakce. Tato skupina je v anglické literatuře označována jako plate a někdy také jet impaktor. Jedná se o uspořádání, kdy nosný plyn je urychlen tryskou a k separaci částic dochází na pevné impakční ploše. Nevýhodami plate impaktorů je odraz či strhávání již zachycených částic. Proto se na impakční plochy používají různé druhy materiálů či povlaků, které zvyšují přilnavost částic. Díky tomu je dosahováno vyšších účinností separace. Druhé provedení impaktoru nazývané virtual impaktor bylo středem pozornosti v praktické části této práce a blíže bude představeno později. Posledním a také nejméně prakticky využívaným řešením je body impaktor. V tomto provedení není impakční plocha stacionární nýbrž se pohybuje proti směru proudění nosného plynu. Efekt, ke kterému poté dochází je podobný jako u plate impaktoru a změnou směru proudícího média dochází opět k ulpění částic na impakční ploše. Pro představu je možné tento typ přirovnat k jízdě autem v zimním období, když sněží. Vločky, které jsou dostatečně malé oběhnou čelní sklo. Ovšem velké a těžké vločky nedokážou následovat vzduch rozrážený automobilem, a tak dojde k impakci, tedy v tomto případě nárazu do čelního skla [20].



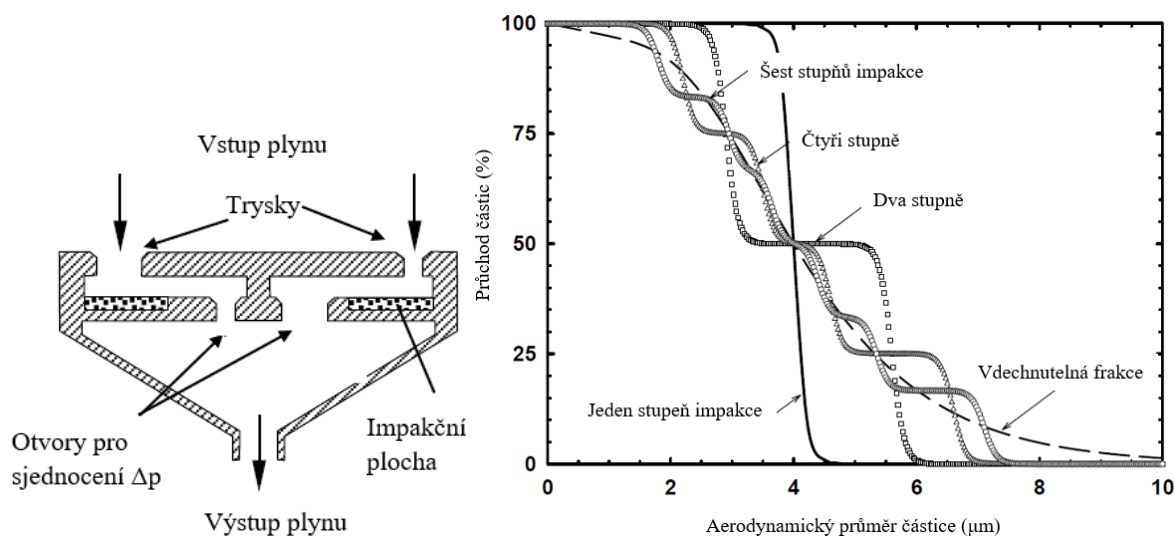
Obrázek 4.2 Druhy impaktorů [20]

4.2 Paralelní impaktor

Obdobně jako v elektrickém obvodu jednotlivé prvky je možné v impaktoru sestavit trysky v paralelním nebo sériovém seskupení. Na obrázku 4.3 můžeme pozorovat paralelní zapojení se dvěma tryskami. U tohoto provedení je vstupní proud společný a následuje rozdělení do dvou proudů. Trysky mají rozdílné rozměry, a proto v každé z nich dojde k separaci rozdílných frakcí. Princip je zde totožný s plate impaktorem, a separované částice jsou zachyceny na impakční ploše. Proud dále postupuje přes otvory, které jsou opět rozměrově odlišné. Jejich účelem je sjednocení tlakových ztrát vznikajících na tryskách. Za těmito otvory dochází ke smíšení proudů [24].

Hlavní myšlenkou, která se skrývá za tímto uskupením je jinak nevhodný ostrý tvar účinností křivky u jednostupňového impaktoru (viz obrázek 4.4). Pokud se totiž chceme přiblížit například křivce zobrazující vdechovatelné částice, dojde při použití jednoho stupně impakce k jejímu protnutí pouze jednou. Pokud je však využito více stupňů sestavených paralelně dojde

k přibližnému kopírování této křivky. Je to způsobeno jednotlivými schopnosti odloučit určitou frakci, které se za impaktorem spojí v jeden celek [24].



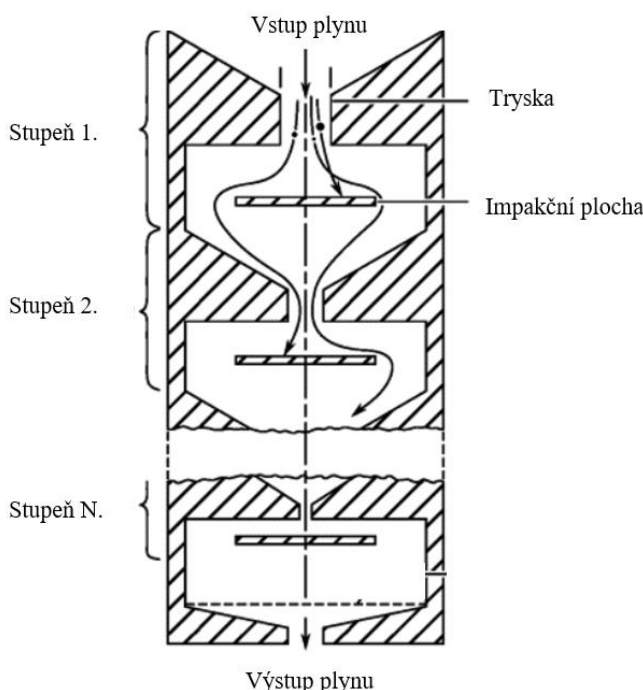
Obrázek 4.3 Dvoustupeňový paralelní impaktor [24]

Obrázek 4.4 Křivky účinnosti separace [24]

4.3 Kaskádový impaktor

Označení kaskádový impaktor je více používaným pojmem, pro zařízení, kde jednotlivé impakční plochy jsou sestaveny v sérii za sebou. Tento typ je možné vidět v řezu na obrázku 4.5. Oproti paralelnímu typu mají na jednotlivých stupních všechny otvory totožné rozměry. První ze stupňů je použit pro separaci největších částic. S každým následujícím patrem (stupněm) impaktoru se otvory zmenšují, roste rychlost proudění nosného plynu a zmenšuje se velikost separovaných částic. Takto je umožněno jednomu zařízení separovat částice o rozměrech v rozmezí desítek mikrometrů až desítek nanometrů. Princip zachytu zde může být použit jak plate, tak virtuální, ovšem v praxi je možné se setkat především s kaskádovým impaktorem s principem plate [23].

Kaskádové impaktory jsou díky široké škále separovaných rozměrů a jednoduchosti často používanými zařízeními sloužícími k separaci částic v laboratorních podmínkách. Používají se zejména u takzvané gravimetrické metody měření koncentrace částic.

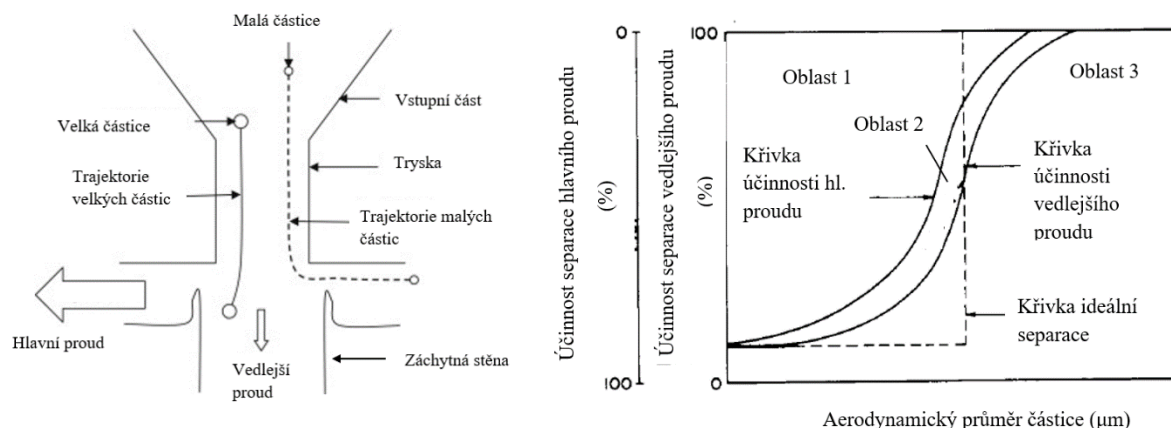


Obrázek 4.5 Kaskádový impaktor [37]

5 Virtuální impaktory a jejich modifikace

V kapitole 3 této práce bylo zmíněno, že k odloučení částice dojde při vzájemném kontaktu s pevnou plochou. Opravdu tomu tak bylo u všech dříve zmíněných metod separace, ať už se jednalo o stěnu kaskádového impaktoru, vlákno filtru či kapičku vody v mokřem odlučovači. Nyní toto tvrzení zcela neplatí, jelikož ve virtuálním impaktoru tuto plochu najít nelze. Na tomto faktu stojí také název tohoto zařízení, protože část, na které dochází k separaci skutečně pouze virtuální je.

Stejně jako u ostatních zařízení, pracujících na principu separace tuhých látek změnou směru proudu nosného plynu, dochází i zde k oddělení velkých částic vlivem setrvačnosti. Obrázek 5.1 se velmi podobá již dříve představenému schématu a můžeme zde vidět velké a malé částice a jejich trajektorii v trysce impaktoru. Jediný rozdíl je ten, že nedojde k nárazu a zachycení odloučených frakcí na podložce, ale tyto částice jsou unášeny takzvaným vedlejším proudem. Virtuální impaktor ke správnému fungování využívá vždy minimálně dva výstupy, přičemž hlavní proud má několikanásobně větší průtok. Obvykle bývá poměr těchto proudů 1/10. Pokud je takto ze dvou stran odsáván vzduch dojde v určitém místě k jejich protnutí a vytvoření jakéhosi vzduchového polštáře, který donutí malé částice zahnout, ovšem ty větší malou rychlostí vtahuje. Právě zde je vytvořena ona virtuální impakční plocha [25].



Obrázek 5.1 Schéma virtuálního impaktoru [38]

Obrázek 5.2 Křivky účinnosti separace virtuálního impaktoru [25]

Problém nastává tehdy, pokud se malá částice nachází například blíže středu a nemá tedy takovou šanci změnit směr. V tom případě odchází spolu s vedlejším proudem. Opačný případ nastane zase tehdy, pokud se velké částice nachází na stranách a jsou tedy snáze vtaženy do hlavního proudu. Oba výstupy tedy obsahují kombinaci těchto velikostí frakcí v závislosti na účinnosti separace. Tento jev je právě důvodem proč stupeň virtuálního impaktoru má vždy dvě křivky popisující účinnost separace. Tyto křivky jsou součástí grafu v obrázku 5.2 a rozdělují jej do tří částí. Oblast 1. vlevo od křivky separace hlavního proudu představuje všechny částice obsažené v hlavním proudu. Stejně tak oblast 3. vpravo od křivky separace vedlejšího proudu ukazuje tuhé látky vně obsažené. Průnikem těchto závislostí vzniká oblast 2., ta představuje částice zachycené na stěnách impaktoru a tedy ztráty [25].

Virtuální impaktory oproti svým předchůdcům eliminují nutnost výměny folie na impakční ploše a jsou díky více výstupům snadno zakomponovatelné do měřících celků, kde je potřeba přivádět plyn s určitou koncentrací. Vyznačují se jednoduchou konstrukcí s poměrně snadnou předvídatelností účinnosti separace. Navíc lze jedno zařízení použít na separaci různých velikostních frakcí pouze úpravou průtoku vzduchu. Své místo k uplatnění tedy najdou jako zařízení sloužící například v laboratorích jako úprava koncentrace částic v plynu před jinými citlivými zařízeními. Není to ovšem jediné pole jejich působení a mimo laboratorní účely

mohou být využity jako vstupní separátory v místech, kde se v ovzduší nachází tuhé znečišťující látky, které by mohly poškodit například vzduchotechnická zařízení.

5.1 Zvyšování účinnosti separace

Jelikož je snahou ztráty vznikající v impaktoru minimalizovat je také snahou snižovat velikost oblasti mezi křivkami účinnosti. Tato oblast, jak již bylo zmíněno představuje částice, které jsou zachyceny na stěnách uvnitř impaktoru. Další ztráty pak představuje aerosol unášený proudem, pro něhož není daná frakce výpočtem určena.

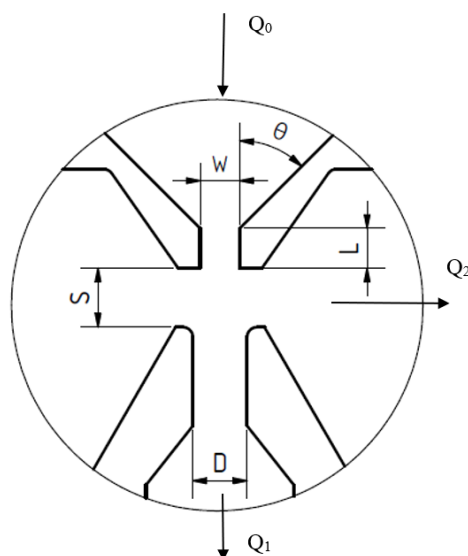
Aby bylo docíleno co nejmenších ztrát v impaktoru je nutné následovat několik předpokladů, které byly dříve ověřeny. Skládají se z popisu proudění pomocí Reynoldsova čísla a poměru Q_1/Q_0 . Dále jsou zásadní rozměry trysky, které jsou vyjádřeny pomocí vzájemných poměrů. Jsou to tyto hodnoty D/W , L/W , S/W a úhel θ . Posledními parametry, na nichž je účinnost silně závislá je samotný tvar trysky a zakřivení na vstupu do vedlejšího proudu [25].

Na tvar rychlostního profilu v trysce má jednoznačně největší vliv Reynoldsovo číslo. Jeho volba ovlivňuje unášivý vliv proudu na částice a při volbě tohoto bezrozměrného kritéria je nutné důkladně analyzovat situaci, která vzniká. Pro vysoké hodnoty $Re = 5\,000 - 15\,000$ je rychlostní profil v trysce jednotný a pro částice je poměrně složité pronikat do vedlejšího proudu. Pro nízké hodnoty Reynoldsova čísla přibližně do $Re=100$ je malý vliv setrvačnosti a většina částic proniká hlavním proudem, nebo je zachycena na stěnách. Ideální případ je možné přisoudit Re v oblasti vyšších hodnot, avšak stále laminárního proudění [25].

Poměr průtoků Q_1/Q_0 udává jasnou závislost mezi průtokem jednotlivými proudy a velikostí separované frakce. Tedy, jestli klesá tento poměr snižuje se počet proudnic, které vtékají do vedlejšího proudu. V místě rozdělení dochází k větší cirkulaci vzduchu. Průchod je tedy pravděpodobněji umožněn pouze částicím s větším průměrem. V momentě, kdy začne docházet k opačnému jevu, a tento poměr narůstá, dochází k nasávání více částic do vedlejšího proudu. V tomto případě se snižuje rozměr separované frakce [25].

Pokud se zvětšuje poměr D/W klesají ztráty od částic zachycených na plochách v impaktoru, jelikož je zde větší prostor pro ustálení proudu vzduchu. Efekt poměru L/W nemá téměř vliv na velké částice, pouze částečně odklání proudnice od osy trysky. Pro poměr S/W se s jeho rostoucí hodnotou snižují ztráty vznikající nárazem částic na zachytné ploše. Ovšem protože se zvětšuje otvor, kterým prochází hlavní proud klesá účinnost separace a zvyšuje se koncentrace velkých částic v hlavním proudě. Hodnota vstupního úhlu do trysky má vliv na zvýšení ztráty zachytem na stěnách ještě před tryskou. Z důvodů snížení těchto ztrát by měla tato hodnota být alespoň 45° [25].

Poslední charakteristikou ovlivňující účinnost jsou tvary trysky. Zde se literatura na ideálním tvaru neshoduje. V mnoha zdrojích jsou testovány variace tvarů a jejich modifikací, avšak těchto možností je nespočet, a proto nelze jasně říci, který z nich je ideální. U všech záleží především na tom, jak jsou nastaveny ostatní parametry, které byly zmíněny v této kapitole.



Obrázek 5.3 Hlavní rozměry virtuálního impaktoru

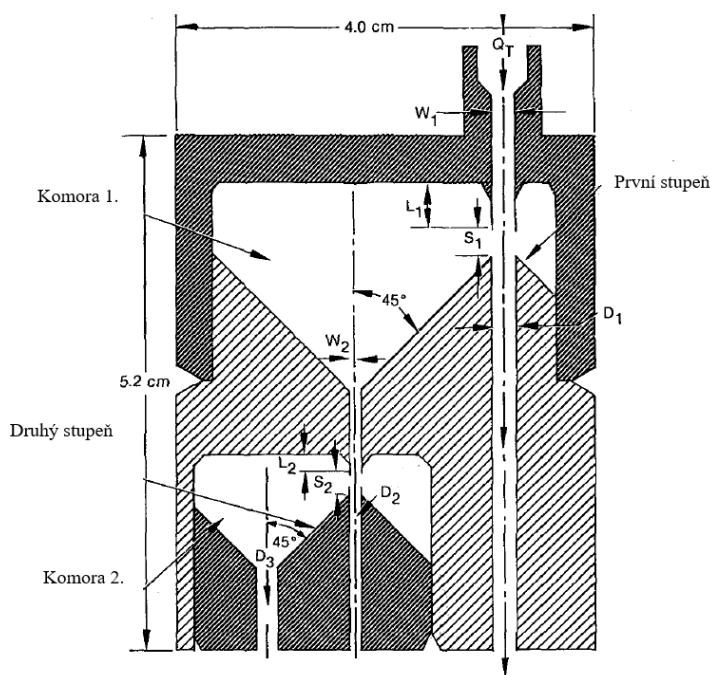
5.2 Modifikace virtuálních impaktorů

Chceme-li intenzivněji zvýšit účinnost virtuálního impaktoru je možné mimo úpravy bezrozměrných kritérií a tvarů trysky přistoupit na řadu dalších alternativ, které více či méně zdokonalují princip impakce u těchto zařízení. Mezi ně je možné zařadit snižování tlakových ztrát, zajištění co nejmenší separovatelné frakce a již zmíněná redukce ztráty na stěnách impaktoru. Tato kapitola bude věnována několika variantám, díky nimž je těchto vlastností dosahováno.

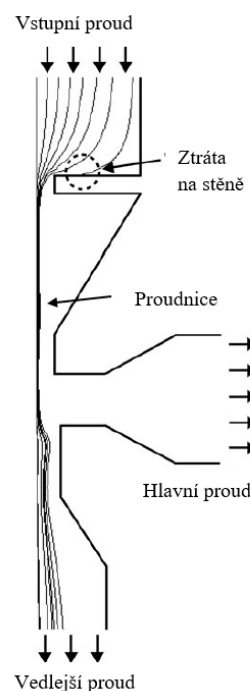
5.2.1 Vícetupňový virtuální impaktor

Stejně jako tomu bylo u impaktoru v provedení plate, je možné i virtuální impaktor rozdělit do více stupňů a tím získat širší škálu separovaných částic. Virtuální impaktory se při konstrukci více stupňů obvykle používají v sériovém sestavení a vzniká tedy obdoba kaskádového impaktoru.

U tohoto provedení je výhodou, že z jednoho proudu vstupního plynu je možné separovat kontinuálně více frakcí. Ovšem účinnost separace je zde stále ovlivněna pouze volbou již dříve zmíněných parametrů. Tento fakt nemusí však bránit vývoji kvalitního zařízení, kde ztráty nepřesahují 10 %, jako tomu bylo například u impaktoru na obrázku 5.4 [26].



Obrázek 5.4 Dvoustupňový virtuální impaktor [26]



Obrázek 5.5 Schéma impaktoru se stabilizačním otvorem [27]

5.2.2 Virtuální impaktor se stabilizačním otvorem

Jednou z možností minimalizace ztrát na stěně vedlejšího proudu je využití stabilizačního otvoru před vstupem nosného plynu na trysku impaktoru. Uspořádání s tímto principem je schematicky zobrazeno na obrázku 5.5. Díky této aplikaci dochází k usměrnění proudu plynu na střed impaktoru. Částice, které jsou následně separovány a v klasickém uspořádání by narazili na stěny impaktoru za tryskou nyní pouze vychýlí svoji trajektorii a dále pokračují vedlejším proudem. Dalším kladným efektem může být přesun ztrát na stěnách impaktoru do větší vzdálenosti od samotné trysky, a tedy více času pro zklidnění proudu plynu. Pomocí této aplikace mohou být ztráty na stěnách za tryskou níženy až na pouhých 5 % z předchozích 30–40 % [27].

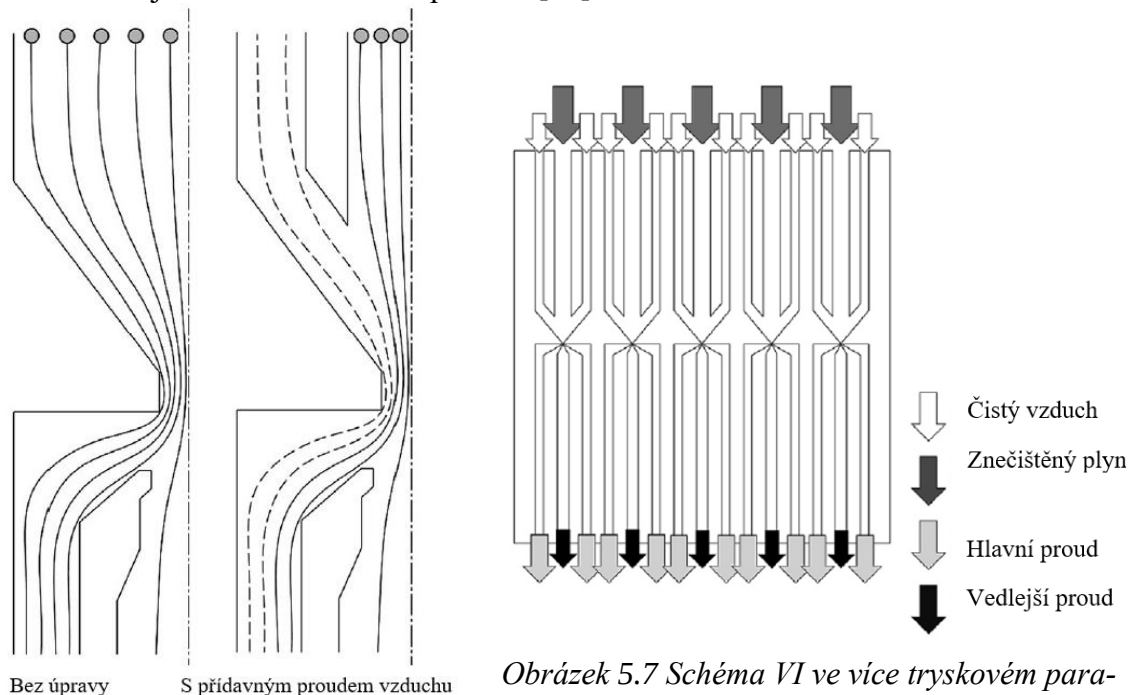
Tato metoda s sebou ovšem nese také několik jevů, které ovlivňují samotnou účinnost separace. Jelikož jsou za otvorem částice usměrněny blíže středu dojde při separaci k intenzivnějšímu strhávání frakce, která měla odcházet hlavním proudem. Z toho plyne, že dojde ke snížení výpočtového aerodynamického průměru částic, na který byl impaktor navržen. Dalším nežádoucím jevem může být intenzivnější záchyt částic před stabilizačním otvorem [27].

5.2.3 Více-tryskový impaktor s přívodem vzduchu

Umožnit zvýšení koncentrace částic na středu impaktoru mimo použití usměrňovacího otvoru může být uskutečněno i elegantnějším způsobem, než byl představen v předchozí kapitole. Chceme-li totiž proud koncentrovat na střed a současně nevytvářet plochu, na které dojde k usazení částic, může být použito designu s přívodem čistého vzduchu po stranách. Tento případ je demonstrován na obrázku 5.6, ve variantě, kdy virtuální impaktor je konstruován v paralelním provedení.

Zde můžeme pozorovat, že před zúžením na trysku je vytvořeno ústí, ve kterém je po stranách vstupního proudu navíc přiváděn čistý vzduch. To má za efekt, že na krátké dráze, kterou částice absolvují před tryskou dojde k jejich usměrnění na střed. V této fázi by skupina částic na stranách byla nejspíš zachycena v podobě ztráty na stěně, ovšem nyní je tento problém do velké míry eliminován. Využití přiváděného vzduchu po stranách také výrazně zvyšuje rychlost proudění. Tím je docíleno snížení průměru částic, které jsou separovány při zachování stejného rozměru trysky. Musí být ovšem brán zřetel na možné snížení účinnosti separace [28].

Studie, ze které jsem vycházel při popsání virtuálního impaktoru s bočním přívodem vzduchu byla zaměřena na vývoj zařízení umožňující separaci aerosolu vznikajícího při lidském vydechování. Toto zařízení bylo navrženo na separaci částic s aerodynamickým průměrem $0,3 \mu\text{m}$, přičemž účinnost separace dosahovala až 97 %. V tomto návrhu byl použit průtok čistého vzduchu jako 40 % celkového průtoku [28].



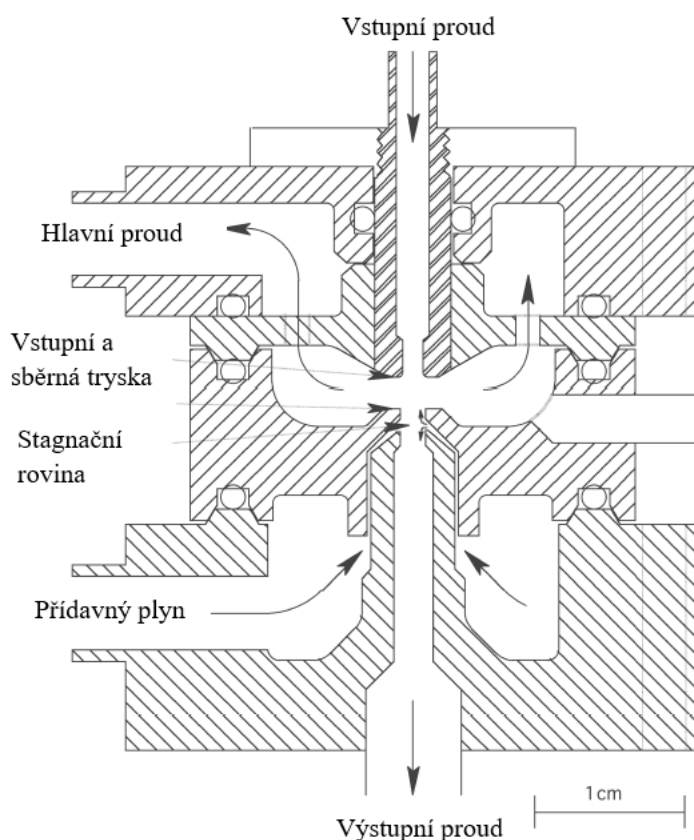
Obrázek 5.7 Schéma VI ve více tryskovém paralelním provedení [28]

Obrázek 5.6 Vliv přidavného proudu vzduchu na trajektorie separovaných částic [28]

5.2.4 Protiproudý virtuální impaktor

Zřejmě konstrukčně nejodlišnějším typem virtuálního impaktoru je protiproudý virtuální impaktor (z anglického pumped counterflow virtual impactor). Toto zařízení má mimo standardního hlavního a vedlejšího proudu také vstup s přídavným plynem. Princip je totožný s klasickým virtuálním impaktorem, a vstupující částice s malou hybností jsou v prostoru za tryskou odkloněny a odchází s hlavním proudem. Rozdíl zde spočívá právě v místě separace. Zde je pod malým přetlakem přiváděn pomocný plyn, který musí být dokonale čistý. Ten v místě ústí výstupního proudu vytváří intenzivnější rovinu stagnace a rychlost proudění vzduchu je zde téměř nulová. Tímto místem nyní dokážou projít pouze velké částice u kterých je výrazně větší složka setrvačné síly. Tyto vyseparované tuhé látky odchází jako u ostatních impaktorů vedlejším proudem [29].

Zařízení mohou být použita pro přesnou separaci velmi jemných frakcí v rozmezí 0,3 - 3 μm . Ztráty na stěnách mohou být o něco vyšší než u dříve zmíněných typů, avšak neměly by přesahovat 15 % částic. Tento fakt vyvažuje velmi spolehlivá účinnost separace, kdy malých částic je ve vyseparovaném objemu 99,99 % [29].



Obrázek 5.8 Řez protiproudým virtuálním impaktorem [29]

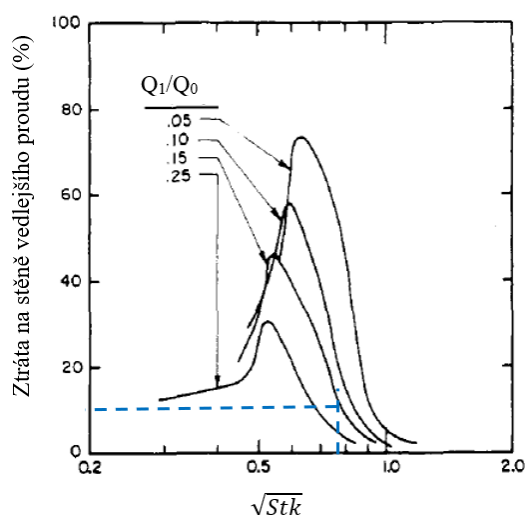
6 Návrh virtuálního impaktoru

V této kapitole bakalářské práce bude představen návrh virtuálního impaktoru počínaje teoretickou rozvahou, výpočtem základních rozměrů, konstrukcí 3D modelu na základě vypočtených hodnot a v poslední řadě také výroba. Bude navrženo více konstrukčních provedení pro velikosti separovaných částic PM10 a PM2,5. U všech zařízení se jedná o jednostupňový virtuální impaktor.

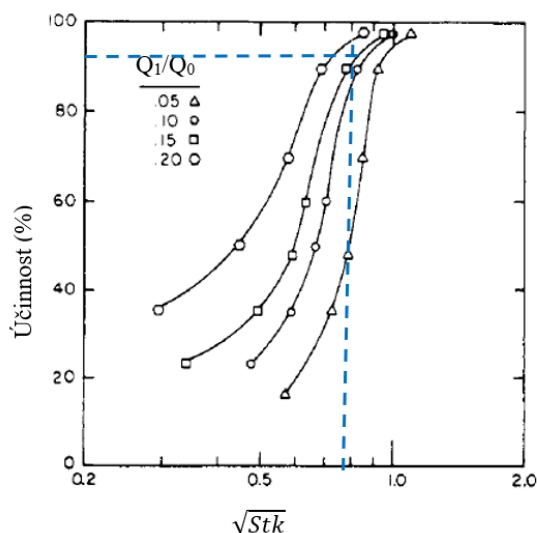
První parametr, který je nutné zvolit při návrhu impaktoru je tvar trysky, potažmo průtočného kanálu, ve kterém bude docházet k separaci. V zásadě existují dvě varianty, a to kruhový nebo obdélníkový průřez. V této práci je průtočný kanál virtuálního impaktoru obdélníkového průřezu. Tato volba není založena na možných výhodách či nevýhodách obou možností, ovšem na předpokládané technologii výroby. Jelikož byl tedy předpoklad, že impaktor bude frézován, jeví se obdélníkový průřez s ohledem na výrobní technologii jako výhodnější.

Jak bude dále popsáno v rovnici (6.5) je Stokesovo číslo základní bezrozměrné kritérium sloužící pro popis chování částice v blízkosti překážky. U návrhu impaktorů se obecně volí takové, aby pro velkou část této hodnoty bylo přibližně konstantní Reynoldsovo číslo. V tomto návrhu je tato konstanta volena jako 0,59 (respektive $\sqrt{Stk} = 0,77$) a vychází z již dříve ověřených studií i za pomoci CFD simulací [30].

Poslední hodnotou figurující na počátku návrhu je zadaný průtok nosného plynu. V mém případě byla tato hodnota dána předpokládanou měřicí technikou. Tedy přístroji OPS a PALAS, které budou blíže představeny v kapitole 7. Tato zařízení mají daný průtok 1 l/min a 5 l/min. Nyní je možné z grafu pomocí výše uvedených hodnot určit teoretickou předpokládanou účinnost separace a ztráty na stěně vedlejšího proudu. Pokud je známý poměr $Q_1/Q_0 = 0,16$ a již zmíněná hodnota Stokesova čísla $\sqrt{Stk} = 0,77$ lze tuto závislost určit z grafů na obrázku 6.1 a 6.2. Pokud by byly tyto body vyneseny je přibližná ztráta na stěně vedlejšího proudu rovna 10 % částic. Jak bude demonstrováno později, účinnost separace roste se snižujícím se ekvivalentním průměrem částice. Pokud je tedy například separovaná frakce PM2,5, tak účinnost vycházející z grafu 6.2 je rovna přibližně 90 % pro částice menší než 2,5 μm .



Obrázek 6.1 Vliv Q_1/Q_0 na ztrátu na stěně vedlejšího proudu [25]



Obrázek 6.2 Vliv Q_1/Q_0 na účinnost [25]

6.1 Výpočet

Nyní je možné přistoupit k samotnému výpočtu, jehož požadovaným výstupem je hodnota charakteristického rozměru trysky W . Parametry výpočtu jsou uvažovány pro podmínky přibližně odpovídající podmínkám při následném měření v laboratoři tedy standardní podmínky ($T=293,15$ K; $p=101\,325$ Pa).

6.1.1 Vlastnosti pracovního média

Hustota nosného plynu (vzduch), která je použita ve výpočtu je dána pro standardní teplotu a tlak ze stavové rovnice vztahem.

$$\rho = \frac{p}{rT} \quad (6.1)$$

Kde

ρ	hustota vzduchu	(kg/m ³)
p	normální tlak	(Pa)
r	plynová konstanta vzduchu	(J/kg·K)
T	termodynamická teplota	(K)

Dynamická viskozita suchého vzduchu je funkcí teploty a je dána vztahem.

$$\eta(T) = \eta_n(T) \cdot \sqrt{\frac{T}{T_n} \cdot \frac{1 + \frac{S_\mu}{T_n}}{1 + \frac{S_\mu}{T}}} \quad (6.2)$$

Kde

η	dynamická viskozita vzduchu	(Pa·s)
η_n	dynamická viskozita vzduchu pro norm. podmínky	(Pa·s)
T_n	teplota pro normální podmínky	(K)
S_μ	Sutherlandova konstanta	(K)

6.1.2 Cunninghamův korekční faktor

Pro výpočet Cunninghamova korekčního faktoru je třeba určit střední volnou dráhu molekul. Je to průměrná vzdálenost, kterou urazí molekula mezi dvěma srážkami a je dána rovnicí.

$$\lambda = 2 \frac{\eta(T)}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8M}} \quad (6.3)$$

Kde

λ	střední volná dráha molekul	(m)
R	molární plynová konstanta vzduchu	(J/K·mol)
M	molární hmotnost vzduchu	(kg/mol)

Poté Cunninghamův korekční faktor jako funkce střední volné dráhy molekul a průměru částice je dán rovnicí (6.4). Tuto hodnotu lze teoreticky zanedbat pro částice větší než 1 μm , ovšem pro úplnost je v této práci uvažována.

$$C = 1 + \frac{2\lambda}{D_c} \left[1,23 + 0,41 \cdot \exp \left(-0,88 \frac{D_c}{2\lambda} \right) \right] \quad (6.4)$$

Kde

C	Cunninghamův korekční součinitel	(-)
D_c	průměr částice	(m)

6.1.3 Parametry virtuálního impaktoru

Základní veličina umožňující popsat chování částice, která má být zachycena v impaktoru je Stokesovo číslo. Jedná se o bezrozměrné kritérium popisující stav částice v blízkosti překážky. Je charakterizováno poměrem setrvačné vzdálenosti doběhu částice a polovinou charakteristického rozměru trysky impaktoru [31].

Výpočet Stokesova čísla je určen rovnicí.

$$Stk = \frac{\rho_c v D_c^2}{9\eta W} \quad (6.5)$$

Kde

Stk	Stokesovo číslo	(-)
ρ_c	hustota částice	(kg/m^3)
v	rychlost proudění v trysce	(m/s)
W	charakteristický rozměr trysky	(m)

Vstupní hodnotou výpočtu je průtok vzduchu impaktorem. Jsme schopni tedy z rovnice kontinuity vyjádřit rychlost proudění v kritickém průřezu impaktoru pomocí průtoku a plochy průtočného kanálu.

$$v = \frac{Q}{HW} \quad (6.6)$$

Kde

Q	průtok	(m^3/s)
H	hloubka trysky	(m)

Jelikož velikost hloubky trysky lze rozdělit do více jednotlivých trysek a její rozměr je podstatný pouze pro výpočet Reynoldsova čísla je při návrhu impaktoru s obdelníkovým průřezem trysky uvažován jako charakteristický rozměr šířka trysky W . Nahrazením rychlosti pomocí průtoku a dosazením do rovnice (6.5) a následným vyjádřením získáme hodnotu W jako charakteristický rozměr trysky.

Hloubka trysky byla v tomto výpočtu určena iteračně. Její hodnota byla postupně určována tak, aby byly parametry impaktoru co nejbližší ideálním poměrům a zároveň aby byla dosažena co nejlepší vyrobiteľnost zařízení.

$$W = \sqrt{\frac{\rho_c Q D_c^2}{9\eta H \cdot Stk}} \quad (6.7)$$

Reynoldsovo číslo je bezrozměrné kritérium charakterizující proudění. Je dáno jako poměr kinematické a viskózní složky proudu rovnicí.

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (6.8)$$

Kde

Re	Reynoldsovo číslo	(-)
ν	kinematická viskozita	(m ² /s)
D	charakteristický rozměr	(m)

Dosažením dynamické viskozity a nahrazením rychlosti za průtok při použití hydraulického průměru trysky získáme rovnici.

$$Re = \frac{2\rho Q}{\eta(H + W)} \quad (6.9)$$

6.1.4 Výsledné hodnoty

Tabulka 6.1 Vypočtené hodnoty

	ρ (kg/m ³)	η (Pa·s)	λ (nm)	C (-)	ν (m/s)	Re (-)	W (mm)	H (mm)
PM 2,5	1,204	1,797	6,45	1,064	25,5	3 367	1,8	2,2
PM 10	1,204	1,797	6,45	1,016	3,8	1 270	4,0	6,5

6.1.5 Účinnost separace

Vyhodnocení funkčnosti virtuálního impaktoru je provedeno pomocí účinnosti separace požadované frakce. Jelikož je vstupní proud rozdělen v trysce na dva proudy, je nutné posoudit účinnost pro každý z nich jednotlivě.

Účinnost separace hlavního proudu je určena rovnicí (6.10) jako podíl počtu částic v hlavním proudu za impaktorem ku referenčnímu počtu částic naměřenému v zařízení PALAS.

Účinnost separace vedlejšího proudu je určena rovnicí (6.11) jako podíl počtu částic ve vedlejším proudu za impaktorem ku referenčnímu počtu částic naměřenému v zařízení OPS. Tato hodnota určuje penetraci částic, proto aby byla dosažena hodnota účinnosti musí se následně odečíst z celku.

$$\eta_H = \frac{N_H}{N_{HREF}} \quad (6.10)$$

$$\eta_V = 1 - \frac{N_V}{N_{VREF}} \quad (6.11)$$

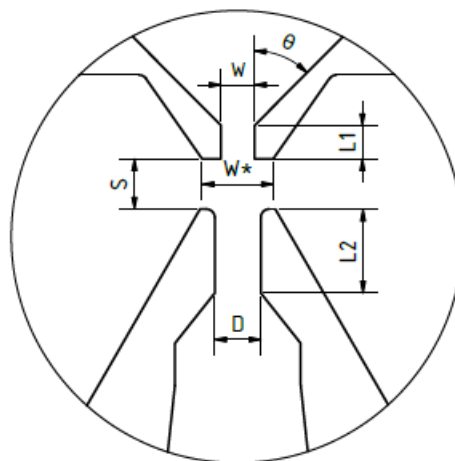
Kde

η_H	účinnost separace hlavního proudu	(-)
η_V	účinnost separace vedlejšího proudu	(-)
N_H	počet částic v hlavním proudu	(n/cm ³)
N_{HREF}	referenční počet částic hlavního proudu	(n/cm ³)
N_V	počet částic ve vedlejším proudu	(n/cm ³)
N_{VREF}	referenční počet částic vedl. proudu	(n/cm ³)

6.2 Konstrukce

O zvyšování účinnosti vlivem poměrů hlavních rozměrů impaktoru bylo pojednáno v kapitole 5.1 této práce a nyní budou tyto informace implementovány na konkrétní vypočtené hodnoty. Z výpočtu plynou dva rozměry popisující průřez průtočného kanálu, a to šířka a hloubka trysky. Na základě těchto veličin byly postupně určeny všechny zbývající charakteristické rozměry viz tabulky 6.2, 6.3 a obrázek 6.3. V literatuře je uvedeno vždy rozmezí ideálních hodnot, které by měly tyto poměry nabývat. Použité rozměry jsou tedy voleny tak, aby se výsledná hodnota nacházela v tomto rozmezí a zároveň byl daný rozměr co nejlépe vyrobitelný.

Zmíněné hodnoty se týkají pouze těsného okolí místa separace, ovšem aby byla funkce impaktoru co nejlepší je nutné se na zařízení dívat komplexněji a zaměřit se na tvar vstupní části i obou proudů následujících po rozdělení. Na základě různých studií, zejména pak [25] [32] byly tyto znalosti využity a všechny zbývající rozměry je možné vidět na výkresech impaktorů, které jsou součástí příloh.



Obrázek 6.3 Charakteristické rozměry impaktoru

Tabulka 6.2 Charakteristické rozměry impaktoru

	W (mm)	W* (mm)	H (mm)	S (mm)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	D (mm)	θ (°)
PM2,5	1,8	4,0	2,2	2,6	1,7	4,5	2,2	45
PM10	4,0	8,5	6,5	6,0	4,0	10,0	5,5	45

Tabulka 6.3 Bezrozměrná kritéria (poměry) trysky impaktoru [32]

	W*/W	D/W	L ₁ /W	L ₂ /D	S/W
Ideální	2,0-2,5	1,3-1,4	0,8-1,2	1,5-2,5	1,2-1,8
PM2,5	2,2	1,2	1,0	2,0	1,5
PM10	2,1	1,4	1,0	1,8	1,5

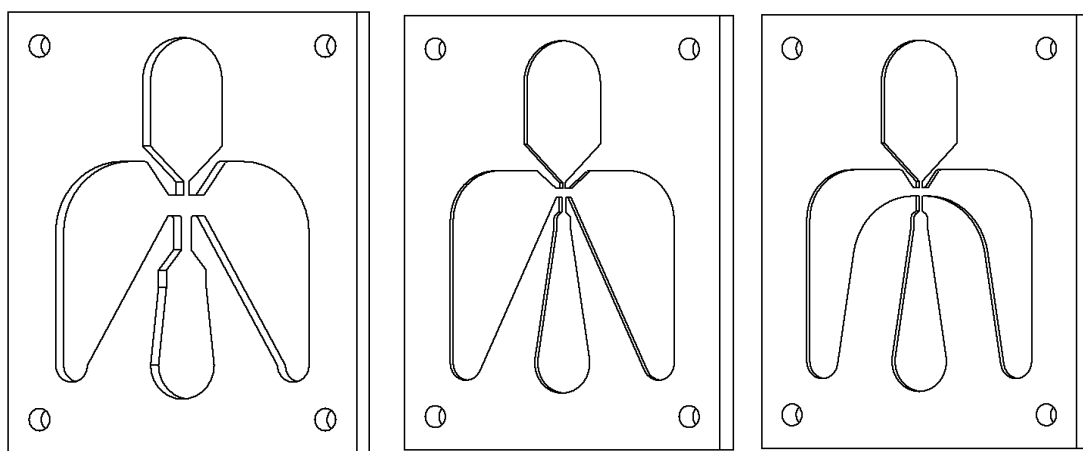
6.2.1 Tělo impaktoru

Na základě dříve zmíněných informací byly navrženy tři typy virtuálního impaktoru. Všechny mají shodnou geometrii vstupního a vedlejšího proudu. První z nich byl navržen pro separaci částic PM10 a tvar hlavního proudu má stejný jako druhý navržený impaktor pro separaci částic PM2,5. V těchto dvou případech byl tvar hlavního proudu proveden se sražením 30 °, obdobně jako tomu bylo v případě studie [32].

Třetí model (na obrázku 6.4 vpravo) je rovněž určen pro odlučování frakce PM2,5, ale tvar hlavního proudu má od prvních dvou zmíněných odlišný. Zde je tvar hlavního proudu opatřen rádiusem R20. Podobně tomu bylo ve studii [30]. V práci, jež posloužila jako inspirace byly provedeny CFD simulace ukazující na zvýšení rychlosti proudění za tryskou související právě s nahrazením sražení za rádius, jehož vlivem dojde ke zmenšení průtočného kanálu. Tato změna byla provedena za účelem zjištění, jaký vliv má tvar hlavního proudu na účinnost separace, potažmo jaký vliv má změna rychlosti proudění v těchto místech impaktoru.

Jiné změny v geometrii provedeny nebyly. Důvodem je především to, že se vznikajícími nepřesnostmi výroby se následně pojí i změna poměrů (bezrozměrných kritérií) impaktoru. Tedy i bez toho, aby tyto změny byly provedeny je jich docíleno náhodně při výrobě impaktoru.

Posledním faktorem, u něž byl předpoklad, že bude mít vliv na účinnost separace je použitý materiál těla impaktoru. První prototypy byly vyrobeny ze stejného materiálu jako víčko, a to PMMA plast (plexisklo). Jelikož při proudění v impaktoru dochází k intenzivnímu tření o stěny mohlo by zde docházet k vytvoření statického náboje, který by částice přitahoval ke stěnám a tím zvyšoval ztráty. K tomuto faktu bylo při návrhu přihlédnuto, a proto u dalších provedení je použitý materiál antistatický. Jedná se o materiál PE-UHMW plněný grafitem s komerčním označením TIVAR. Díky jeho vlastnostem dochází k odvádění náboje od místa proudění. Z toho důvodu jsou ztráty, které by mohly potenciálně vznikat tímto způsobem významně redukovány.



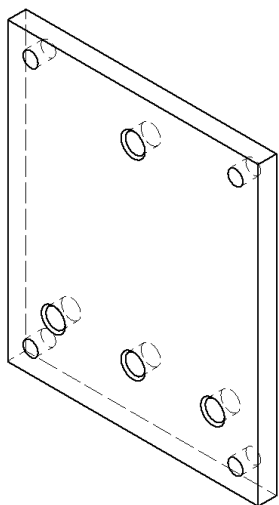
Obrázek 6.4 Navržené impaktory (PM10, PM2,5 a PM2,5)

6.2.2 Víčko

Komponent, který je použit k uzavření impaktoru a současně k připojení na měřicí trať je víčko. Je vyrobeno z materiálu PMMA (plexisklo). Do tohoto víčka jsou vyřezány závity sloužící ke snadnému našroubování rychlospojek určených k následnému měření. Dále jsou v rozích průchozí díry ke sešroubování celého zařízení. Model tohoto prvku je na obrázku 6.5.

6.2.3 Těsnění

Aby při práci impaktoru nedocházelo k přísávání vzduchu přes hrany nebo z okolí je nutné celé zařízení důkladně zatěsnit. Z tohoto důvodu byl při prvních návrzích využit O-kroužek. Ten ovšem řešil pouze přísávání vzduchu z okolí. Proto byl tento způsob nahrazen aplikací silikonu. Pokud je silikon nanesen po celém obvodu impaktoru, jako je tomu na obrázku 6.6 je zamezeno přísávání vzduchu přes hrany. V tomto provedení by měl být celý impaktor dokonale utěsněn.



Obrázek 6.5 Vičko impaktoru

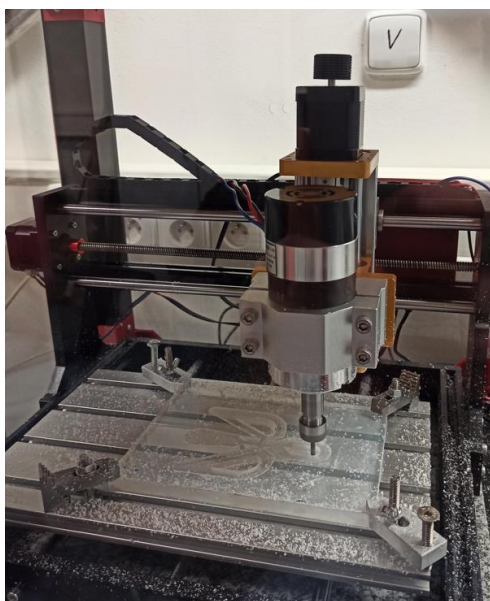


Obrázek 6.6 Nanesení silikonu

6.3 Výroba

Při výrobě virtuálního impaktoru bylo využito dvou technologií. První z nich bylo frézování. Na obrázku 6.7 je možné vidět mikrofrezku při obrábění impaktoru z plastu PMMA. U všech obráběných kusů byl pro generování G-kódu využit software OpenBuildsControl. Jak již bylo dříve zmíněno důležitým parametrem při volbě rozměrů bylo právě obrábění. Zde byl vzhledem k velmi malým rozměrům limitující především impaktor pro separaci částic PM_{2,5}. V tomto případě musel být prvotní výpočet s výsledkem $W=1,7$ mm) upraven tak, aby nejmenší rozměr byl 1,8 mm, jelikož takový byl nejmenší možný průměr frézy. Druhou použitou technologií výroby byl 3D tisk. V tomto případě byla využita tiskárna Cura Ultimaker.

V tabulkách 6.4 a 6.5 jsou vypsány hlavní parametry impaktoru, které byly naměřeny po výrobě. Nebylo cílem tyto rozměry následně upravit tak, aby byly ideální. Právě vlivem nepřesností výroby je dosažena variace hodnot, které mohou mít vliv na účinnost separace impaktoru.



Obrázek 6.7 Obrábění impaktoru

Tabulka 6.4 Naměřené rozměry impaktoru (mm)

PM 10					
	Výpočet	3D tisk	Plexi1	Plexi2	ESD
W	4,0	3,7	4,1	4,3	4,0
D	5,5	5,2	5,7	5,7	5,7
S	6,0	5,6	6,2	6,2	6,4
L	4,0	3,9	3,7	4,2	3,5

Tabulka 6.5 Naměřené rozměry impaktoru (mm)

PM 2,5			
	Výpočet	ESD 1.0	ESD 2.0
W	1,8	1,5	1,5
D	2,2	2,3	2,3
S	2,6	2,7	2,8
L	1,7	1,5	1,7

Tabulka 6.6 Bezrozměrná kritéria (poměry) trysky impaktoru

	PM10					PM2,5	
	Ideální	3D tisk	Plexi1	Plexi2	ESD	ESD 1.0	ESD 2.0
L/W	0,8 - 1,2	1,1	0,9	1,0	0,9	1,0	1,1
D/W	1,3 - 1,4	1,4	1,4	1,3	1,4	1,5	1,5
S/W	1,2 - 1,8	1,5	1,5	1,4	1,6	1,8	1,8

7 Experimentální část

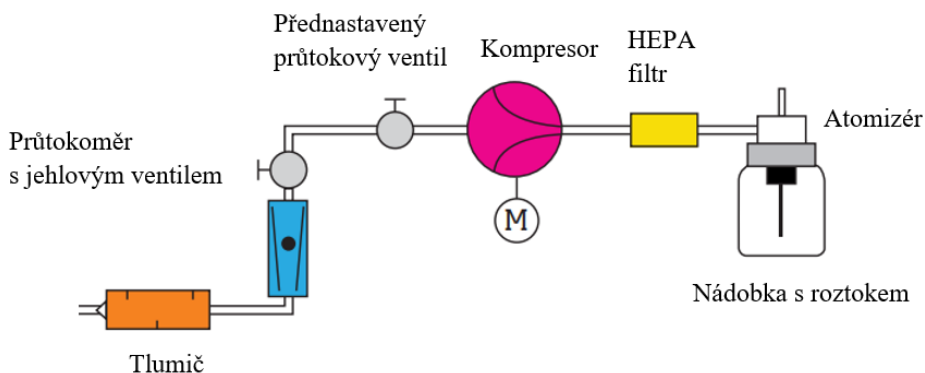
Jak již bylo zmíněno virtuální impaktor je zařízení sloužící k separaci jemných částic změnou směru proudění nosného plynu. Výpočet impaktoru je navržen tak, aby účinnost separace dané frakce dosahovala 50 %. Proto bude mým cílem v této kapitole ověřit, zda tomu tak opravdu je u mnou navržených řešení. Popřípadě přiblížit anomálie, které mohly při výrobě ale i měření vznikat.

7.1 Popis měřicí tratě

Stavebním kamenem celého měření je měřicí trať. Ta sestává z měřicího boxu, ve kterém je umístěn generátor částic „3079 Portable Atomizer Aerosol Generator“. Vytvořené částice jsou následně odsávány přes měřený impaktor pomocí dvou přístrojů na měření částic. Hlavní proud procházející impaktorem je odsáván zařízením „PALAS Promo 2000“ s průtokem 5 l/min. Vedlejší proud je veden zařízením „OPS 3330“ s průtokem 1 l/min. Následující kapitoly dávají bližší pohled na jednotlivá zmíněná zařízení.

7.1.1 3079 Portable Atomizer Aerosol Generator

Atomizér nebo také generátor aerosolu je zařízení sloužící k vytvoření jemných částic a známé koncentraci. Toto zařízení garantuje určité vlastnosti generovaného aerosolu, především velikost částic a jejich koncentraci s velmi dobrou opakovatelností. Zařízení sestává z několika komponent, které můžeme vidět na obrázku 7.1 v schematickém zobrazení. Základním prvkem je kompresor. Ten nasává okolní vzduch přes HEPA filtr, který zajišťuje jeho vysokou čistotu nutnou pro správné fungování atomizéru. Před kompresorem se nachází tlumič a průtokoměry. První z průtokoměrů je vybaven jehlovým ventilem, kterým je možné regulovat průtok. Po průchodu přes filtr se nasávaný vzduch dostává do samotného atomizéru. Ten je složen z nádoby se solným roztokem a tryskou se dvěma proudy pro nasávání roztoku sloužící také jako odlučovač větších kapek. Roztok je nasáván a v trysce dochází k odpaření vody v důsledku rychlého proudění tekutiny a vzniku samotných částic soli. Následně je vzniklý aerosol s vodní parou unášen ven z atomizéru. Toto zařízení je primárně určeno pro tvorbu částic s největší četností o velikosti 1 μm [33].



Obrázek 7.1 Schéma generátoru částic [33]

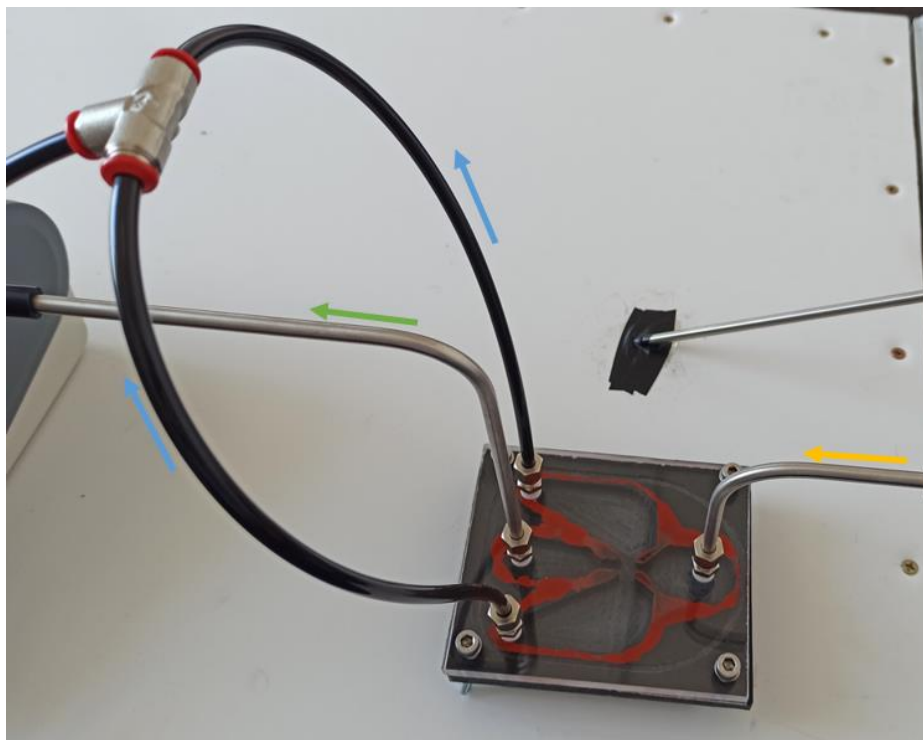
7.1.2 Měřicí box

Aby bylo dosaženo jednotných výsledků a tím dobré opakovatelnosti měření bylo zapotřebí vytvořit přibližně homogenní prostředí, ve kterém nebude docházet k narušování okolními vlivy. K tomuto účelu byl využit měřicí box o objemu 0,32 m³, který byl již v minulosti využíván na Energetickém ústavu k jiným experimentům. Tento box je jednoduše sestaven z desek, které jsou pevně spojeny a odnímatelná je pouze jedna strana. Díky tomu je snadné dovnitř

umístit jak měřicí vybavení, tak v tomto případě generátor částic. Na horní stěně se nachází otvor sloužící k vyvedení nasávaného vzduchu pomocí trubičky. Dále lze k boxu ze strany připevnit HEPA filtr, aby bylo možné nasávat okolní vzduch zbavený tuhých částic. Toho v tomto experimentu nebylo zapotřebí a zmíněný otvor byl z části utěsněn a sloužil pro vyvedení napájecího kabelu atomizéru.

7.1.3 Impaktor

O fungování impaktoru a obecně o zachytu jemných částic vlivem působení setrvačných sil bylo pojednáno již dříve v této práci. V této kapitole je pohled zaměřen na impaktor jako část měřicí tratě. Z boxu je vzduch přiváděn do vstupní části impaktoru. Spojení je provedeno pomocí pneumatických hadic a trubiček, které jsou k samotnému impaktoru připevněny pomocí nástrčných rychlospojek zašroubovaných do víčka. V impaktoru je tedy proud vzduchu rozváděn mezi hlavní a vedlejší proud a dochází zde k separaci částic. Výstup hlavního proudu je rozdělen do dvou komor, a proto za impaktorem dochází pomocí T spojky k jeho opětovnému spojení. Vedlejší proud prochází středem dál do měřicího zařízení. Zapojení impaktoru ukazuje obrázek 7.2. Zde jsou naznačeny také směry proudění vzduchu. Oranžová šipka ukazuje směr vstupního proudu do impaktoru. Modré šipky znázorňují hlavní proud a zelená proud vedlejší.



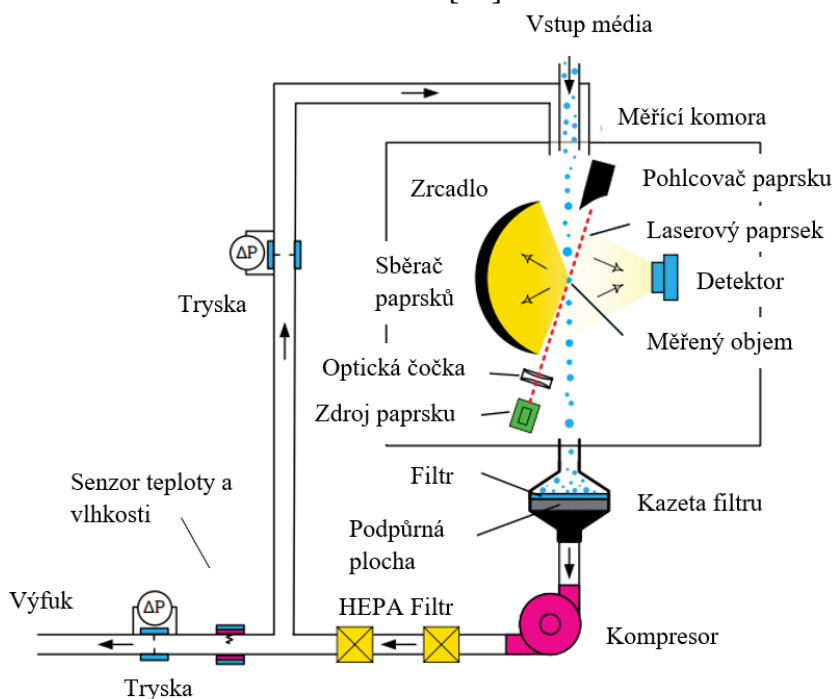
Obrázek 7.2 Zapojení impaktoru do měřicí tratě

7.1.4 Optical Partical Sizer 3330

Optical partical sizer je spektrometr pracující na principu rozptylu světla na měřené částici. Umožňuje měření tuhých látek ve velikostech od $0,3 \mu\text{m}$ do $10 \mu\text{m}$. Vstup do zařízení zajišťuje čerpadlo, které nasává měřenou směs plynu a částic o průtoku 1 l/min . Zařízení také obsahuje obtokový proud v plášti, který je určen pro omývání optických komponent zařízení. Tento proud je za čerpadlem vyčištěn pomocí hrubého filtru a HEPA filtru a následně vháněn na vstupu k měřenému proudu. Zařízení je dále vybaveno gravimetrickým filtrem umožňující například chemický rozbor zachycených látek [34].

Aerosol vstupující do měřené části je osvětlen laserovým paprskem, který je usměrněn čočkou. Na částici dojde k rozptylu světla a toto záření dopadá na eliptické zrcadlo. Zde je

paprsek odražen a usměrněn na detektor, který se nachází v ohnisku zrcadla. Takto detekovaná částice odchází přes čerpadlo. Dle odraženého paprsku následně přístroj zařadí částici do odpovídající skupiny. Ze známého objemu v měřicí komoře a průtoku mohou být následně dopočítány aktuální koncentrace. Zařízení pracuje spolehlivě pouze do určité koncentrace částic. Pokud je ve sledovaném objemu částic příliš mnoho dojde ke vzájemnému překrývání a tyto částice mohou být zařazeny do špatné skupiny. V přístroji je také možné nastavit předpokládanou hustotu látek a tím odhadnout hmotnostní rozdělení [34].

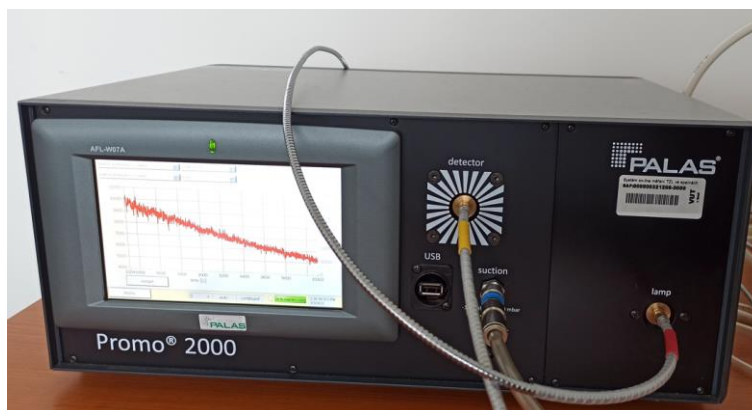


Obrázek 7.3 Schéma přístroje OPS [34]

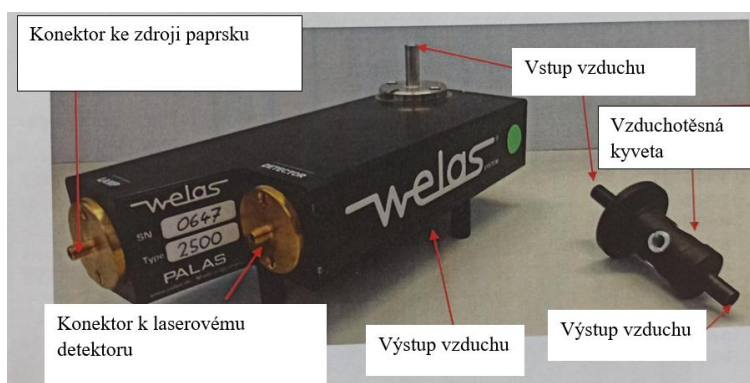
7.1.5 PALAS Promo 2000

Podobně jako ve spektrometru OPS i v tomto přístroji dochází k optickému měření částic. Jeho měřicí rozsah je $0,15\ \mu\text{m}$ až $10\ \mu\text{m}$. Celé zařízení se skládá ze dvou komponent. Prvním z nich je senzor welas. Zde dochází k optickému měření částic. Proud vzduchu o průtoku $5\ \text{l/min}$ je hnán přes komoru, do které je pomocí optických kabelů přiváděn paprsek ze zařízení PALAS. Světelný paprsek je pomocí čoček usměrněn a následně vstupuje do měřicí komory. V ní dopadá na prolétající částice, na kterých dojde k rozptylu světla v závislosti na jejich velikosti. Odražené paprsky jsou soustavou zrcadel usměrněny na detektor, který tento světelný signál odesílá optickým kabelem zpět do zařízení PALAS [35].

Měřicí soustava má větší přesnost než dříve zmíněný přístroj OPS, zároveň je zde možné regulovat průtok nasávaného plynu. Výstupem z tohoto zařízení je poté sada mnoha hodnot, například koncentrací částic, hmotnostní koncentrace, statistická data a další. V této práci byla využita především data týkající se počtu částic a koncentrace.



Obrázek 7.4 Přístroj PALAS Promo 2000



Obrázek 7.5 Sensor welas [35]

7.2 Nastavení experimentu

Jak již bylo zmíněno pro měření impaktoru byl využit box o objemu $0,32 \text{ m}^3$, díky kterému bylo možné zachovat téměř identické podmínky pro jednotlivá měření. Před počátkem samotného měření bylo nutné zajistit správnou koncentraci částic uvnitř boxu, tak aby byli přístroje schopné zvládat měření a koncentrace nebyla příliš vysoká. Jako ideální se osvědčilo generovat částice po dobu 1,5 minuty.

Při měření dochází k odsávání 6 l/min vzduchu z boxu a vlivem netěsností k přisávání okolního vzduchu. Takto se počáteční koncentrace částic postupně snižuje, až dojde téměř k jejímu vyrovnání s podmínkami v okolním prostředí. Dalším krokem bylo tedy zjistit potřebnou dobu měření, tedy čas, za který se koncentrace uvnitř boxu opět vyrovná počátečním podmínkám. Po provedení tří měření na prázdko bez impaktoru se osvědčila potřebná doba ustálení koncentrace jako 1,5 hodiny. Měřicí přístroje byly nastaveny tak, aby docházelo k průměrování naměřených hodnot po deseti sekundách. Výstupem z každého měření bylo 540 sad hodnot.

Jelikož nebylo na vstupu do impaktoru připojeno žádné zařízení sloužící ke kontinuálnímu měření vstupních koncentrací bylo před počátkem experimentu provedeno měření tzv. na prázdko. Toto měření spočívalo v zapojení obou přístrojů (OPS i PALAS) propojených pomocí Y-spojky. Tak bylo zajištěno, že z měřicího boxu je odsáván požadovaný průtok vzduchu 6 l/min , se stejnými podmínkami jako tomu bylo následně s impaktorem. Toto měření bylo provedeno třikrát, a výsledné hodnoty byly po kontrole zprůměrovány.

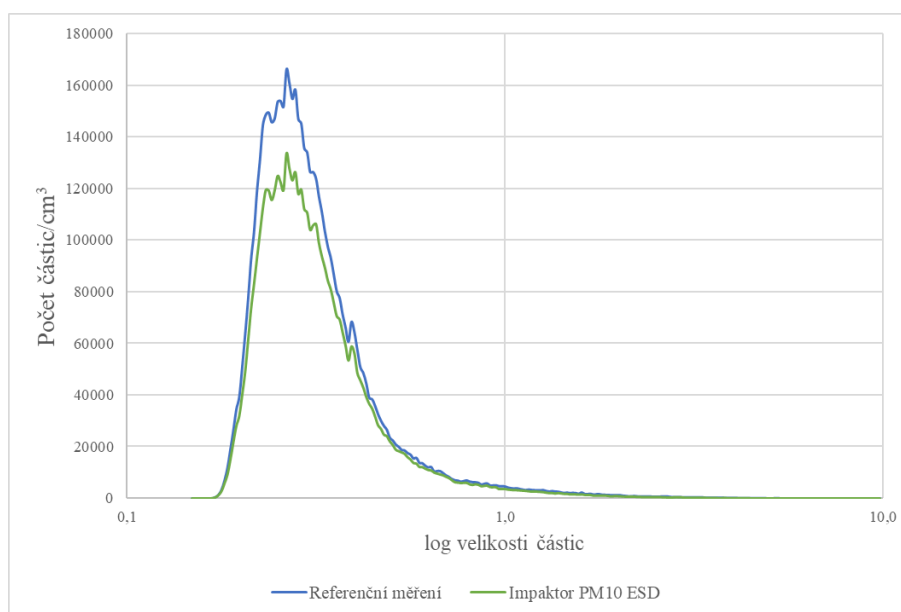
Po získání hodnot „na prázdko“ bylo možné přistoupit k měření jednotlivých impaktorů. U všech vyrobených impaktorů byla provedena vždy dvě měření, aby bylo možné odhalit případné chybné měření.

7.3 Výsledky měření

Požadovanými hodnotami každého měření byl počet částic v daném proudu. Na obrázku 7.6 je možné vidět rozložení počtu částic/cm³ v závislosti na velikosti. Tento graf zobrazuje částice, které se nacházely v hlavním proudu impaktoru při referenčním měření (na prázdno) a poté při měření s impaktorem. Tato závislost je vhodná pro prvotní posouzení, zda je měření relevantní, ovšem není vhodná pro popis účinnosti separace. Přesto je vhodné ji na začátek této kapitoly zařadit, jelikož poměrně jasně ukazuje několik faktů. Jelikož se tvar této křivky velmi podobá u všech měření bude jako příklad použit pouze jeden, a to měření s impaktorem PM10 vyrobeným frézováním z ESD materiálu.

Při pohledu na graf je ihned jasné, že při průchodu vzduchu impaktorem ubylo částic oproti referenčnímu měření. Tato informace nám dává signál, že impaktor pracuje, i když zatím není jasné, zda pouze zachycuje částice, či skutečně vykonává funkci separace určité frakce z celku. Pokud bychom se zaměřili na to, že požadovaná frakce je zde 10 µm neměly by se křivky od sebe příliš vzdalovat v oblasti na levé straně. Tak tomu není a vidíme, že pro menší částice je zde velký úbytek, který představuje ztráty. Oproti hodnotám přibližně 10 %, které byly předpokládány na počátku výpočtu je zřejmé, že ztráty jsou v tomto případě nejméně dvojnásobné.

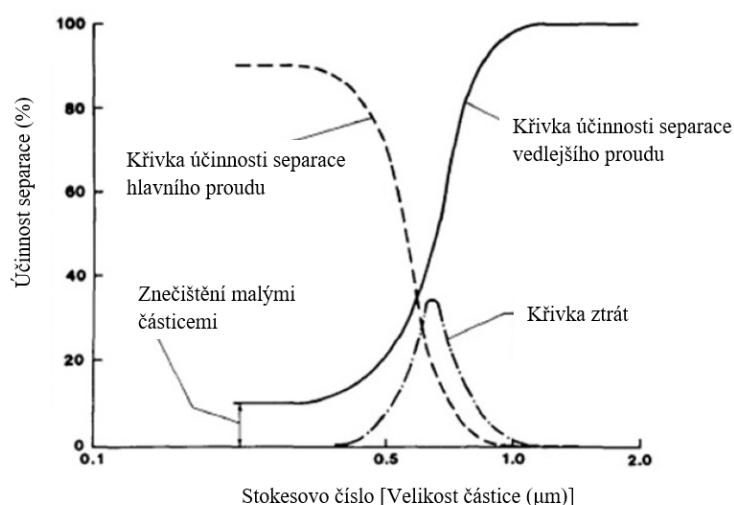
Další vlastností, jež můžeme ihned pozorovat je velikost frakce, kterou generoval atomizér. Peak této křivky se nachází v oblasti kolem 0,5 µm a tato hodnota odpovídá očekávaným rozměrům částic uvedených v manuálu k obsluze. Tento fakt byl úskalím zejména u měření impaktorů pro separaci částic PM10. Jelikož u frakce v okolí 10 µm je částic velmi málo, a proto jsou některá data zavádějící. Na tento fakt bude poukázáno dále v této kapitole při vyhodnocení účinnosti separace.



Obrázek 7.6 Rozdělení počtu částic/cm³ dle velikosti v hlavním proudu impaktoru PM10

Dříve, než bude vyhodnoceno měření provedené na vyrobených impaktorech bude přiblížen výsledek, kterého byla snaha dosáhnout. Na obrázku 7.7 jsou vyobrazeny křivky účinnosti separace hlavního a vedlejšího proudu. Můžeme zde vidět křivku popisující hlavní proud (čárkovaně). Zde tedy účinnost klesá od hodnoty asi 90 % pro částice, které jsou výrazně menší než požadovaný aerodynamický průměr. A pro částice větší, než daný rozměr se blíží limitně k 0 % účinnosti. Křivka vedlejšího proudu se chová přesně obráceně a roste od hodnoty 0 % + ztráty ke 100 %, které představují frakci větší, než je požadovaný separovaný rozměr. Tato závislost může být použita jak pro hodnotu Stokesova čísla, tak velikosti částice vynesené na ose x.

Průnikem těchto dvou křivek získáváme bod, který určuje, jaká je aktuální separovaná frakce. Přičemž požadovaná účinnost pro separaci je 50 %.

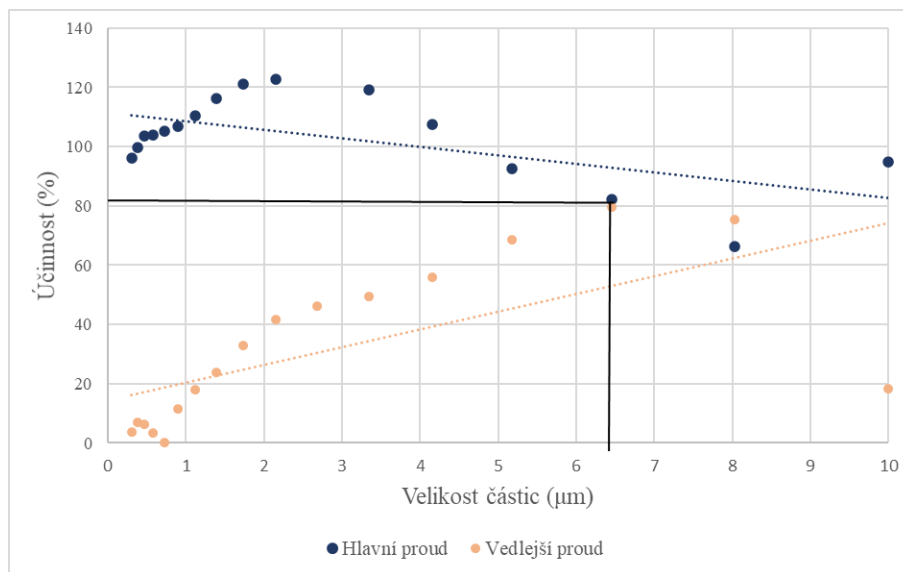


Obrázek 7.7 Křivky účinnosti separace VI [36]

7.3.1 PM 10

U impaktorů navržených k separaci částic o aerodynamickém průměru 10 μm byla hlavním problémem velikost generovaných částic a také možný měřitelný rozsah přístrojů. Proto jsou tato data méně kvalitní, než jaká byla získána při měření na impaktorech PM2,5. U grafů popisujících impaktory PM10 je použito lineární proložení naměřených bodů. Lineární proložení výrazně zkresluje reálný průběh křivky účinnosti, ovšem toto zjednodušení je v aktuálním případě žádoucí. Je to z důvodu, že některé naměřené body jsou výrazně mimo očekávané hodnoty a při přesnějším proložení by mohlo docházet ke vzniku nesmyslných křivek.

Na obrázku 7.8 můžeme vidět naměřené hodnoty na impaktoru PM10 vyrobeného z materiálu PMMA. Zde jsou hodnoty účinnosti pro částice menší než 5 μm v oblasti nad 100 % účinnosti. To je samozřejmě reálně nemožné. Důvodem je, že na sání impaktoru není zařízení, jež by měřilo přesný počet částic na vstupu, a proto jsou použity pouze porovnávací hodnoty z referenčního měření. Skutečně je tedy graf posunutý dolů tak, aby maximální hodnota nedosahovala 100 %. U tohoto měření je globální průnik trendu mimo měřitelnou oblast a lokální hodnota se nachází přibližně na velikosti částice 6 μm . Pokud by byl graf posunutý níže nacházela by se tato hodnota také v okolí požadované účinnosti 50 % pro separovanou frakci. I přesto, že naměřené hodnoty trysky odpovídají teoretickým hodnotám tento impaktor nesplňuje požadovanou frakci PM10, ale separuje s největší pravděpodobností částice o velikosti v okolí 6 μm .

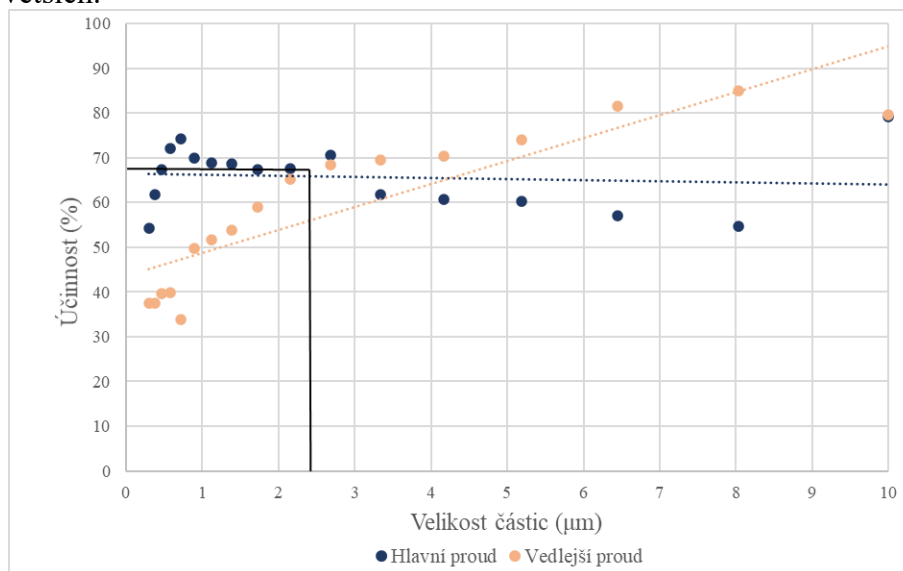


Obrázek 7.8 Křivky účinnosti separace PM10 (Plexi 1)

Následující graf na obrázku 7.9 zobrazuje opět impaktor z materiálu PMMA navržený pro separaci částic PM10. U tohoto impaktoru je výsledný průnik posunutý velmi doleva. Tato data ukazují průnik trendu v okolí velikosti částic 4 μm a lokální průnik přibližně 2,5 μm. Tento impaktor opět nesplňuje požadovanou separovanou frakci. Jeho použití by mohlo být pro separaci frakce v rozmezí 2,5 až 4 μm.

Dalo by se říci, že výsledky impaktorů vyrobených z materiálu PMMA jsou neuspokojivé, jelikož separovaná frakce se neblíží 10 μm při účinnosti 50 %. Pokud bychom vyhodnotili naměřené hodnoty pomocí bezrozměrných poměrů v tabulce 6.6 měly by impaktory vykonávat svou funkci správně, jelikož se hodnoty nachází v požadovaném rozmezí. Nyní je tedy nutné definovat možné příčiny těchto výsledků.

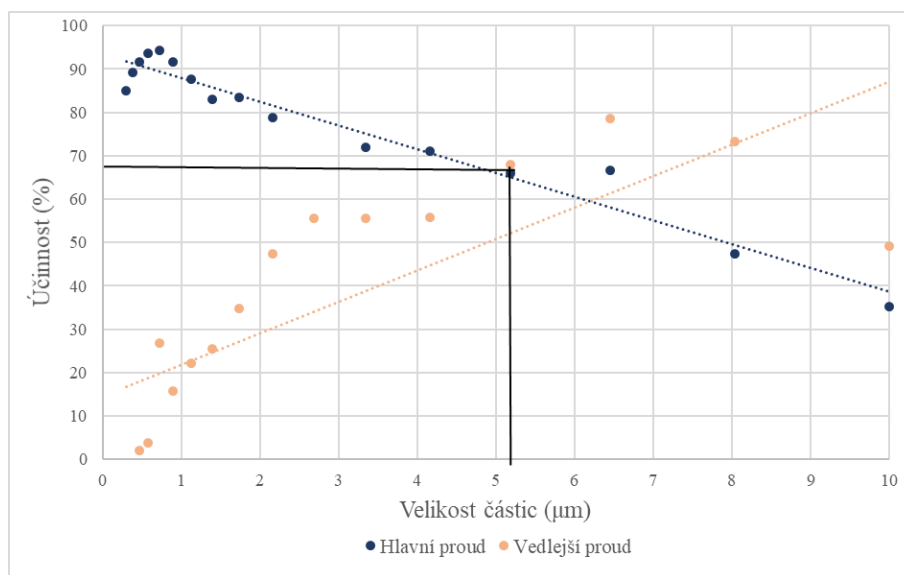
Důvodem může být použitý materiál. Plexisklo by mohlo na svém povrchu přitahovat jemné částice v důsledku vznikajících statických sil a tím výrazně měnit vlastnosti impaktoru. Další problémem mohou být horší vlastnosti povrchu po obrábění tohoto materiálu. Pravděpodobný důvod těchto výsledků by mohla představovat i absence větší koncentrace částic o velikosti 10 μm a větších.



Obrázek 7.9 Křivky účinnosti separace PM10 (Plexi 2)

Grafy na obrázcích níže ukazují výsledná data z měření impaktorů PM10 vyrobených z materiálu ESD. U těchto prototypů byly očekávány lepší výsledky separace, jelikož na jejich výrobu byl použit materiál, jež měl eliminovat ztráty vznikající statickým nábojem na stěnách průtočného kanálu. Ovšem přihlédneme-li opět k faktu, že generované částice byly v drtivé většině menších rozměrů jsou i zde výsledky poněkud matoucí. Oba impaktory mají trendy křivek tak, jak byly očekávány, tedy klesající pro hlavní proud a rostoucí pro vedlejší proud. Průnik je bohužel opět u částic s menšími aerodynamickými průměry. Tyto hodnoty i v těchto případech pak logicky neodpovídají požadované účinnosti 50 %, ale jsou vyšší.

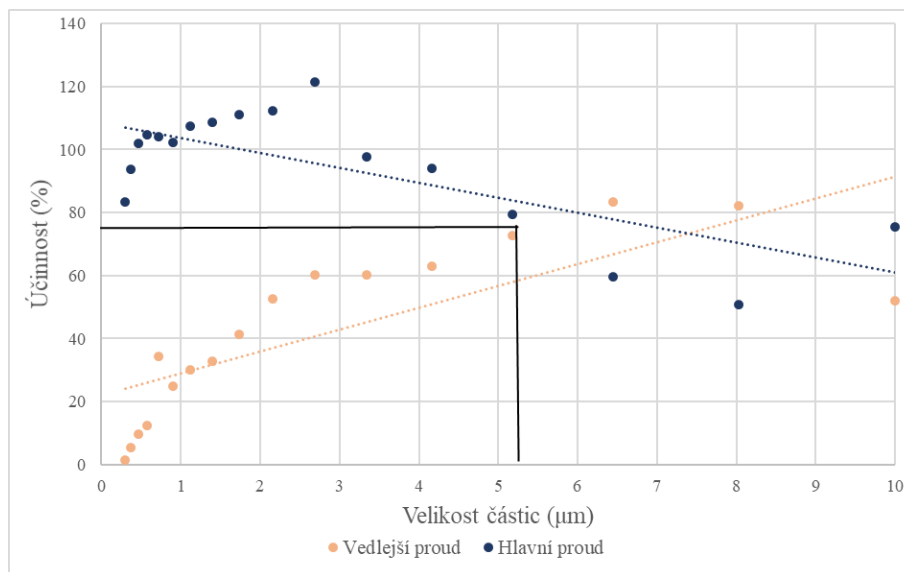
Prvním ze zkoumaných impaktorů z antistatického materiálu na obr. 7.10 je frézovaný impaktor. Poměry naměřených rozměrů trysky jsou v tomto případě opět v požadovaném rozmezí. Tyto hodnoty jsou velmi podobné naměřeným velikostem u impaktoru označeného jako Plexi1. Pokud bychom se nyní zaměřili na jejich vzájemné porovnání (obr. 7.8 a 7.10) nenajdeme zde příliš podobné výsledky. U provedení z PMMA materiálu bychom očekávali vyšší ztráty, ovšem u obou provedení jsou počátky křivek vedlejšího proudu obdobné, tedy toto tvrzení nelze potvrdit. U frézovaného ESD impaktoru se globální průnik trendu nachází při 60 % účinnosti přibližně v oblasti 6 μm . Lokální průnik nyní připadá na hodnotu o něco vyšší než 5 μm . Tyto výsledky, leč nejsou uspokojivé jsou stále lepší než pro materiál PMMA, tedy mohli bychom říct, že při stejných parametrech trysky bylo dosaženo věrohodnějších výsledků při použití antistatického materiálu.



Obrázek 7.10 Křivky účinnosti separace PM10 (ESD frézován)

Nyní bude vyhodnocen impaktor PM10 vyroben z ESD plastu pomocí 3D tisku (obr. 7.11). U tohoto impaktoru jsou opět účinnosti přesahující 100 %. Stejně jako tomu bylo u impaktoru na obr. 7.8 je tento fakt způsoben referenčními hodnotami koncentrace částic ve vstupním proudu. Tento fakt poměrně ztěžuje relevantní porovnání, ovšem některé výsledky je i přesto možné interpretovat.

Dosažené hodnoty z výroby jsou nyní při porovnání bezrozměrných kritérií trysky spíše ve vyšších hodnotách. Efekt, jaký by byl v tomto případě očekáván jsou nižší ztráty na stěnách ovšem za cenu zvýšení aerodynamického průměru separované frakce. U tohoto typu globální průnik dosáhl k velikosti částic 7,5 μm . Lokální průnik se nachází u hodnoty přibližně 5,2 μm a v obou případech s účinností v okolí 75 % (ta bude reálně menší). Očekávané zvětšení separovaných částic zde není dle předpokladů dosaženo.



Obrázek 7.11 Křivky účinnosti separace PM10 (ESD 3D tisk)

7.3.2 PM 2,5

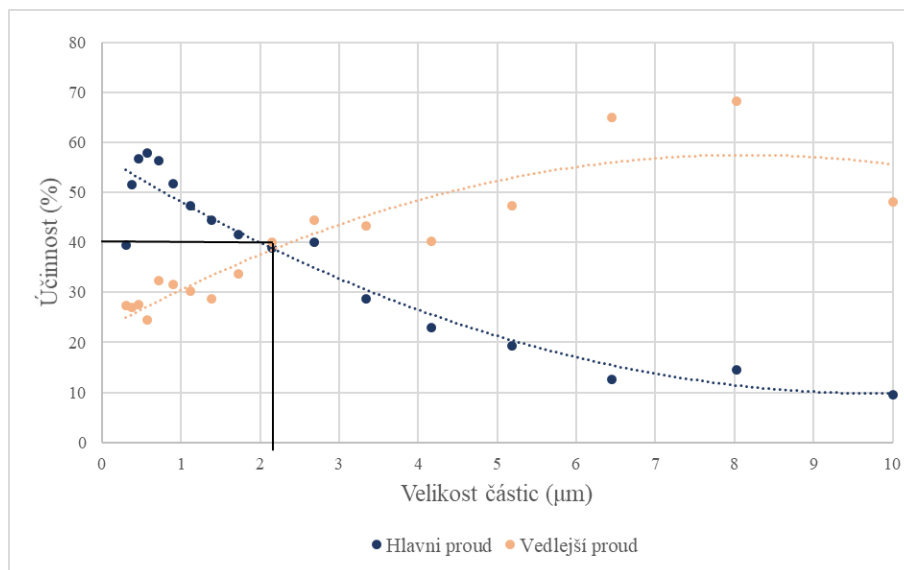
U impaktorů navržených k separaci částic s aerodynamickým průměrem 2,5 μm bylo k interpretaci dat využito záznamů z měření, které byly proloženy křivkou polynomu druhého řádu. V tomto případě byla volba vhodnější než lineární trend. Jelikož data z měření jsou vzhledem k většímu počtu generovaných částic v okolí 2,5 μm více spolehlivá a globální i lokální průnik jsou téměř totožné. Při těchto měřeních také nebyly zaznamenány odlehlé hodnoty, které by nepříznivě ovlivňovaly průběh křivky účinnosti v oblasti do 5 μm.

U impaktorů PM 2,5 byly naměřené charakteristické rozměry trysky pouhých 1,5 mm a z toho důvodu docházelo k vyšším ztrátám na stěnách v okolí trysky. Tento fakt lze u obou impaktorů potvrdit i z níže uvedených grafů. Křivka vedlejšího proudu začíná vždy u vyšších hodnot a její počátek ukazuje právě na zmíněné ztráty na stěnách.

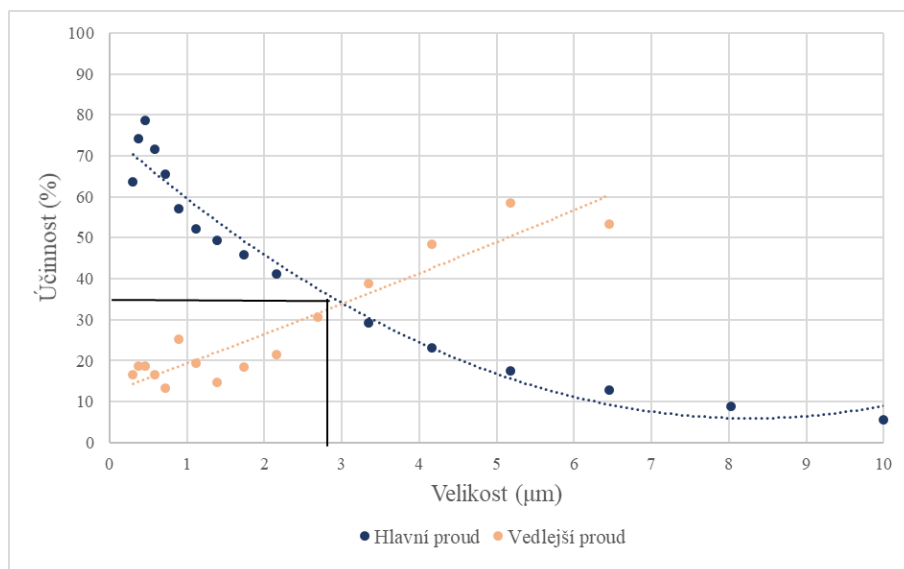
Dalším ukazatelem jsou charakteristické rozměry trysky, potažmo jejich poměry. V případě mnou zkonstruovaných impaktorů PM2,5 jsou tyto hodnoty téměř totožné. Rozdílný je pouze poměr L/W. Tato hodnota by měla ukazovat na zvýšený odklon proudnic od osy. Vyšší hodnota náleží impaktoru opatřenému rádiusem. Zde je diskutabilní, zda má na ztráty větší vliv tento poměr či rychlosti v hlavním proudu, které pro tento impaktor dosahují vyšších hodnot.

Obrázek 7.12 ukazuje křivky účinností impaktoru PM2,5 v provedení, kdy byl hlavní proud opatřen sražením 30 ° (viz. obrázek 6.4). Křivka vedlejšího proudu má počátek v okolí hodnot 25 %, které charakterizují ztráty na stěnách. V důsledku takto vysokých ztrát jsou křivky účinnosti posunuty do dolní části grafu a účinnost separace se výrazně snižuje. Toto provedení nemá příliš dobrý záchyt jemné frakce, která tak pokračuje do vedlejšího proudu. Pozitivní může být poměrně malý průchod velkých částic do hlavního proudu.

Pokud se ovšem zaměříme na separovanou frakci, která se nyní pohybuje přibližně v okolí 2,2 μm je tento výsledek velmi uspokojivý. I když je účinnost v těchto místech asi 40 %.



Obrázek 7.12 Křivky účinnosti separace PM2,5(1.0)



Obrázek 7.13 Křivky účinnosti separace PM2,5 (2.0)

Na následujícím grafu obr. 7.13 vidíme výsledky impaktoru sloužícího rovněž pro separaci frakce PM2,5, tentokrát je však hlavní proud opatřen rádiusem a plocha průtočného kanálu je menší. To má za následek vyšší rychlosti proudění v této oblasti. Z grafu lze usoudit, že vyšší rychlosti proudění v hlavním proudu mohou mít za následek snížení ztrát. V tomto případě totiž křivka účinnosti separace vedlejšího proudu začíná již na hodnotě asi 15 %. Z toho důvodu se zvýšily také celkové účinnosti separace, a to pro nejmenší měřené částice až k hodnotám 80 %. Při tomto měření dosáhly hodnoty účinnosti v hlavním proudu pro částice větší než 7 μm nereálných hodnot, proto nejsou v grafu uvedeny. Jelikož je požadovaný separovaný rozměr podstatně menší neměla by tato chyba mít vliv na vyhodnocení.

Jak již bylo uvedeno dříve, se zvyšující se rychlostí proudění s sebou strhává proud částice větší frakce. Tento fakt je ověřen i zde, jelikož oproti impaktoru PM2,5 (1.0) se aerodynamický průměr separovaných částic blíží ke 3 μm .

ZÁVĚR

Tuhé znečišťující látky jsou zařazeny do skupiny nejsilnějších polutantů ovzduší. Tomuto druhu znečištění nebyla dříve kladena příliš velká pozornost, a i nyní jsou částice, které mají rozměry do 1 μm v legislativě úplně opomíjeny s ohledem na přísnost emisních a imisních limitů. Zaměříme-li se na částice větší, tedy PM_{2,5} a PM₁₀, tak sice se na ně legislativa vztahuje, tyto limity mohou být považovány za nedostatečné v porovnání například s doporučeními Světové zdravotnické organizace. Děje se tak i přes fakt, že právě nejmenší částice mají na zdraví rostlin a živočichů nejhorší dopady. I to byl jeden z důvodů, proč tématem této práce je právě separace jemných částic. Jelikož povědomí o jejich přítomnosti v ovzduší a nebezpečí, jaké mohou představovat je vstupní podmínkou pro pochopení nutnosti jejich separace a případné měření koncentrací.

Prvním z cílů této práce bylo představení jemných částic jako jednoho ze základních polutantů ovzduší. Tomuto tématu byla věnována úvodní rešerše. Ta se mimo jiné zabývala obecně problémem kvality ovzduší a byly představeny také další znečišťující látky a zdroje, které mají jednotlivé typy znečišťování na svědomí. V další části byly podrobně představeny právě jemné částice. Zde byly uvedeny vlastnosti, jež jsou nezbytné pro jejich obecný popis a následně také pro výpočty například zařízení, jejichž úkolem je separovat částice. O těchto přístrojích bylo pojednáno v posledním úseku, jež se v této práci zabýval rešerší. Zde byly představeny možné technologie laboratorního zachytu jemných částic. Samostatná kapitola byla věnována metodě impakce, jež je charakteristická pro impaktory. Blíže byl pohled zaměřen na virtuální impaktory a jejich možné modifikace. U těchto zařízení byl popsán princip a techniky, díky nimž je intenzifikována jejich účinnost.

V praktické části práce byl představen návrh jednostupňového virtuálního impaktoru určeného k separaci jemných částic PM_{2,5} a PM₁₀. Úvodem tohoto návrhu byla teoretická rozvaha, jejímž výstupem byly základní parametry impaktoru. Tyto parametry byly především zvolený obdélníkový průřez průtočného kanálu, průtok pracovního média 6 l/min a hodnota bezrozměrného kritéria popisující chování částic v okolí překážky. Tedy Stokesovo číslo, jež bylo zvoleno jako 0,59. Na základě těchto veličin byla pomocí dříve zjištěných diagramů vyhodnocena teoretická účinnost separace a velikost ztrát na stěně vedlejšího proudu za tryskou.

Druhý krok návrhu spočíval v popsání vlastností pracovního média a následném zjištění hlavních rozměrů trysky impaktoru výpočtem. Výstupem z tohoto výpočtu byl rozměr W popisující šířku a dále rozměr H určující hloubku trysky impaktoru. Na základě těchto dvou hodnot byly následně určeny ostatní parametry impaktoru pomocí dříve zjištěných bezrozměrných kritérií, tedy poměrů mezi jednotlivými rozměry. Konstrukční návrh byl následně zpracován do výkresové dokumentace, která je součástí příloh této práce.

Dle vytvořené výkresové dokumentace bylo vyrobeno šest prototypů virtuálního impaktoru. Čtyři z těchto prototypů jsou určeny k separaci částic PM₁₀. Tato zařízení byla vyrobena jednak frézováním z materiálů PMMA a antistatického plastu, a také za využití technologie 3D tisku, rovněž z antistatického materiálu. Impaktory sloužící k separaci částic PM_{2,5} byly vyrobeny pouze technologií frézování, v obou případech z ESD plastu. U těchto dvou prototypů však byly změněny tvary výstupního hlavního proudu. V prvním případě je tento proud opatřen 30 ° sražením, které tvoří průtočný kanál o větším průřezu, tedy dává vzniknout menším rychlostem proudění za tryskou. Ve druhém případě je hlavní proud opatřen rádiusem R20, který průtočný kanál zužuje a důsledkem toho narůstá v místech za tryskou rychlost proudění nosného plynu.

Čtvrtým a zároveň posledním cílem této práce bylo ověření funkce mnou navržených impaktorů v laboratorních podmínkách. Tento cíl byl naplněn měřením koncentrace částic v hlavním a vedlejším proudu impaktoru. Naměřené hodnoty byly v zápětí využity při výpočtu účinností separace jednotlivých zařízení a vzájemnému porovnání.

Při konstrukci impaktoru sloužícího k separaci částic PM10 bylo mým snažením porovnat vliv použitých materiálů a dosažených poměrů na výslednou účinnost, potažmo na velikost ztrát na stěnách vedlejšího proudu. Obecně bylo měření těchto impaktorů problematické, jelikož bylo dosaženo malých rozměrů generovaných částic a limitní měřitelný rozměr použitých zařízení byl právě 10 μm . Z toho důvodu i data vycházející z měření jsou u impaktorů PM10 do značné míry nespolehlivá. I přes tyto problémy se mi podařilo porovnat impaktory nazvané dle použitých materiálů jako ESD a Plexi1. U těchto prototypů byly velmi podobné poměry v trysce a bylo tedy možné rozdílné vlastnosti přisoudit použitému materiálu. U impaktoru z ESD plastu jsou křivky účinnosti separace podstatně blíže požadovaným hodnotám oproti variantě z PMMA plastu. Tedy bylo prokázáno, že vliv statického náboje na částice je eliminován při použití antistatického materiálu. Dosažena velikost separovaných částic se pohybuje v rozmezí přibližně 5 až 6 μm při účinnosti necelých 70 %. Velikost účinnosti separace menší frakce pak přesahuje 90 %.

U varianty Plexi2 byly výsledky hůře porovnatelné vzhledem k rozdílným poměrům, ovšem tento prototyp dosahoval velmi malých průměrů separovaných částic. Tento výsledek byl značně neuspokojivý. Impaktor, který byl vyroben 3D tiskem z materiálu ESD dosahoval separované frakce v rozmezí 5-7,5 μm při účinnosti 75 %. U těchto výsledků je však nutná jistá míra skepse, jelikož hodnoty výsledné hodnoty byly v důsledku porovnávacího měření posunuty nad hodnotu 100 % účinnosti.

Podstatně lepších výsledků bylo dosaženo u impaktorů navržených k separaci částic PM2,5. U obou prototypů byly trendy křivek účinností očekávaných tvarů. U obou impaktorů byly rovněž hodnoty separované frakce velmi blízké požadované návrhové hodnotě 2,5 μm . Jediným zklamáním z dat byly poměrně nízké hodnoty účinnosti separace, jež byly způsobeny vlivem vysokých ztrát na stěnách vedlejšího proudu.

Jelikož bylo dosaženo výrobou velmi podobných hodnot charakteristických poměrů impaktorů určených k separaci částic PM2,5 je nyní možné poměrně přesně porovnat vliv tvaru hlavního proudu. Z měření je jasné patrné, že varianta, u které byly menší rychlosti proudění v hlavním proudu má velikost separované frakce posunutou k nižším hodnotám. S rychlostí proudění je prokazatelně spojen i fakt, že tento impaktor má větší ztráty na stěně vedlejšího proudu a tím pádem dosahuje u malých částic k nižším hodnotám účinnosti separace.

U impaktoru, kde byl tvar hlavního proudu opatřen rádiusem, který tak zmenšil průřez průtočného kanálu a zvýšil v tomto místě rychlost proudění je dosahováno opačných výsledků. V tomto případě je velikost separované frakce posunuta do větších hodnot do blízkosti 3 μm . Je to způsobeno přisáváním větších částic vlivem vyšších rychlostí proudění. Dále je pak dosaženo menších ztrát na stěně vedlejšího proudu. Tento fakt napomáhá zvýšené účinnosti separace, jež pro menší frakce dosahuje až k hodnotě 80 %.

Pokud by bylo prováděno obdobné měření znovu bylo by dobré u impaktoru určeného k separaci částic PM10 zvětšit velikost generovaných částic a použít přístroj s větším měřitelným rozsahem, aby výsledky byly věrohodnější. Vývoj virtuálního impaktoru by pak v budoucích prototypích bylo zajímavé navrhnout pro aplikace, kde požadovaná separovaná frakce dosahuje podstatně menších rozměrů. Například by se tak mohly tyto zařízení využít při separaci virů, jež dosahují velikostí v desetinách mikrometru.

8 Citovaná literatura

- [1] OBROUČKA, Karel. *Ochrana ovzduší I.: (zdroje a látky znečišťující ovzduší)*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola podnikání, 2003. ISBN 80-86764-00-1. Dostupné také z: <http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:03216470-28c3-11e2-a433-005056827e52>
- [2] Zpráva o životním prostředí České republiky 2020. *Cenia.cz-publikace* [online]. 2020 [cit. 2022-01-22]. Dostupné z: <https://www.cenia.cz/publikace/zpravy-o-zp/>
- [3] ANDREOVSKÝ, Jan, Vladimíra HENELOVÁ, ed. *Příručka ochrany kvality ovzduší*. Vyd. 1. Praha: Sdružení společností IREAS centrum, 2013. ISBN 978-80-86832-77-7.
- [4] SKÁLA, Zdeněk. *Ekologie v energetice*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1994. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0477-9.
- [5] INFORMACE O ZDRAVOTNÍCH RIZICÍCH SPOJENÝCH S KVALITOU OVZDUŠÍ V ROCE 2020. In: *Informace o zdravotních rizicích spojených s kvalitou ovzduší* [online]. Ministerstvo životního prostředí, s. 7-24 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/\\$FILE/OOO-zdravotni_rizika_2020-20220105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kvalita_ovzdusi/$FILE/OOO-zdravotni_rizika_2020-20220105.pdf)
- [6] PETRLÍK, Jindřich a kol. Amoniak. In: *ARNIKA* [online]. [cit. 2022-02-01]. Dostupné z: <https://arnika.org/amoniak-cpavek>
- [7] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. *Základy ochrany ovzduší*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03922-9.
- [8] Znečištění ovzduší na území české republiky v roce 2019: Suspendované částice. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2020 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/19groc/gr19cz/04_1_PM_v1.pdf
- [9] Znečištění ovzduší na území české republiky v roce 2020: Suspendované částice. In: *Český hydrometeorologický ústav* [online]. 2021 [cit. 2022-01-28]. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/20groc/gr20cz/20_04_1_PM_v2.pdf
- [10] Particulate Matter (PM) Pollution: Particulate Matter (PM) Basics. In: *United States Environmental Protection Agency* [online]. 2021 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [11] HEMERKA, Jiří. *Odlučování tuhých částic*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01088-0.
- [12] ČSN EN ISO 23210. *Stacionární zdroje emisí - Stanovení hmotnostní koncentrace frakce PM10/PM2,5 v odpadní plynu - Stanovení nízkých koncentrací pomocí impaktorů*. 2010.
- [13] ČSN ISO 7708. *Kvalita ovzduší - Definice velikostních frakcí částic pro odběr vzorků k hodnocení zdravotních rizik*. 1998.
- [14] Ambient (outdoor) air pollution: Particulate matter. In: *World Health Organization* [online]. 2021 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: [https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [15] *Zákon o ochraně ovzduší*. In: . č. 201/2012 Sb. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/9F4906381B38F7F6C1257A94002EC4A0/%24file/201_2012.pdf

- [16] Vyhláška o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. In: . 415/2012 Sb. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/AE682A6B5E42E986C1257BA60025D8B5/%24file/V%20415_2012.pdf
- [17] ČSN EN 1822-1. *Vysoce účinné filtry vzduchu (EPA, HEPA a ULPA) - Část 1. Klasifikace, ověřování vlastností, označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. Třídící znak 12 5002.
- [18] WHITE, Ed. HEPA and ULPA Filters. *Journal of Validation Technology*. New York: MultiMedia Healthcare Inc, 2009, **15**(3), 48-54. ISSN 10796630. Dostupné také z: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/hepa-ulpa-filters/docview/205489363/se-2?accountid=17115>
- [19] HEPA a ULPA filtr. In: *Brabec vzduchotechnika* [online]. 2022 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.brabec-vzt.cz/filtry/hepa-a-ulpa>
- [20] MARPLE, Virgil A. History of Impactors—The First 110 Years. *Aerosol Science and Technology*. Taylor & Francis, 2004, **38**(3), 247-292. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786820490424347
- [21] MARPLE, Virgil A. *A Fundamental Study of Inertial Impactors*. 1970. Ph.D. Thesis. University of Minnesota, Particle Technology laboratory. Publ. No. 144.
- [22] NICHOLS, Steve, Jolyon MITCHELL, C SHELTON a Daryl ROBERTS. Good Cascade Impactor Practice (GCIP) and Considerations for “In-Use” Specifications. *AAPS PharmSciTech*. 2013, **14**. Dostupné z: doi:10.1208/s12249-012-9905-1
- [23] MARPLE, Virgil A. a Klaus WILLEKE. INERTIAL IMPACTORS: THEORY, DESIGN AND USE: In: *Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis*. Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis [online]. Academic Press, 1976, s. 411-446 [cit. 2021-11-13]. ISBN 978-0-12-452950-2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-452950-2.50023-3>
- [24] TRAKUMAS, S a E SALTER. Parallel particle impactor – novel size-selective particle sampler for accurate fractioning of inhalable particles. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2009, **151**, 012060. ISSN 1742-6596. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/151/1/012060
- [25] MARPLE, Virgil A. a Chung M. CHIEN. Virtual impactors: a theoretical study.: a theoretical study. *Environmental Science & Technology*. American Chemical Society, 1980, **14**(8), 976-985. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es60168a019
- [26] NOVICK, V. J. a J. L. ALVAREZ. Design of a Multistage Virtual Impactor. *Aerosol Science and Technology*. Taylor & Francis, 1987, **6**(1), 63-70. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786828708959120
- [27] LEE, Handol, Dae-Hyeon JO, Won-Geun KIM, Se-Jin YOOK a Kang-Ho AHN. Effect of an Orifice on Collection Efficiency and Wall Loss of a Slit Virtual Impactor. *Aerosol Science and Technology*. 2014, **48**. Dostupné z: doi:10.1080/02786826.2013.862333
- [28] LIM, Jun-Hyung, Daeui PARK a Se-Jin YOOK. Development of a multi-slit virtual impactor as a high-volume bio-aerosol sampler. *Separation and Purification Technology*. 2020, **250**, 117275. ISSN 1383-5866. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117275>

- [29] BOULTER, J. E., D. J. CZICZO, A. M. MIDDLEBROOK, D. S. THOMSON a D. M. MURPHY. Design and Performance of a Pumped Counterflow Virtual Impactor. *Aerosol Science and Technology*. Taylor & Francis, 2006, **40**(11), 969-976. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786820600840984
- [30] WANG, Yong, et al. A Miniature System for Separation and Detection of PM Based on 3-D Printed Virtual Impactor and QCM Sensor. *IEEE sensors journal* [online]. IEEE, 2018, **18**(15), 6130-6137 [cit. 2021-11-22]. ISSN 1530-437X. Dostupné z: doi:10.1109/JSEN.2018.2844876
- [31] MARPLE, Virgil a Klaus WILLEKE. INERTIAL IMPACTORS: THEORY, DESIGN AND USE. *Fine Particles: Aerosol Generation, Measurement, Sampling, and Analysis* [online]. Academic Press, 1976, s. 411-446 [cit. 2021-11-13]. ISBN 978-0-12-452950-2. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-0-12-452950-2.50023-3
- [32] LOO, Billy W. a Christopher P. CORK. Development of High Efficiency Virtual Impactors. *Aerosol Science and Technology* [online]. 1988, (93), 167-176 [cit. 2021-11-22]. Dostupné z: doi:10.1080/02786828808959205
- [33] *Model 3079 Portable Atomizer Aerosol Generator: Operation and Service Manual*. P/N 1930070, Revision D. 2010.
- [34] *Optical Partical Sizer Model 3330: Spec Sheet*. P/N 5001324 Rev D. TSI Incorporated, 2020.
- [35] *Promo 2000 SERIES: Instruction manual*. Version V003072015. © PALAS.
- [36] POENAR, Daniel Puiu. Microfluidic and Micromachined/MEMS Devices for Separation, Discrimination and Detection of Airborne Particles for Pollution Monitoring. *Micromachines* [online]. VALENS Centre for Bio Devices and Signal Analysis, School of Electrical & Electronic Engineering (EEE), Nanyang Technological University (NTU), 50 Nanyang Avenue, Singapore 639978, Singapore. epdpuiu@ntu.edu.sg, 2019, **10**(7) [cit. 2022-04-03]. ISSN 2072-666X. Dostupné z: doi:10.3390/mi10070483
- [37] FINLAYSON-PITTS, Barbara J. a James N. PITTS. *CHAPTER 11 - Analytical Methods and Typical Atmospheric Concentrations for Gases and Particles*. San Diego: Academic Press, 2000, s. 547-656. ISBN 978-0-12-257060-5. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-012257060-5/50013-7
- [38] WELKER, Roger W. *Chapter 4 - Size Analysis and Identification of Particles*. Oxford: William Andrew Publishing, 2012, s. 179-213. ISBN 978-1-4377-7883-0. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7883-0.00004-3

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol	Veličina	Jednotka
C	Cunninghamův korekční součinitel	(-)
D	charakteristický rozměr	(m)
D_{ξ}	průměr částice	(m)
H	hloubka trysky	(m)
M	molární hmotnost vzduchu	(kg/mol)
N_H	počet částic v hlavním proudu	(n/cm ³)
N_{HREF}	referenční počet částic hlavního proudu	(n/cm ³)
N_V	počet částic ve vedlejším proudu	(n/cm ³)
N_{VREF}	referenční počet částic vedl. proudu	(n/cm ³)
Q	průtok	(m ³ /s)
R	molární plynová konstanta vzduchu	(J/K·mol)
Re	Reynoldsovo číslo	(-)
Stk	Stokesovo číslo	(-)
S_{μ}	Sutherlandova konstanta	(K)
T	termodynamická teplota	(K)
T_n	teplota pro normální podmínky	(K)
W	charakteristický rozměr trysky	(m)
g	tíhové zrychlení	(m/s ²)
p	tlak pro normální podmínky	(Pa)
r	plynová konstanta vzduchu	(J/kg·K)
v	rychlost proudění v trysce	(m/s)
w_s	pádová rychlost	(m/s)
η	dynamická viskozita vzduchu	(Pa·s)
η_H	účinnost separace hlavního proudu	(-)
η_V	účinnost separace vedlejšího proudu	(-)
η_n	dynamická viskozita vzduchu pro norm. podmínky	(Pa·s)
λ	střední volná dráha molekul	(m)
ν	kinematická viskozita	(m ² /s)
ρ	hustota vzduchu	(kg/m ³)
ρ_{ξ}	hustota částice	(kg/m ³)
χ	dynamický tvarový faktor pro nekulové částice	(-)

SEZNAM PŘÍLOH

1. Výkres sestavy
2. Výkres těla impaktoru PM10
3. Výkres těla impaktoru PM2,5 1.0
4. Výkres těla impaktoru PM2,5 2.0
5. Výkres víčka