



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## LEVNÉ PŘÍSTROJE PRO MĚŘENÍ ČISTOTY OVZDUŠÍ

LOW-COST SENSORS FOR MEASUREMENT OF PARTICULATE MATTER

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michaela Dvořáková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2019



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav  
Studentka: **Michaela Dvořáková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojírenství  
Vedoucí práce: **Ing. František Lízal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2018/19

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

## Levné přístroje pro měření čistoty ovzduší

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti začíná bouřlivý rozvoj senzorů pro měření čistoty ovzduší. Lze předpokládat, že se objeví velká vlna zájmu o tyto přístroje vzhledem k razantnímu snížení jejich ceny. Podstatnou otázkou však je kvalita výsledků naměřených těmito levnými přístroji. Student/ka provede rešerši dostupné literatury a výrobců, popíše principy měření a navrhne způsob ověření nových přístrojů.

### Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši principů měření množství aerosolových částic v ovzduší, zhodnotit jednotlivé způsoby měření z hlediska přesnosti a cenové náročnosti.

Sestavit vhodnou experimentální trať pro porovnání dražších a kvalitnějších přístrojů s levným přístrojem.

Vyhodnotit výsledky měření a doporučit vhodné oblasti použití levných přístrojů, identifikovat limity low-cost řešení.

### Seznam doporučené literatury:

HINDS, W. C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, And Measurement Of Airborne Particles, Wiley-interscience, 1999, 504 p.

PAVELEK, M., ŠTĚTINA, J.: Experimentální metody v technice prostředí. Skripta VUT, Brno, 2007.

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

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá studiem a porovnáním různých typů levných přístrojů pro měření kvality ovzduší. Objasňuje principy měření aerosolových částic a přibližuje důvody použití levných čítačů. Poskytuje základní informace o dopadu aerosolů na lidské zdraví. V experimentální části této práce je provedeno porovnání kvality výsledků naměřených těmito přístroji vzhledem k jejich ceně.

## **Klíčová slova**

Aerosol, levné čítače, hmotnostní koncentrace, velikost částic, počet částic, kvalita ovzduší

## **Abstract**

This work focuses on the research and comparison of several types of low-cost sensors for measurement of particulate matter. It clarifies the principles of aerosol particles measurement and focuses on the reasons of using low-cost sensors. It provides basic information about the impact of aerosols on human health. The experimental part of this work compares quality of the obtained results considering the price of the respective devices.

## **Key words**

Aerosol, low-cost sensors, mass concentration, particle size, particle count, air quality

## **Bibliografická citace**

DVOŘÁKOVÁ, Michaela. *Levné přístroje pro měření čistoty ovzduší*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117138>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Ing. František Lízal, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Františka Lízala, Ph.D. a použila jsem pouze podklady uvedené v seznamu citované literatury.

V Brně dne.....Podpis:.....

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Františku Lízalovi, Ph.D. za jeho pomoc, čas, cenné rady a vstřícnost při konzultacích. Dále bych chtěla poděkovat Mgr. Jiřímu Šperkovi, Ph.D. z Českého metrologického institutu za pomoc při experimentu a všem, kteří se mnou sdíleli svoje zkušenosti.



# Obsah

Úvod .....	11
<b>I Teoretická část.....</b>	<b>12</b>
1 Aerosoly .....	12
2 Znečištění ovzduší.....	15
2.1 Vliv na lidské zdraví.....	15
2.1.1 Aerosoly .....	16
2.1.2 Další škodliviny.....	17
3 Měření aerosolů.....	18
3.1 Optické vlastnosti částic .....	18
3.1.1 Rozptyl světla .....	18
3.2 Mikroskopická analýza.....	19
3.3 Gravimetrická metoda .....	21
3.4 Setrvačné vlastnosti částic .....	21
4 Levné čítače.....	23
<b>II Experimentální část.....</b>	<b>25</b>
5 Použité přístroje.....	25
5.1 Dienmern .....	25
5.2 Trotec PC220.....	25
5.3 Laser Detector PMS5003 G5.....	26
5.4 Temtop M2000C.....	27
5.5 Xiaomi JCY01ZM .....	27
5.6 CEM DT-321S.....	28
5.7 AeroTrak 9310.....	28
5.8 Zeiss Axio Imager.M2m.....	29
6 Popis experimentu .....	30
6.1 Měření ostatních parametrů .....	30
6.2 Měření částic ve vnitřním prostředí.....	30
6.3 Měření s velmi čistým vzduchem .....	32
6.4 Měření částic ve venkovním prostředí.....	33
7 Výsledky měření .....	34
7.1 Měření ostatních parametrů .....	34
7.2 Měření částic ve vnitřním prostředí.....	36

7.3	Měření s velmi čistým vzduchem .....	40
7.4	Měření ve venkovním prostředí.....	41
8	Diskuze.....	43
9	Závěr.....	45
10	Seznam použitých zdrojů .....	46
	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	49
	Seznam tabulek .....	50
	Seznam obrázků .....	50
	Seznam grafů.....	51
	Seznam příloh.....	51

## Úvod

Výskyt aerosolů v ovzduší je mnohdy opomíjen, a to zejména proto, že menší a zdraví škodlivé částice nejsou lidským okem viditelné. V současné době roste zájem o kvalitu ovzduší a její monitorování nejen prostřednictvím venkovních měřicích stanic, ale i v domácnostech. Vzhledem k této skutečnosti se začínají rozvíjet přístroje monitorující znečištění okolního prostředí, které jsou zároveň cenově dostupné široké veřejnosti.

Aerosoly jsou nedílnou součástí atmosféry Země. Mají vliv na lidské zdraví i na znečištění ovzduší. Vlivem rozvoje průmyslu se začalo projevovat zhoršení kvality prostředí kolem nás, což vedlo k nárůstu pozornosti o tuto oblast. Následovalo zavedení emisních a imisních limitů a regulace produkce aerosolů.

Měření aerosolů lze provádět několika způsoby. Levné čítače využívají zejména jejich optické vlastnosti, jelikož tato metoda vyhodnocování umožňuje výrazně snížit finanční náklady. Výsledné hodnoty jsou nejčastěji uváděny v hmotnostních koncentracích nebo počtech částic v předem definovaných velikostních třídách v daném objemu. Cenový rozdíl mezi levnými a drahými přístroji se pohybuje v řádech desetitisíců, někdy i statisíců korun.

# I Teoretická část

## 1 Aerosoly

Aerosoly, označovány také jako suspendované částice, lze definovat jako dvoufázovou směs pevných a kapalných látek v plynu, obvykle vzduchu, ve kterém jsou rozptýleny. Můžeme se setkat s pojmy primární a sekundární aerosol. U primárního aerosolu jsou vypouštěny do ovzduší už směsi suspendovaných částic, na rozdíl od druhotného, kde se jednotlivé komponenty v atmosféře teprve slučují. Dále rozlišujeme aerosoly homogenní, což znamená stejné chemické složení pro všechny částice, nebo heterogenní (Hinds, 1999).

Typy aerosolů:

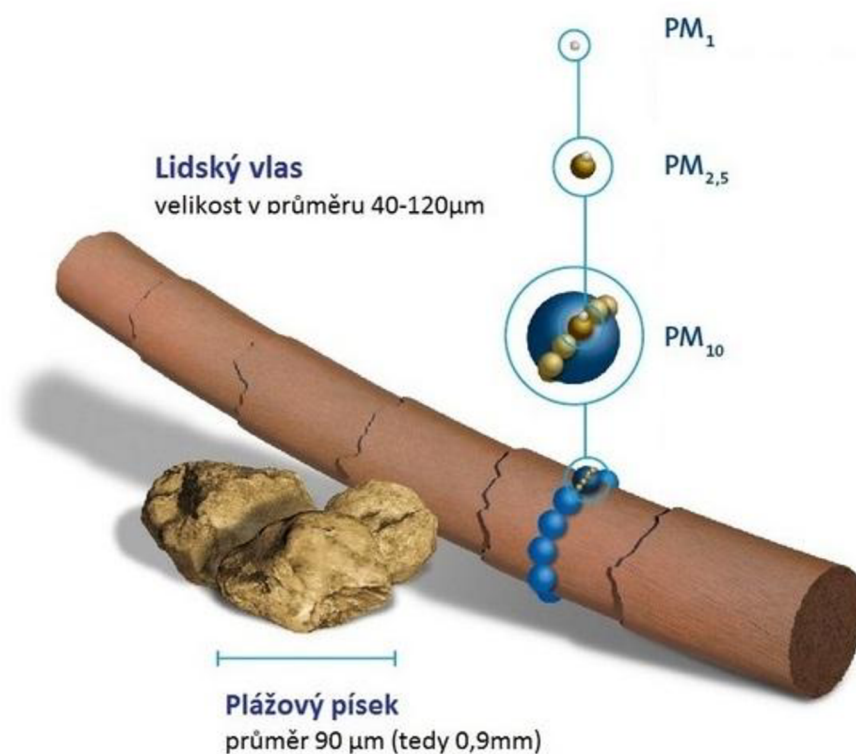
- **Bioaerosoly** – Neboli aerosoly biologického původu. Mohou v nich být obsaženy viry, bakterie, spory hub nebo pyly. Lze je považovat také za přenašeče virových onemocnění. Způsobují astma, alergické reakce či infekční choroby (Fuzzi et al., 2015).
- **Prach** – Pevné částice vzniklé většinou mechanickým rozpadem látek a materiálů, například sopečnou erupcí, nebo také drcením či broušením. Rozměry částic prachu se pohybují od velikostí menších než 1  $\mu\text{m}$  po 100  $\mu\text{m}$ .
- **Sprej** – Mechanickým dělením kapalin se vytváří kapičky aerosolů, kterým se říká sprej. Jejich velikost přesahuje několik mikrometrů.
- **Dým** – Vzniká jako plynný produkt spalování nebo při zkapalňování par, je tvořen pevnými částicemi, které jsou menší než 0,05  $\mu\text{m}$ . Ve většině případů se shlukují do skupin nebo řetězců tvořených primárními aerosoly. Nutno podotknout, že se toto vymezení liší od obvyklé definice dýmu jako škodlivé znečišťující látky v ovzduší.
- **Kouř** – Je produktem nedokonalého spalování. Tyto aerosoly mohou být pevné nebo kapalné, v průměru jsou menší než 1  $\mu\text{m}$  a hromadí se podobně jako dým.
- **Smog** – Jedná se o všeobecně známý pojem pro viditelné znečištění ovzduší. Aerosoly utvořené reakcí uhlovodíků a oxidů dusíku za přítomnosti slunečního záření se pak nazývají fotochemický smog. Tento druh smogu má největší vliv na vegetaci a lidské zdraví. Rozměr částic se pohybuje v rozmezí 1 až 2  $\mu\text{m}$  (Hinds, 1999).

### 1.1 Popis aerosolů

Aerosoly mohou být charakterizovány podle tvaru, velikosti a chemického složení. Vzhledem k zanedbatelnému podílu pevných částic v hmotnosti aerosolů se mohou viskozita a hustota aerosolu určovat stejným způsobem jako u vzduchu. Pro jejich studování je nutno na ně nahlížet z mikroskopického hlediska (Hinds, 1999).

Pro popis aerosolů je využíván jejich aerodynamický průměr, označován jako  $d_p$ , který charakterizuje jejich pohyb ve vzduchu i vliv na lidské zdraví. Tento průměr je nazýván obecně jako velikost aerosolu (Euro, WHO, 2003).

Rozměry částic aerosolu se pohybují od 0,002  $\mu\text{m}$  až po 100  $\mu\text{m}$ . Podle toho se dělí do frakcí s označením  $\text{PM}_x$  (Particulate Matter), kde  $x$  je označení daného průměru částice. Nejběžnějšími třídami jsou  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{1,0}$  čili částice, které mají průměr 10  $\mu\text{m}$ , 2,5  $\mu\text{m}$  a 1,0  $\mu\text{m}$  (Hinds, 1999). Na Obrázku 1 lze vidět porovnání velikostí  $\text{PM}_{1,0}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{PM}_{10}$ , lidského vlasu a zrnka písku.

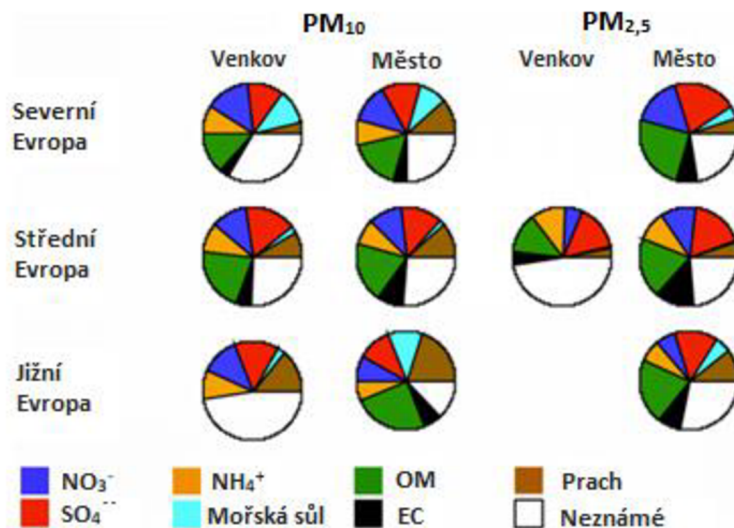


**Obrázek 1 - Porovnání velikostí částic aerosolů s reálnými objekty (DFP CAT, 2018)**

Velmi často se také měří hmotnostní koncentrace aerosolů. Je důležitá pro další výpočty, například k zjištění vlivu na lidské zdraví a životní prostředí. Uvádí se v  $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$  a  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , čili hmotnost částic na jednotku objemu. Dále se zjišťuje početní koncentrace, množství částic na jednotku objemu. Je vyjádřena jako hodnota  $\cdot\text{cm}^{-3}$  nebo hodnota  $\cdot\text{m}^{-3}$  a s její pomocí bývá vyjadřována koncentrace bioaerosolů a vláken (Hinds, 1999).

Atmosférické aerosoly jsou tvořeny zejména anorganickými ionty, jako jsou dusičnanové anionty nebo síranové a amonné ionty. Menší podíl chemického složení potom zaujímá například minerální prach či mořská sůl. Markantní část aerosolů v atmosféře tvoří uhlíkaté aerosoly. Uhlík se v nich vyskytuje v elementární a organické formě. Elementární uhlík (EC – Elemental Carbon) je běžnou složkou atmosférického aerosolu s  $d_p$  menším jak 2,5  $\mu\text{m}$ . Jedná se o sloučeninu uhlíkatých látek obsahujících mnoho funkčních skupin (fenolovou, alkoholovou, apod.), která vzniká při nedokonalém spalování. Organický uhlík (OC – Organic Carbon) je tvořen množstvím organických sloučenin. Jeho vznik je spojen s antropogenním spalováním i s přírodní činností, například lesní požár nebo sopečná činnost (Cyrus et al., 2003). Aerosoly jsou vzorkovány na křemenných filtrech, aby mohlo následovat jejich analyzování pomocí termo-optické analýzy, která spočívá v podmínkách uvolňování uhlíku při zahřívání. Vychází z předpokladu, že OC se uvolní při zvýšení teploty a není nutná

přítomnost kyslíku, zatímco EC ke svému uvolnění kyslík potřebuje (Chemické listy, 2017). Obrázek 2 ukazuje průměrné složení částic  $PM_{2,5}$  a  $PM_{10}$  ve městech a na venkově po celé Evropě. Pojmem OM se rozumí organické částice (Organic Matter), což je víceméně organická forma uhlíku (Fuzzi et al., 2015).



Obrázek 2 - Průměrné složení  $PM_{2,5}$  a  $PM_{10}$  po celé Evropě (Fuzzi et al., 2015)

## 2 Znečištění ovzduší

Znečištění ovzduší je v dnešní době velmi diskutované a důležité téma. Dochází k němu například spalováním paliv, výrobou energie pomocí elektráren nebo reakcí mezi jednotlivými látkami. Je to nežádoucí výsledek, který může mít dopad na lidské zdraví, ekosystémy, materiály i vegetaci.

Obecně se znečišťování ovzduší dělí na antropogenní a přirozené. Přirozené zahrnuje sopečnou činnost, prашné bouře a jiné přírodní děje. Markantní podíl je ale přisuzován lidské činnosti, což je označováno jako znečišťování antropogenní. To zahrnuje práci různých externích technologických zařízení (doprava, průmyslová výroba, spalování aj.), materiály, ze kterých se v prostředí uvolňují škodlivé látky i zařízení techniky prostředí a procesy v něm probíhající. Ovlivnění kvality ovzduší probíhá nejenom v nejbližší oblasti zdroje znečištění, ale i ve vzdálenějším okolí (Pavelek, Štětina, 2007).

Přítomnost škodlivých látek v prostředí neboli stav znečištění se nazývá imise. Přístroje, kterými se imise měří, by měly být více citlivé, jelikož jsou situovány ve větší vzdálenosti od zdroje, kde je koncentrace vylučovaných látek nižší. Samotný proces znečišťování se pak označuje jako emise. Měření probíhá přímo v místě vzniku imisí, proto je nutné používat zařízení s velkým rozsahem kvůli vysokému množství škodlivin. Nejvyšší povolené hodnoty neboli imisní a emisní limit, jsou legislativně ukotvené v právních normách každé země (Pavelek, Štětina, 2007).

Škodlivé látky se mohou v ovzduší objevovat ve všech skupenstvích. V případě tuhých látek se užívá obecného označení: prach (Pavelek, Štětina, 2007). Do plynného skupenství se řadí znečištěné látky v podobě par a plynů. Mezi nejznámější patří oxid uhelnatý, velmi jedovatý plyn tvořící se při spalování plynných uhlíkatých paliv. Oxid siřičitý, taktéž jedovatý plyn vznikající při spalování síry pro výrobu kyseliny sírové a oxidy dusíku, které pochází z chemických procesů. Dalšími příklady škodlivin mohou být aerosoly, polycyklické aromatické uhlovodíky, ozón, čpavek, sirovodík, a jiné (Braniš, Hůnová, 2009). Agentura pro ochranu životního prostředí (EPA) stanovila šest základních škodlivin, které mají výrazný vliv na zdraví člověka a životní prostředí, tj. ozón, oxid uhelnatý, aerosol, oxid dusičitý, oxid siřičitý a olovo (Williams et al., 2014).

### 2.1 Vliv na lidské zdraví

Zhodnocení dopadu znečištění ovzduší na lidské zdraví se provádí dvěma základními způsoby. Prvním je porovnání kvality ovzduší s legislativně stanovenými limitními hodnotami imisí. Druhou možností je v předem vymezených kategoriích městských oblastí zpracovat a zhodnotit stav znečištění. U každého měřicího zařízení je určeno, zda se v jeho okolí vyskytuje zdroj s výrazným vlivem na kvalitu ovzduší (např. elektrárna), podíl každého zdroje vytápění a velikost vlivu okolní dopravy. Podle těchto kritérií je pak daná oblast zařazena do kategorie, pro kterou se měření provádí (SZÚ, 2018).

Dopad kvality ovzduší na zdravotní stav člověka záleží nejen na schopnosti dané látky působit na lidské zdraví, ale i na době a množství, kterému je jedinec vystaven. Zdravotní riziko je ovlivněno i životním stylem, povoláním nebo prostředím, ve kterém jedinec žije (SZÚ, 2018).

### 2.1.1 Aerosoly

Aerosol je z velké části nežádoucím výsledkem lidské činnosti. Může vznikat přirozeně, například při přírodním požáru, avšak nejvýznamnějším zdrojem jsou spalovací procesy. Aerosolové částice ve vzduchu, které člověk vdechuje, mají dopad jak na dýchací soustavu, tak na kardiovaskulární systém. Účinek je ovlivněn jejich velikostí, tvarem, chemickým složením a i tím, co absorbují. Větší částice zůstanou hned na začátku dýchacích cest, většinou v chloupkách v nose. Ty s průměrem menším než 10  $\mu\text{m}$  se mohou dostat do průdušek a aerosoly menší než 1  $\mu\text{m}$  projdou až do plicních sklípků (IRZ, 2014). Jedním ze zásadních onemocnění, na jehož vzniku se mohou částice PM podílet, je rakovina plic, jelikož mohou absorbovat látky způsobující rakovinné bujení. Mezi prokázané látky vyvolávající proces tvorby rakovinných buněk byly aerosoly zařazeny v roce 2013 Mezinárodní agenturou pro výzkum rakoviny (IARC), která spadá pod Světovou zdravotnickou organizaci (WHO) (SZÚ, 2018).

Vlivem dlouhodobého vystavení působení aerosolů vznikají i další závažná onemocnění, jako například snížení funkce plic nebo tvorba symptomů chronického zánětu průdušek. V současnosti se diskutuje i o zapříčinění vzniku 2. typu diabetu a poruch nervového systému u dětí i dospělých. Dopad krátkodobé expozice aerosolům se projevuje především u zvýšení počtu léčených osob s dýchacími nebo srdečně-cévními obtížemi, u jedinců s astmatickým onemocněním, a to zhoršením jejich stavu, a také na úmrtnosti kojenců (SZÚ, 2017).

Hraniční množství aerosolu není přesně stanoveno. Dostupné výzkumy prokazují, že hospitalizovaní pacienti byli vystaveni i velmi malé koncentraci částic PM. Imisní limity se udávají nejčastěji pro frakce  $\text{PM}_{10}$  a  $\text{PM}_{2,5}$ . U částic  $\text{PM}_{10}$  je stanovena nejvyšší povolená hodnota 40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  za rok a 50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  za den, které nesmí být přesáhnuto více jak 35krát za rok. Maximum částic  $\text{PM}_{2,5}$  je 25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  ročně (SZÚ, 2018).

Aerosoly jsou v dnešní době označovány jako markantní environmentální činitel mající vliv na mortalitu<sup>1</sup>. Dle měření Státního zdravotního ústavu v letech 2011-2017 se počet zemřelých odhadem zvedl o 4,5 % na každých 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  pro průměrnou část  $\text{PM}_{2,5}$  v  $\text{PM}_{10}$ . Samotná frakce  $\text{PM}_{10}$  zvýšila přirozenou úmrtnost o 4,47 % u osob ve věku nad 30 let. Předpokládaný počet osob, které zahynuly příčinou dlouhodobého vystavení částicím  $\text{PM}_{10}$  za rok 2017, byl stanoven z celkového počtu zesnulých dospělých nad 30 let z databáze ČSÚ (Český statistický úřad), od kterého byla odečtena úmrtí způsobena vnějšími okolnostmi. V celkovém součtu jde tedy přibližně o 5 200 předčasně zemřelých osob za rok 2017 (SZÚ, 2018).

---

<sup>1</sup> Pojmem mortalita se rozumí počet úmrtí způsobených danou nemocí vztažený na počet obyvatel za určitý čas. Často se zaměňuje s morbiditou, což je také statistický údaj, avšak indikuje počet nemocných jedinců, nikoliv úmrtí.



Pro srovnání byla mortalita v roce 2016 pro podíl  $PM_{2,5}$  ve frakci  $PM_{10}$  zvýšena o 4,52 % a celkově o 4,11 %. Hrubý odhad případů předčasných úmrtí v roce 2016 byl roven 4 000 a o rok dříve 4 800, což indikuje postupně rostoucí tendenci (SZÚ, 2018).

### 2.1.2 Další škodliviny

Oxid dusičitý neboli  $NO_2$ , vzniká spalováním paliv a biomasy, při výrobě kyseliny dusičné a v některých případech je používán v chemickém průmyslu jako oxidační činidlo. V přírodě způsobuje vznik kyselých dešťů nebo přízemního ozónu či fotochemického smogu (IRZ, 2014). Celkově se oxidy dusíku dobře vážou na hemoglobin a tím se do tkání nedostane potřebné množství kyslíku. Krátkodobá expozice organismu člověka účinkům  $NO_2$  způsobuje reaktivitu dýchacích cest, což se děje kvůli špatné rozpustnosti oxidu dusičitého ve vodě. Pro roční koncentraci je maximální doporučená hodnota podle WHO  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pro hodinovou koncentraci pak  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , která je stanovena vzhledem k tomu, jak jsou dýchací cesty schopny reagovat u náchylnějších astmatiků (SZÚ, 2018).

Na lidské zdraví ale i vegetaci má dopad také přízemní ozón. Největší vliv má tzv. fotochemický smog, který se tvoří v oblastech s vysoce intenzivní dopravou či průmyslem, a to zejména v letním období, kdy je teplo a sucho. U rostlin zabraňuje jejich růstu a fotosyntéze. Pro organismus člověka pak představuje možnost podráždění očních spojivek a onemocnění dýchacích cest, jako je podráždění či záněty sliznice (Vítejte na Zemi, 2013). Limitní hodnotou pro přízemní ozón je nejvyšší denní osmihodinový klouzavý průměr, který je  $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Průměrně za každé tři roky může být tato hodnota přesažena více jak 25krát (ČHMÚ, 2018). Za zmínku stojí, že během roku 2017 tento průměr překročily všechny měřící stanice (SZÚ, 2018).

## 3 Měření aerosolů

Pro měření aerosolů ve vnějším prostředí funguje v České Republice více než 50 stanic, které nepřetržitě monitorují stav znečištění ovzduší. Ke zhodnocení kvality vzduchu v uzavřených prostorech se využívá menších zařízení, která se pohybují i v nižších cenových relacích. Vzhledem ke zvýšenému zájmu o vliv aerosolů na lidské zdraví a ke snižující se ceně čítačů aerosolových částic roste poptávka po měřicích zařízeních do domácností či pracovišť.

Jak již bylo zmíněno, nejvýznamnější charakteristikou aerosolů je velikost, dle které lze stanovit frakce pro dané rozsahy jejich průměrů. Po měření je nejčastěji výsledkem odhad hmotnostní koncentrace a počet částic v jednotlivých třídách.

Existuje několik způsobů měření aerosolů. Nejznámější jsou metody založené na principu zachycení aerosolů na filtru vlivem proudění vzduchu a jejich následné vyhodnocení pomocí mikroskopu či vážení filtrů. Dalšími způsoby jsou například real-time-sizing neboli okamžité třídění částic, což spočívá v určování velikosti aerosolů z jejich chování a vyhodnocování probíhá téměř okamžitě při měření, a procesy využívající zobrazení prostřednictvím elektronových mikroskopů. Neopomenutelnou metodou je měření interakcí aerosolů v elektrickém poli, založené na měření elektrické mobility částic při vystavení elektrickému poli (Hinds, 1999).

Lze rozlišovat metody měřící velikosti částic nebo určující jejich koncentrace, přičemž u většiny případů jsou i tyto přístroje schopny rozpoznávat rozměry aerosolů. Ve skutečnosti nedokážou přístroje zaznamenávat velikosti částic v celém rozsahu a pro měření v co největším velikostním rozsahu je nutno kombinovat různé metody nebo přístroje (Hinds, 1999).

### 3.1 Optické vlastnosti částic

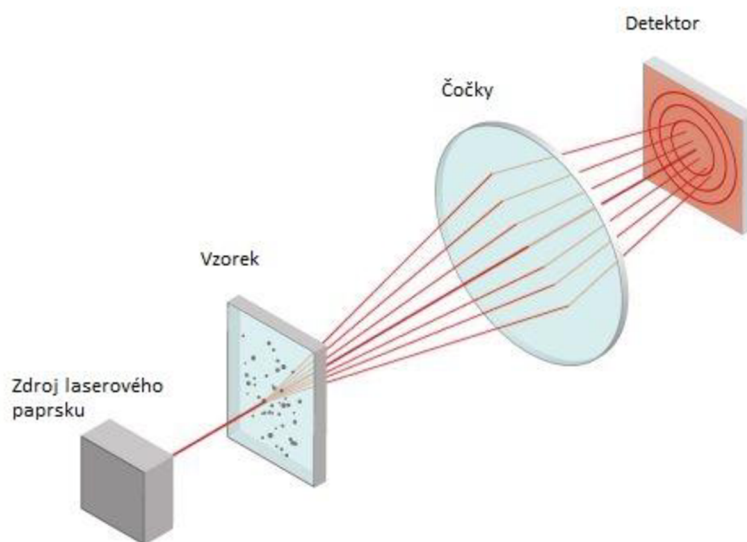
Hlediskem, které může být mnohdy patrné pouhým okem, jsou optické vlastnosti aerosolů. Zapříčiňují například sníženou viditelnost v důsledku znečištěného ovzduší, barvitý západ slunce, známý jako červánky, anebo duhu. Koncentraci nebo velikost částic je možno měřit právě díky reakci aerosolu na světlo. Aerosol je schopný světelné záření odrazit, absorbovat nebo ohnout. Předními vlastnostmi optických metod zkoumání částic jsou velká rychlost, vysoká citlivost a nízká cena.

#### 3.1.1 Rozptyl světla

Základním způsobem měření rozptylu světla je prosvícení a následné změření velkého množství aerosolových částic najednou. Paprsek světla prochází zkoumaným vzorkem, jenž je složen z částic o různých velikostech, které ovlivňují úhel rozptylu. Větší částice ohýbají světlo pod menším úhlem, zatímco malé pod větším. Takto rozptýlené světlo je snímáno detektorem, obvykle fotodiody či fotonásobič. Nejčastějším zdrojem světla je laserový paprsek, který výrazně zvyšuje přesnost měření oproti ostatním zdrojům. (Bartoň, 2017).

Pro velmi malé částice (menší než  $0,05 \mu\text{m}$ ) je rozptyl světla popsán Rayleighovou teorií, pro větší částice ( $0,05\text{-}100 \mu\text{m}$ ) se používá Mieho teorie. Je-li vlnová délka světla menší než velikost částic, lze provést měření přímo pomocí optických vlastností aerosolů. U menších částic je potřeba aplikovat zařízení, které přizpůsobí povrch částic tak, aby je bylo možné měřit. To se provádí obvykle pomocí zkapalnění par na povrchu aerosolů (Hinds, 1999).

Jednou z metod využívající rozptyl světla je laserová difrakce. Jako vzorky mohou být použity suspenze, suché prášky nebo emulze, což umožňuje měření aerosolů od desetin mikrometrů po milimetry. To lze aplikovat v potravinářském či farmaceutickém průmyslu nebo při hodnocení životního prostředí, a to zejména díky velkému rozsahu udávaných rozměrů (Yáñez et al., 2014). Rozptýlené světlo od aerosolů dopadá na čočku a je zachyceno detektorem, který zaznamenává jeho intenzitu. Pomocí Fraunhoferovy nebo Mieho teorie o rozptylu světla se pak stanovují velikosti částic. Schéma této metody je názorně ukázáno na Obrázku 3 (Particle Technology Labs, 2018).



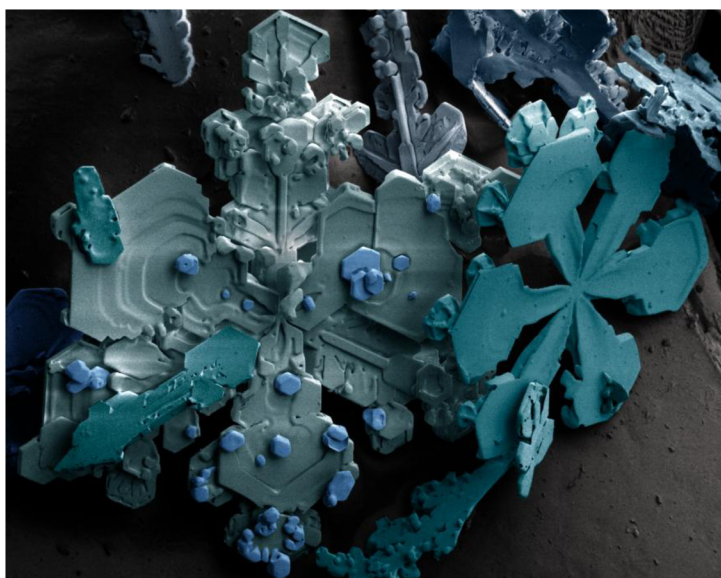
Obrázek 3 - Schéma laserové difrakce (Particle Technology Labs, 2018)

### 3.2 Mikroskopická analýza

Při měření velikosti aerosolů se velmi často aplikuje mikroskopická analýza. Nejčastěji je zkoumán vzorek aerosolů zachycený na vhodných filtrech, jež jsou následně vloženy do mikroskopu a zkoumány.

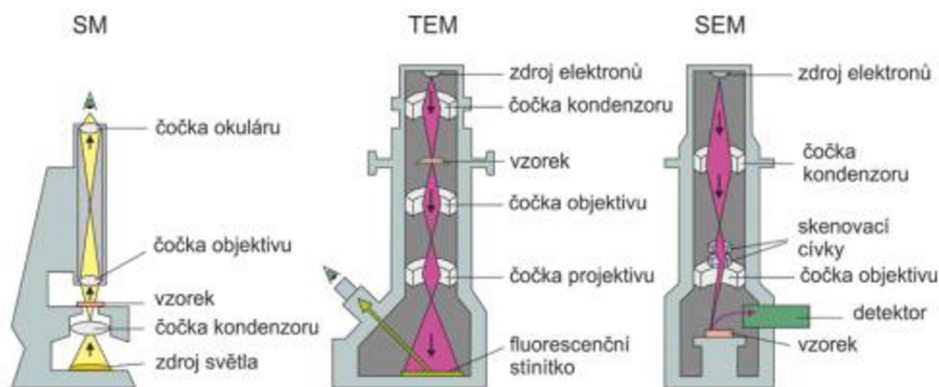
Nejčastější jsou optické mikroskopy zkoumající vlastnosti částic pomocí bílého světla ze zdroje. Běžně se ale také používají elektronové mikroskopy, které se liší od těch světelných nahrazením skleněných čoček za elektromagnetické a místo viditelného světla prochází vzorkem elektrony. Rozlišení závisí především na vlnové délce záření, kterou mají elektrony mnohem kratší než fotony, což způsobuje u elektronových mikroskopů podstatně vyšší zvětšení než u optických (Chemické listy, 2018).

Využití velkého rozlišení rastrovacího elektronového mikroskopu, díky němuž je možné získat údaje nejen o velikostech částic, ale i o jejich tvaru, je nazýváno metodou SEM (skenovací elektronový mikroskop) (Yáñez et al., 2014). Celý vzorek je po řádcích procházen štíhlým paprskem elektronů, přičemž jejich vzájemné působení s materiálem vzorku odráží elektrony, které jsou zaznamenávány detektorem. Vzniklý signál je následně převáděn na obraz. Vzorky mohou být vodivé i nevodivé a je nutné je pozorovat ve vakuu, aby nedošlo k interakci s molekulami vzduchu (Chemické listy, 2018). Obrázek 4 znázorňuje sněhovou vločku zobrazenou pomocí SEM metody.



**Obrázek 4 - Sněhová vločka vyobrazená rastrovacím elektronovým mikroskopem (Wikipedia, 2005)**

Stejně jako u rastrovacího mikroskopu má i transmisní elektronový mikroskop, metoda TEM (transmisní elektronový mikroskop), vysoké rozlišení a zvětšení zkoumaných objektů. Vzorkem prochází proud elektronů s tím rozdílem, že u metody TEM vzniká obraz pomocí detekování prošlých elektronů, nikoli odražených, jak tomu je u metody SEM. Z toho důvodu musí být vzorek velmi tenký, aby elektrony byly schopné proudit skrz něj. Výsledný obraz je následně zobrazován pomocí fluorescenčního stínítka. Elektromagnetické čočky jsou umístěny nad i pod vzorkem, aby bylo možné porovnat proud elektronů před a po projití (Chemické listy, 2018). Schéma optického, skenovacího a rastrového mikroskopu zobrazuje Obrázek 5.



Obrázek 5 - Schéma optického, transmisního a rastrového mikroskopu (Chemické Listy, 2018)

Mikroskopická analýza je jednou z velmi přesných, avšak drahých metod. Pořizovací cena mikroskopu se odráží v jeho kvalitě. Nevýhodou je i delší doba vyhodnocování výsledků měření.

### 3.3 Gravimetrická metoda

Gravimetrie je jednou ze základních a také často využívaných metod. Spočívá v zachycení tuhých částic na vhodných filtrech, které jsou před i po měření zváženy. Rozdíl jejich hmotností udává kvantitu zachycených částic, přičemž vzduch proudí přes membránový filtr s danou střední velikostí pórů nepřetržitě (Braniš a Hůnová, 2009). Vážení může probíhat vícekrát a řídit se náležitým operačním postupem. V mnohých případech musí být exponované filtry po určitou dobu ustáleny.

Gravimetrii lze aplikovat jak pro zjišťování obsahu částic v ovzduší, v uzavřených prostorech, ale také v palivu nebo spalínách. V praxi se nejdříve filtr namočí do média a položí se na nejvíce frekventované místo, kde zůstane po určitou dobu (hodiny až dny). U měření čistoty paliv je postup obdobný, pouze s rozdílem, že zkoumaná látka proudí přes filtr.

Tato metoda udává pouze počet částic, nedokáže rozlišovat jejich velikosti, tudíž určí pouze míru znečištění, což je její velkou nevýhodou. Důvodem aplikace této metody je bezesporu její nízká cena. Co se týče přesnosti, jde o nejméně přesný způsob vyhodnocování částic aerosolů v ovzduší, a to zejména kvůli nestabilnímu proudu vzduchu a rychlému zanesení filtrů.

### 3.4 Setrvačné vlastnosti částic

Jedním z aspektů, který je využíván při měření aerosolů, je setrvačnost částic. Z fyzikálních vlastností je zřejmé, že čím větší je částice, tím větší má setrvačnost. Toto je indikováno za pomoci hned několika zařízení, například odstředivky, cyklonu, či impaktoru (Krátký, 2015).

Při proudění vzduchu je pohyb částic ovlivněn různými faktory. Stokesovo číslo ( $Stk$ ) popisuje, jak je částice schopná pohybovat se po zakřivené dráze.



## 4 Levné čítače

Měření levnými čítači dosud není zcela podporováno vědeckou komunitou a ohledně jejich užívání je uváděno mnoho sporných názorů. Technologický rozvoj těchto přístrojů je teprve v rané fázi a u řady z nich nebyla dosud určena přesnost jejich měření. EPA stanovila určité požadavky, které musí být při vývoji přístrojů pro měření kvality ovzduší splněny, avšak žádný z levných senzorů tato přísná kritéria nesplňuje (Williams et al., 2014). Výsledná data levných čítačů se odvíjí od použití vhodného referenčního přístroje, provozních podmínek (např. vlhkost, teplota, aj.) nebo vlastností aerosolů. Také skutečnost měnící se teploty a relativní vlhkosti výrazně ovlivňuje korektnost naměřených hodnot (Zheng et al., 2018).

Levné senzory nemají tak kvalitní měření dat jako drahé přístroje, avšak díky jejich menším rozměrům, nízké spotřebě energie a ceně se z nich postupně stává nový trend (Hapidin et al., 2019). Měření je velmi citlivé na vlastnosti částic, tj. velikost, tvar, hustota, index lomu apod. Pro stanovení co nejpřesnějších výsledků je důležitá kalibrace přístrojů, jež je prováděna pomocí dat udávaných referenčními přístroji (Johnson et al., 2018).

Základním způsobem měření aerosolových částic je gravimetrická metoda, která sice udává přesné výsledky, ale vyžaduje dlouhou dobu vzorkování (více jak 24 hodin). Absolutní většina levných čítačů provádí své měření na principu rozptylu, popřípadě absorpce, světla, tedy využívají optických vlastností aerosolů. Jedná se o nejrychlejší způsob vyhodnocování a výsledná data jsou k dispozici téměř okamžitě. Jako zdroje se používají laserové a LED diody. Odražené světlo od částic je pomocí čoček soustředěno na fotodiody, které jej převedou na analogový či digitální signál, jenž je dále zpracováván. Pokud je signál nulový, jedná se o měření s čistým vzduchem, čili ve vzorku nejsou žádné částice. Toto je mnohdy nazýváno jako zero count (Johnson et al., 2018).

Jak již bylo zmíněno, samotné vyhodnocení může být formou zařazení částic do určitých velikostních tříd nebo stanovení hmotnostních koncentrací. Některé přístroje aplikují obě možnosti udávání naměřených hodnot. Rozřazení aerosolů do velikostních frakcí lze vyjádřit diferenčním nebo kumulativním způsobem. Kumulativní četnost znamená postupné sčítání hodnot. U optických čítačů frakce s nejmenšími aerosoly zahrnuje i počty ve všech třídách s aerosoly o větších rozměrech. Například u dělení do skupin 5-10  $\mu\text{m}$  a >10  $\mu\text{m}$  obsahuje velikostní třída 5-10  $\mu\text{m}$  nejen všechny částice v tomto velikostním rozmezí, ale i počty z frakce >10  $\mu\text{m}$ . Do kategorie >10  $\mu\text{m}$  pak spadají pouze aerosoly větší než určený rozměr. Diferenční vyjádření naopak udává počet částic v daném intervalu, tzn. pod frakcemi 3  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  si lze představit kvantitu aerosolů v rozmezí 3-5  $\mu\text{m}$ , 5-10  $\mu\text{m}$  a >10  $\mu\text{m}$  (Hinds, 1999).

Levné čítače mnohdy neměří jen aerosoly, ale jsou schopny zaznamenávat i teplotu, vlhkost nebo částice dalších sloučenin, například oxid uhelnatý (CO) a uhlíčitý (CO<sub>2</sub>), formaldehyd (CH<sub>2</sub>O, u některých přístrojů uváděn dle funkčního vzorce jako HCHO) či těkavé organické látky (TVOC - Total Volatile Organic Compounds). K určování koncentrací plyných látek využívají měřiče infračerveného světla. Často se jedná o nerozptýlené infračervené světlo neboli metodu NDIR (Nondispersive Infrared). Analýza plynů je založena na principu

absorpce infračerveného záření s danou vlnovou délkou a vyhodnocování výsledků probíhá pomocí signálu obdobně jako u měření aerosolů (Protronix, 2016).

Air Quality Index, zkráceně AQI, je dalším ze zobrazovaných parametrů na levných čítačích. Zjednodušeně lze říci, že se jedná o číslo udávající míru znečištění ovzduší. Jeho hodnota se pohybuje v rozmezí 0-500 a čím vyšší je, tím více je prostředí znečištěno a má výraznější dopad na lidské zdraví. Existuje šest kategorií AQI rozdělených podle barev a vlivu na organismus člověka. Tuto klasifikaci znázorňuje Obrázek 7. Obecně jsou jako uspokojivé brány hodnoty pod 100. Při AQI větším jak 100 je znečištění ovzduší považováno za zdraví škodlivé. Nejdříve se projevuje u citlivějších jedinců a později, pokud AQI stále roste, u každého (AirNow, 2016).

Úrovně zdravotních rizik	Číselné rozmezí	Zdravotní důsledky
Dobrá	0 až 50	Kvalita ovzduší je považována za uspokojivou a znečištění ovzduší představuje malé nebo žádné riziko.
Mírná	51 až 100	Kvalita ovzduší je přijatelná; u některých znečišťujících látek však může existovat mírný zdravotní problém u velmi malého počtu lidí, kteří jsou neobvykle citliví na znečištění ovzduší.
Nezdravá pro citlivé skupiny	101 až 150	Členové citlivých skupin mohou pociťovat účinky na zdraví. Obecná veřejnost pravděpodobně nebude zasažena.
Nezdravá	151 až 200	U každého se mohou začít objevovat účinky na zdraví. Citlivější jedinci mohou mít vážnější problémy.
Velmi nezdravá	201 až 300	Zdravotní varování. Každý může mít vážnější zdravotní problémy.
Hazardní	301 až 500	Zdravotní varování za pohotovostních podmínek. Postižena je pravděpodobně celá populace.

Obrázek 7 - Rozdělení hodnot AQI (AirNow, 2016)

Vzduch může být do přístroje vtahován pomocí vnitřního čerpadla či ventilátoru za účelem zajištění cirkulace vzorku a téměř okamžitého přivodu na senzor. To vede k rychlejší aktualizaci hodnot a adekvátnímu vyhodnocení. Některé čítače však nejsou vybaveny tímto příslušenstvím a vzduch přichází na senzor samovolně, čili je měření prováděno s relativně stálým vzorkem a nelze předpokládat rychlou reakci měřiče ani odpovídající výsledné hodnoty.

Hranice pro odlišení levných a drahých čítačů není přesně stanovena. Cena méně finančně náročných přístrojů se pohybuje přibližně v řádech stovek až tisíců korun. Více nákladné měřiče pak mají hodnotu zhruba od desetitisíců korun výše. Obecně lze říci, že levné čítače stojí méně jak 1-10 % ceny referenčních přístrojů (Johnson et al., 2018).



## II Experimentální část

### 5 Použité přístroje

- Dienmern – levný čítač
- Trotec PC220 – levný čítač
- Laser Detector PMS5003 G5 – levný čítač
- Temtop M2000C – levný čítač
- Xiaomi JCY01ZM – levný čítač
- CEM DT-321S – referenční měřič stavu prostředí
- AeroTrak 9310 – referenční přístroj
- Zeiss Axio Imager.M2m – mikroskop pro vyhodnocování filtrů

#### 5.1 Dienmern

Čítač značky Dienmern (Obrázek 8) získává informace pomocí laserového senzoru. Je schopen zaznamenávat částice  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{1,0}$ , formaldehyd (HCHO), benzen (TVOC), teplotu a vlhkost. Hmotnostní koncentrace udává v  $mg \cdot m^{-3}$  a vzorkovací doba je 1,5 s. Rozsah měřitelných teplot je od  $-10\text{ }^{\circ}C$  do  $50\text{ }^{\circ}C$ . Relativní vlhkost 20-85 %.

Ukazatel, zda jsou naměřené hodnoty v normě, je na každé ze čtyř možností obrazovky. Kritické hodnoty lze nastavit stejně jako spuštění alarmu v případě jejich překročení. Vzorek není do měřiče nijak vhnán. Nákupní cena tohoto přístroje byla 1 610 Kč.



Obrázek 8 - Dienmern

#### 5.2 Trotec PC220

Trotec PC220 (Obrázek 9) je čítač měřící pomocí odolné laserové diody s vlnovou délkou 780 nm, na kterou je přiváděn vzorek pomocí isokinetické sondy. Je vhodný jak pro testování čistých prostorů, tak pro měření na pracovištích. Zaznamenává kumulativní i diferenční počty částic ve velikostních frakcích hmotnostní koncentrace částic aerosolů  $PM_{10}$ ,  $PM_{2,5}$ , formaldehydu a oxidu uhelnatého v  $\mu g \cdot m^{-3}$ . Dále určuje teplotu od  $10\text{ }^{\circ}C$  do  $50\text{ }^{\circ}C$  a vlhkost v rozmezí 0-100 %.

Trotec k měření využívá šest kanálů, které zaznamenávají počty částic a následně je uvádí v šesti velikostních třídách od 0,3 do 10  $\mu\text{m}$ . Vzduch je nasáván vnitřním čerpadlem. Průtok je přibližně  $2,83 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  a je kontrolovaný vnitřní pumpou. Doba vzorkování je nastavitelná stejně jako počet jejích iterací. Spuštění je ovládáno manuálně a samotný proces sběru dat započne po uplynutí nastaveného časového intervalu. Například u měření po dobu jedné minuty s neustálým opakováním přístroj před začátkem dalšího cyklu odpočítává pět sekund.

K tomuto přístroji byl dodán i filtr, který zajišťuje měření s čistým vzduchem. Vzhledem k vybavení a schopnosti zpracování výsledků je Trotec řazen mezi dražší měřiče. Jeho pořizovací cena je mezi 30 000 Kč a 40 000 Kč a odvíjí se podle množství příslušenství a potřeby kalibračního listu.



Obrázek 9 - Trotec PC220

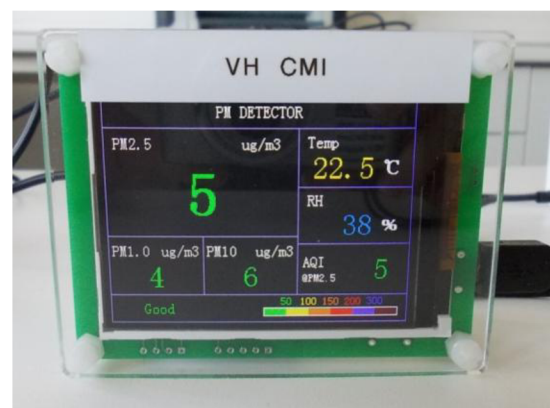
### 5.3 Laser Detector PMS5003 G5

Jak je patrné z názvu, i tento levný čítač využívá k měření částic  $\text{PM}_{1,0}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  a  $\text{PM}_{10}$  laserový senzor. Udává hmotnostní koncentrace částic aerosolů v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  a zároveň umožňuje jejich rozřídění do velikostních tříd, konkrétně 0,3  $\mu\text{m}$ , 0,5  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 2,5  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . Mimo jiné je schopen zaznamenat teplotu, vlhkost a určit míru znečištění vzduchu podle výrobcem zadané stupnice kritických hodnot. Dále ukazuje AQI, který z vybraných přístrojů vyhodnocuje jako jediný. Obsahuje čerpadlo nasávající vzduch do přístroje. Pořizovací cena Laser Detectoru byla 1 050 Kč.

Při experimentu byly použity dva čítače tohoto typu. Jeden zakoupený VUT a druhý vypůjčený z Českého metrologického institutu. Označení bylo zavedeno následovně: *Laser Detector I* (Obrázek 10) je zakoupený měřič a *Laser Detector II* (Obrázek 11) je vypůjčený měřič.



Obrázek 10 - Laser Detector I



Obrázek 11 - Laser Detector II

## 5.4 Temtop M2000C

Měřič Temtop (Obrázek 12) funguje na principu laserového snímače umožňujícího zaznamenávat částice  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ . Dále udává také hodnoty oxidu uhličitého, formaldehydu, teploty či vlhkosti. Hmotnostní koncentrace částic udává v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , teplotu v rozmezí  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a vlhkost od  $0\%$  do  $90\%$ . Je vhodný pro měření v prostorech s menším i větším znečištěním.

Vnitřní čerpadlo vtahuje vzduch a pomocí odrazu laserového paprsku jsou detekovány částice aerosolu. Formaldehyd a oxid uhličitý jsou zaznamenávány pomocí senzoru infračerveného světla. Temtop měří nepřetržitě a jeho velkou nevýhodou je udávání teploty ve Fahrenheitech, což nelze změnit. Při překročení kritických koncentrací částic PM, formaldehydu i  $\text{CO}_2$  je možné spuštění alarmu, limitní hodnoty jsou nastavitelné. Přístroj byl koupen za 3 780 Kč.



Obrázek 12 - Temtop M2000C

## 5.5 Xiaomi JCY01ZM

Levný čítač Xiaomi (Obrázek 13) pracuje pomocí laserového čidla a je schopen detekovat pouze částice  $PM_{2.5}$ , u nichž udává hmotnostní koncentraci v  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . Jeho výhodou jsou malé rozměry, jednoduché zobrazení a možnost propojení s mobilní aplikací, což je zároveň jeho nevýhodou, jelikož bez mobilní aplikace není možné měnit nastavení, zobrazení i například vidět historii výsledků. Manuál je pouze v čínském jazyce, tudíž je nutné si nastavení a provoz přístroje nastudovat na internetu.

Vzduch není vtahován ventilátorem, což neumožňuje lepší cirkulaci vzorku. Náklady na levný čítač Xiaomi JCY01ZM činily 1 470 Kč.



Obrázek 13 - Xiaomi JCY01ZM

## 5.6 CEM DT-321S

Přístroj určený k měření teploty, v rozsahu  $-30-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a vlhkosti od 0 % do 100 %. Přesnost tohoto měřiče (Obrázek 14) je uváděna okolo  $\pm 2,5\%$ . Je určen nejen do laboratoří, ale i k profesní aplikaci. Při měření je využit jako referenční přístroj pro srovnání kvality naměřených hodnot s ostatními čítači. Jeho cena je přibližně 1 500 Kč.



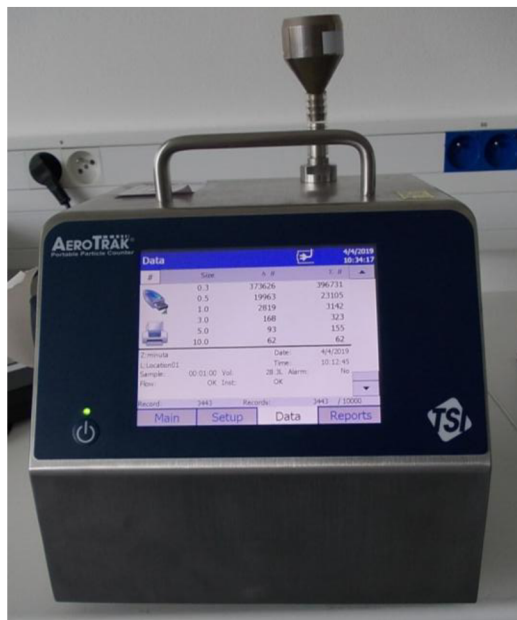
Obrázek 14 - CEM DT-321S

## 5.7 AeroTrak 9310

AeroTrak 9310 (Obrázek 15) je přístroj pro určování počtů aerosolových částic ve velikostních třídách. Tyto hodnoty vyjadřuje kumulativním i diferenčním způsobem. K měření využívá optické vlastnosti částic a jeho zdrojem je laserová dioda. Vzorkování je prováděno v intervalech od sekundy až po 99 hodin. Nejmenší detekovaná velikost částic je  $0,3\text{ }\mu\text{m}$ , průtok je  $28,3\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  a nejnižší velikostní třída je  $0,3\text{ }\mu\text{m}$ . V experimentu, vzhledem ke své přesnosti a citlivosti, udává referenční hodnoty.

Princip měření AeroTraku spočívá ve vtahování vzduchu pomocí vnitřní pumpy. Poté jsou částice pomocí šesti kanálů tříděny a prochází místem, kde odráží laserové paprsky. Ty dopadají na fotodiodu, jež vyhodnotí přichodící signál, ze kterého je následně určeno množství částic v dané velikostní frakci. Jednotlivé třídy jsou  $0,3\text{ }\mu\text{m}$ ,  $0,5\text{ }\mu\text{m}$ ,  $1,0\text{ }\mu\text{m}$ ,  $3,0\text{ }\mu\text{m}$ ,  $5,0\text{ }\mu\text{m}$  a  $10,0\text{ }\mu\text{m}$ .

Vzhledem k velmi dobré citlivosti a přesnosti se cena tohoto přístroje pohybuje okolo 300 000 Kč.

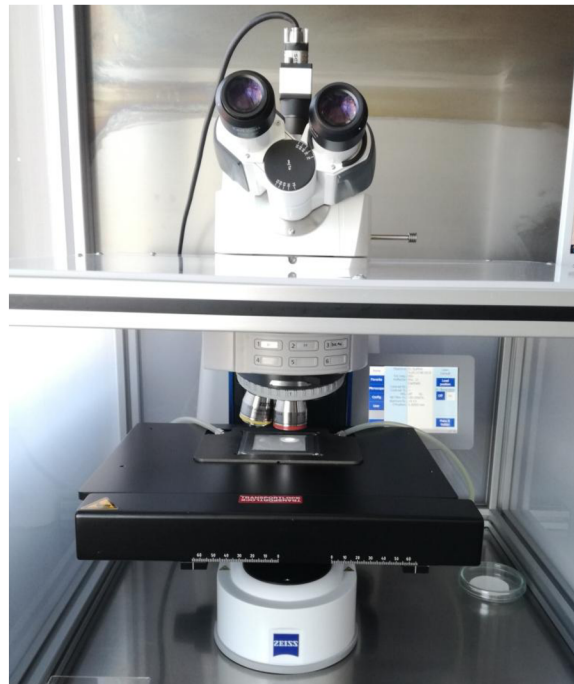


Obrázek 15 - AeroTrak 9310

## 5.8 Zeiss Axio Imager.M2m

Optický mikroskop Zeiss Axio Imager.M2m využívá k analýze širokou škálu kontrastních technik. Má vysoké rozlišení a přesné měření, díky čemuž je využíván v lékařství, potravinářském průmyslu a slouží i k aplikaci v biologii. Je vybaven několika objektivy, přičemž pro měření byl zvolen typ 5x+1,0x. V experimentu byl použit jako vyhodnocovací zařízení pro filtry.

Zeiss Axio Imager.M2m (Obrázek 16) je velmi kvalitní a přesný mikroskop, což značí i jeho cena. Pořizovací náklady by činily zhruba 500 000 Kč, proto pro vyhodnocení dvou filtrů byl tento přístroj pouze vypůjčen. V potaz lze brát i skutečnost, že finanční náročnost filtrů a média je proti optickému mikroskopu zanedbatelná.



Obrázek 16 - Zeiss Axio Imager.M2m

## 6 Popis experimentu

### 6.1 Měření ostatních parametrů

První experiment byl zaměřen na porovnání přístrojů při měření teploty a vlhkosti. K určení referenčních hodnot posloužil kalibrovaný přístroj CEM DT-321S. Jeho výsledky byly porovnány s hodnotami naměřenými levnými čítači, konkrétně Trotec PC220, Temtop M2000C, Dienmern a Laser Detector PMS5003 G5 I a II.

Měření bylo provedeno nejprve za ustálených podmínek a následně při jejich rychlé změně. V tomto případě bylo otevřeno okno a místnost s teplotou 21,6 °C a vlhkostí 46,7 % se rychle ochlazovala venkovním vzduchem o teplotě -4 °C. Hodnoty byly zaznamenány po ustálení referenčního přístroje, přibližně tři minuty od otevření okna. Srovnávány byly nejen naměřené hodnoty, ale i fakt, jak rychle jsou levné čítače schopny reagovat na změnu. Všechny přístroje byly připojeny k napájení a umístěny od sebe v bezprostřední blízkosti.

Toto měření bylo provedeno znovu za jiných podmínek pro porovnání reakcí levných čítačů v daném časovém intervalu. Teplota v laboratoři byla 21,78 °C a vlhkost 32,93 %, venkovní teplota byla 17,4 °C a vlhkost 38 %. Oproti předešlému testu nejsou rozdíly mezi podmínkami venku a v laboratoři tak výrazné. Z toho lze předpokládat pomalejší reakci přístrojů. Celý průběh byl zaznamenán na video trvající tři a půl minuty, aby byla aklimatizační doba přibližně stejná jako u předchozího experimentu se změnou podmínek. Ze záznamu byly následně každých 30 sekund hodnoty zaznamenávány do tabulky. Čítače byly opět napájeny a situovány k sobě co nejbližší. Dynamický test zobrazuje Obrázek 17.



Obrázek 17 - Měření teploty a vlhkosti při rychlé změně podmínek

### 6.2 Měření částic ve vnitřním prostředí

Při prvním měření aerosolových částic byly použity levné čítače udávající počty částic ve velikostních třídách. Pro porovnání byl zapojen referenční přístroj AeroTrak. Experiment probíhal v laboratoři při ustálené teplotě 21,65 °C a vlhkosti 52,2 % (naměřeno pomocí kalibrovaného přístroje CEM DT-321S), kde všechny čítače byly připojeny k napájení

a umístěny vedle sebe, aby byly zajištěny stejné podmínky. Zároveň s levnými čítači proběhl experiment s membránovými celulózovými filtry, které byly namočený do média a ponechány na vzduchu. Jedná se o metodu, která je běžně používána v praxi, pokud je potřeba znát čistotu vzduchu na pracovišti. Tento experiment (Obrázek 18) proběhl pouze za účelem srovnání kvality výsledků při vyhodnocování částic zaznamenaných levnými čítači a zachycených na filtrech.



**Obrázek 18 - Měření částic ve vnitřním prostředí s filtry**

U přístrojů s rozřazováním částic do velikostních tříd, Trotec a AeroTrak, bylo nastaveno nepřetržité vzorkování opakující se po jedné minutě. Trotec PC220 vyjadřoval počty částic diferenčně a AeroTrak kumulativně. Laser Detector I a II taktéž začleňující aerosoly do jednotlivých frakcí, neumožňují volit vzorkování, byly tedy ponechány v blízkosti ostatních přístrojů a jimi zobrazovaná data byla ve stejný čas zapisována do tabulky s výsledky Trotecu a AeroTraku.

Filtry byly namočený do média Divinol a ponechány na vzduchu čtyři hodiny. Zachycené částice byly následně vyhodnocovány pomocí mikroskopu Zeiss Axio Imager.M2m. Nejdříve bylo nutné filtry vysušit v peci o teplotě 80 °C po dobu jedné hodiny. Následně byly podloženy nitrocelulózovým filtrem, pro zamezení průsvitnosti, a přikryty sklíčkem, aby zůstaly narovnané. Takto upravené filtry byly umístěny na krabičku, kde je vzniklý podtlak přidržel na její horní části. Připravená sestava byla vložena pod mikroskop a pomocí počítačového programu na ní byly manuálně určeny tři body, díky nimž mikroskop určil rozměry filtru. Poté si automaticky označil devět bodů po kraji jako hranici. Zjištěný průměr filtru byl 47 mm, od něhož bylo potřeba odečíst těsnění 2,5 mm na každé straně. Konečný průměr filtru, který podlehl rozboru, byl 42 mm. V počítačovém programu byl zvolen druh média a test čistoty vzduchu.

Po spuštění procesu vyhodnocování mikroskop analyzoval filtr v určených oblastech a zaznamenával tmavé částice na bílém filtru. Analýza trvala zhruba 5 minut a po skončení mikroskop zobrazil všechny nalezené částice, jejich počty ve zvolených velikostních třídách a vyhodnocenou plochu filtru. Velikostní frakce byly 2-3  $\mu\text{m}$ , 3-5  $\mu\text{m}$ , 5-10  $\mu\text{m}$ , 10-25  $\mu\text{m}$ ,

25-50  $\mu\text{m}$  a částice větší jak 50  $\mu\text{m}$ . Pro zjištění původu či vlastností částic by bylo nutné udělat navíc materiálovou analýzu.

Druhé měření aerosolových částic zahrnovalo všechny levné čítače a proběhlo při teplotě 21,78 °C a vlhkosti 32,93 % (stanoveno kalibrovaným přístrojem CEM DT-321S). Přístroje byly po celou dobu připojeny k napájení a situovány ve velmi malé vzdálenosti od sebe.

Experiment spočíval v opakovaném měření za účelem získání směrodatných odchylek. Hmotnostní koncentrace (Obrázek 19) byly proměřeny desetkrát, a to vždy po půl minutě. U přístroje Trotec PC220 bylo nastaveno deset opakování a doba sběru dat třicet sekund, čemuž odpovídal průtok 1,416  $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Vždy po uplynutí tohoto časového intervalu byly hodnoty všech přístrojů vyfotografovány a uvedeny do tabulky, aby bylo zajištěno jejich zaznamenání ve stejnou chvíli a po shodných časových úsecích. Měření počtů částic ve velikostních frakcích (Obrázek 20) proběhlo pětkrát, vždy po jedné minutě. AeroTrak a Trotec vyhodnocovaly částice aerosolů bez opakování, tedy vždy po šedesáti sekundách zobrazily výsledná data a poté zastavily proces vzorkování. Výsledné počty udával Trotec diferenčně a AeroTrak kumulativně. Oba tyto přístroje měřily s maximálním průtokem a po dokončení analýzy byly výsledky všech čítačů zapsány do tabulek.



Obrázek 19 - Přístroje měřící hmotnostní koncentrace aerosolových částic



Obrázek 20 - Přístroje určující počty aerosolových částic ve velikostních třídách

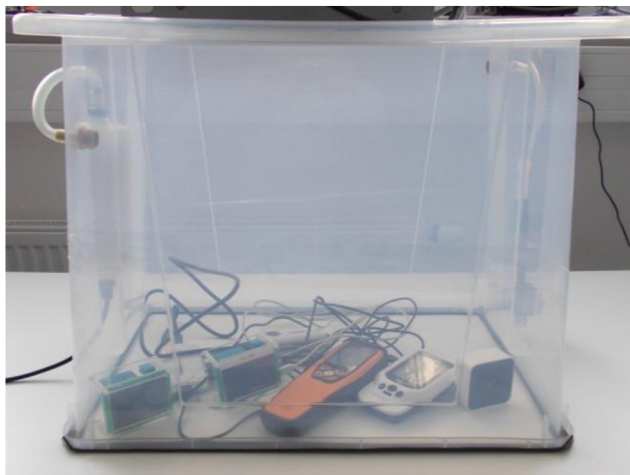
### 6.3 Měření s velmi čistým vzduchem

Měření proběhlo opět v laboratoři, avšak přístroje byly umístěny do krabice položené na pevný podklad a utěsněné tak, aby do ní nemohly vnikat částice z okolí. Pomocí kompresoru byl do nádoby přes HEPA filtr vháněn vzduch a pro zajištění cirkulace byl na druhou stranu krabice připevněn vývod vzduchu. Teplota v místnosti byla 21,68 °C a vlhkost 44,53 % (naměřeny kalibrovaným přístrojem CEM DT-321S). Vzhledem ke splnění stejných podmínek pro všechny experimenty byly měřiče napájeny přes battery pack umístěný rovněž v krabici. Umístění přístrojů lze vidět na Obrázku 21.

Spuštění kompresoru proběhlo v 12:06, vzduch začal být vháněn v 12:07. Hodnoty byly zaznamenány po 10 a 15 minutách od vhánění vzduchu, aby došlo k téměř úplnému vycištění ovzduší v krabici.



Po ukončení tohoto měření byl vzduch z nádoby odpuštěn a levné čítače umístěny zpět do volného prostoru za účelem zjištění reakce na změnu podmínek a rychlosti adaptování se na jiné prostředí. Tento experiment byl proveden se všemi levnými senzory a jako referenční přístroj byl použit AeroTrak. Nastavení Trotecu a AeroTraku zůstalo obdobné jako u experimentu ve vnitřním prostředí. Počty aerosolových částic ve velikostních třídách byly vyjádřeny taktéž stejně jako v předešlém experimentu.



Obrázek 21 - Měření s čistým vzduchem

#### 6.4 Měření částic ve venkovním prostředí

Závěrečné měření bylo provedeno ve venkovním prostředí (Obrázek 22) při teplotě 17,4 °C a vlhkosti 38 %. Pro porovnání byly použity hodnoty z nejbližší stanice monitorující aerosolové částice, v případě tohoto experimentu stanice Brno-Arboretum, jež udává hmotnostní koncentrace PM<sub>2,5</sub> a PM<sub>10</sub>. Díky tomu mohly být aplikovány všechny levné přístroje, jenž byly připojeny k napájení přes battery pack a položeny nedaleko od sebe.

Vzhledem k adaptaci byly nejdříve měřiče ponechány ve venkovním prostředí po dobu pěti minut. Následně bylo u Trotecu nastaveno vzorkování trvající šedesát sekund bez opakování. Po stabilizaci hodnot ostatních přístrojů proběhlo spuštění Trotecu a po dokončení jeho analýzy bylo provedeno zaznamenání všech výsledků do tabulky. Měření započalo v 11:55 a referenční data z měřicí stanice byla brána od 11:00 do 12:00.



Obrázek 22 - Měření hmotnostních koncentrací částic ve venkovním prostředí

## 7 Výsledky měření

### 7.1 Měření ostatních parametrů

Hodnoty z měření teploty a vlhkosti při ustálených podmínkách jsou uvedeny v Tabulce 1 a výsledky rychlé změny podmínek zobrazuje Tabulka 2. Data získaná z dynamického testu předkládají Tabulky 3 a 4. Pro lepší přehlednost byla závislost těchto výsledků na čase vynesena do Grafů 1 a 2. U teploty vyhodnocené čítačem Temtop M2000C byl proveden přepočít ze stupňů Fahrenheita na stupně Celsia.

Ustálená pokojová teplota		
	Teplota [°C]	Vlhkost [%]
Trotec PC220	21,2	49,9
Temtop M2000C	22,2	49
Dienmern	23	28
Laser detector I	21,1	59
Laser detector II	21,5	59
CEM DT - 321S	21,6	46,7

Tabulka 1 - Měření teploty a vlhkosti při ustálených laboratorních podmínkách

Z výsledků je patrné, že nejpřesněji měří teplotu i vlhkost Trotec PC220. Laser Detector I a II určují teplotu velmi přesně, ovšem u obou lze pozorovat velkou odchylku hodnot naměřené vlhkosti. Dienmern udává teplotu o 1,5 °C vyšší, než byla naměřena porovnávací teplota, a u vlhkosti je rozdíl hodnot přibližně 18 %. Temtop M2000C se mírně liší od srovnávaných hodnot teploty i vlhkosti, avšak oproti čítači Dienmern se nedá jeho chyba v měření považovat za markantní.

Rychlá změna podmínek		
	Teplota [°C]	Vlhkost [%]
Trotec PC220	18,5	43,5
Temtop M2000C	18,9	30
Dienmern	18	16
Laser Detector I	15,2	44
Laser Detector II	15,2	44
CEM DT - 321S	13,4	41

Tabulka 2 - Měření teploty a vlhkosti při rychlé změně podmínek

Vzhledem k referenčním hodnotám reagovaly nejrychleji Laser Detector I a II. Trotec PC220 aktualizoval nejlépe vlhkost, ale přeměřená teplota se liší o více než 5 °C. Velkého rozdílu v teplotě i vlhkosti si lze všimnout taktéž u Temtopu M2000C a Dienmernu.

### Rychlá změna podmínek - dynamický test - teplota

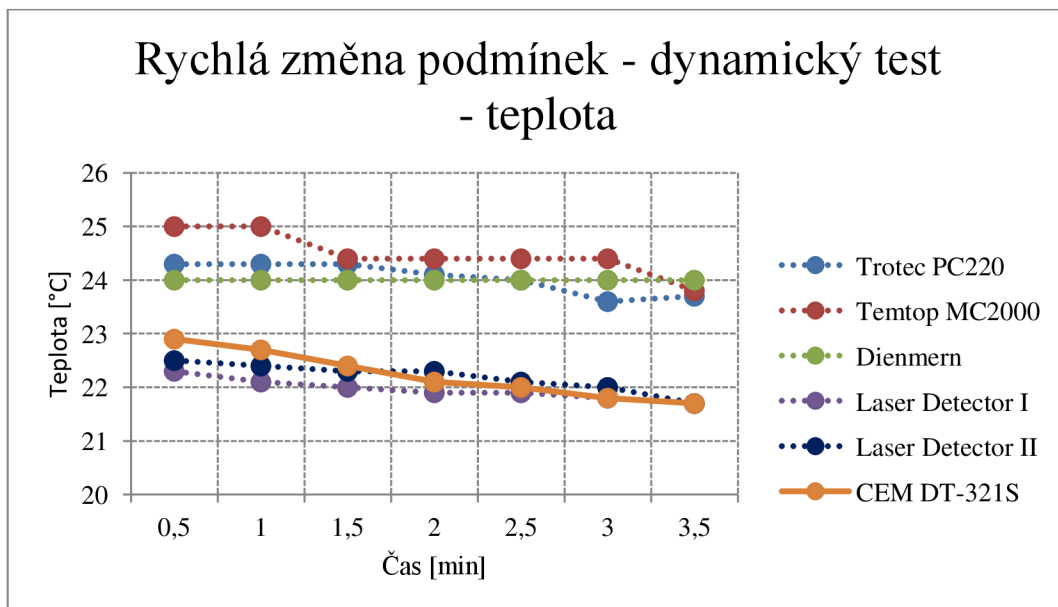
Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Teplota [°C]							
Trotec PC220	24,3	24,3	24,3	24,1	24	23,6	23,7
Temtop M2000C	25	25	24,4	24,4	24,4	24,4	23,8
Dienmern	24	24	24	24	24	24	24
Laser Detector I	22,3	22,1	22	21,9	21,9	21,8	21,7
Laser Detector II	22,5	22,4	22,3	22,3	22,1	22	21,7
CEM DT-321S	22,9	22,7	22,4	22,1	22	21,8	21,7

Tabulka 3 - Měření teploty při rychlé změně podmínek - dynamický test

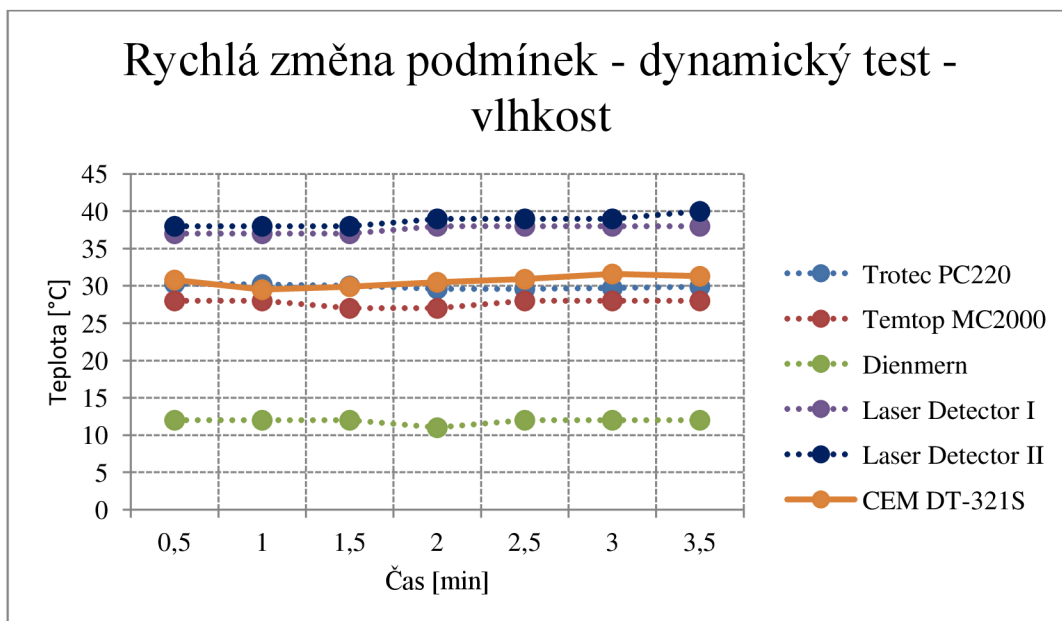
### Rychlá změna podmínek - dynamický test - vlhkost

Měření	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
Vlhkost [%]							
Trotec PC220	30,3	30,2	30	29,6	29,6	29,7	29,9
Temtop M2000C	28	28	27	27	28	28	28
Dienmern	12	12	12	11	12	12	12
Laser Detector I	37	37	37	38	38	38	38
Laser Detector II	38	38	38	39	39	39	40
CEM DT-321S	30,8	29,5	29,9	30,5	30,9	31,6	31,3

Tabulka 4 - Měření vlhkosti při rychlé změně podmínek - dynamický test



Graf 1 - Závislost teploty na čase při rychlé změně podmínek - dynamický test



**Graf 2 - Závislost vlhkosti na čase při rychlé změně podmínek - dynamický test**

Při měření teploty byly nejbližší referenčním datům Laser Detector I a II, avšak z jimi stanovených vlhkostí je patrná odchylka v počáteční hodnotě, po níž ale následuje správná reakce na změnu podmínek. Sestupné tendence u vyhodnocování teploty si lze povšimnout i u Trotecu a Temtopu, i když se jejich hodnoty pohybují zhruba o 2,5 °C výše od referenčních. Vlhkost tyto dva přístroje vyhodnotily a aktualizovaly nejlépe. Čítač Dienmern zobrazuje téměř konstantní teplotu i vlhkost, tudíž je zřejmá velmi pomalá odezva. Z výsledků je evidentní podobnost s předešlým experimentem s rychlou změnou podmínek.

## 7.2 Měření částic ve vnitřním prostředí

Z důvodu odlišných průtoků jednotlivých přístrojů byly u Trotecu a AeroTraku naměřené hodnoty ve velikostních třídách přepočítány na počet částic v jednom litru. U Laser Detectoru I a II průtok není známý, vyhodnocená data byla proto ponechána tak, jak je zobrazují čítače. Upravené hodnoty jsou pro experiment s filtry zaznamenány v Tabulce 5 a 6. Hmotnostní koncentrace aerosolů při opakovaném měření zobrazují Tabulky 7a a 7b, počty částic ve velikostních třídách Tabulka 8. Průměrná data se směrodatnými odchylkami hmotnostních koncentrací a počtů částic ve velikostních třídách znázorňují Grafy 3 a 4.

**Počty částic aerosolů ve velikostních třídách**

	Laser Detector I	Laser Detector II	Trotec PC220	AeroTrak 9310
0,3 μm	573	591	4207	7751,3
0,5 μm	173	171	1119	755,3
1 μm	20	15	172,8	172,0
2,5 μm	0	1	20,5	-
3 μm	-	-	-	9,9
5 μm	0	0	3,2	3,8
10 μm	0	0	0,4	1,8

**Tabulka 5 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách pro experiment s filtry**

### Počty částic aerosolů ve velikostních třídách

	Filtry
2-3 $\mu\text{m}$	0
3-5 $\mu\text{m}$	0
5-10 $\mu\text{m}$	0
10-25 $\mu\text{m}$	0
25-50 $\mu\text{m}$	0
>50 $\mu\text{m}$	0

Tabulka 6 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách pro vyhodnocené filtry

Při rozřazování aerosolových částic do velikostních frakcí byl referenčnímu přístroji nejbližší Trotec PC220, ale čím menší částice selektoval, tím větší byla odchylka od AeroTraku. Laser Detector I a II uvádí výsledky, které jsou od sebe mírně odlišné, avšak od porovnávaných hodnot se liší výrazně. Z analýzy filtrů nebyly zjištěny žádné aerosolové částice ani v jedné z velikostních tříd. Protokol z mikroskopické analýzy obsahuje Příloha 1 a příklad zobrazení prachové částice optickým mikroskopem Příloha 2.

### Hmotnostní koncentrace při měření ve vnitřním prostředí

Hmotnostní koncentrace [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]									
Měření	Trotec PC220			Temtop M2000C			Laser Detector I		
	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
1.	-	1	1	-	3,3	4,7	5	6	8
2.	-	0	0	-	5,1	7,1	3	5	5
3.	-	0	1	-	3,5	4,9	4	6	6
4.	-	1	1	-	3,3	4,6	5	5	5
5.	-	0	0	-	3,3	4,6	4	5	5
6.	-	1	1	-	4,9	6,8	4	5	5
7.	-	1	1	-	4	5,6	4	4	4
8.	-	0	3	-	3,1	4,3	3	4	4
9.	-	1	1	-	3,6	5,1	4	5	5
10.	-	1	2	-	3,5	4,9	4	5	6
Průměr		0,6	1,1		3,8	5,3	4	5	5,3
Směrodatná odchylka		0,49	0,83		0,66	0,91	0,63	0,63	1,10

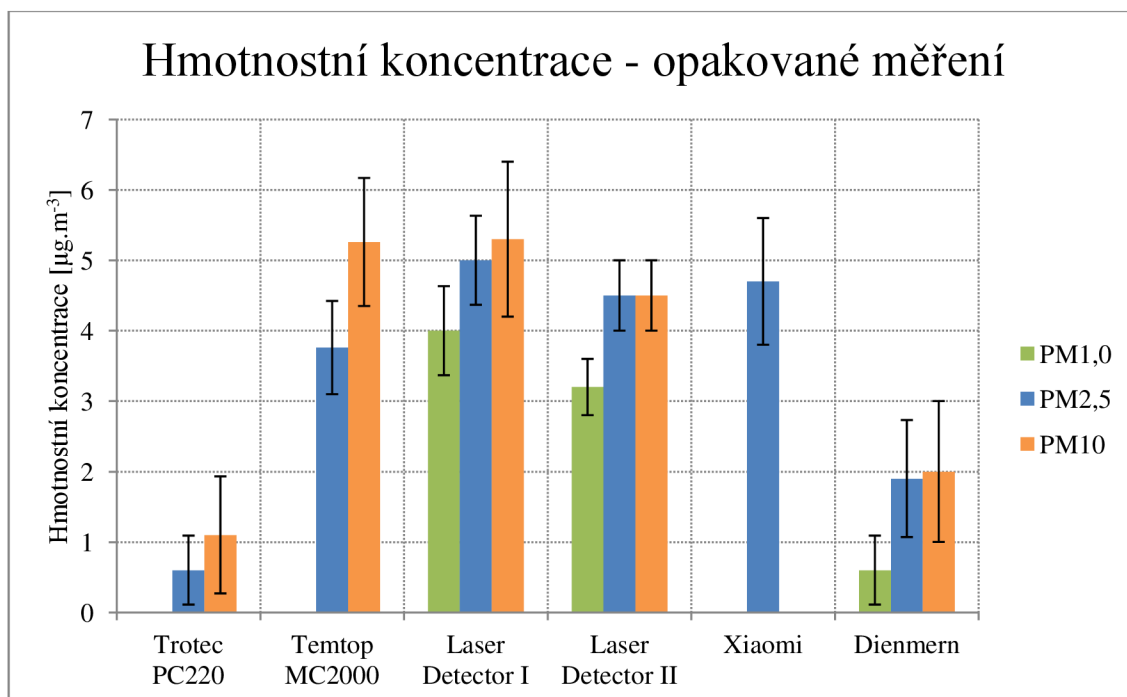
Tabulka 7a - Hmotnostní koncentrace při vícečetném měření ve vnitřním prostředí

## Hmotnostní koncentrace při měření ve vnitřním prostředí

Hmotnostní koncentrace [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]									
Měření	Laser Detector II			Xiaomi			Dienmern		
	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
1.	3	4	4	-	6	-	0	1	1
2.	3	4	4	-	4	-	0	1	1
3.	3	5	5	-	6	-	1	2	2
4.	3	4	4	-	3	-	0	1	1
5.	3	5	5	-	5	-	1	2	2
6.	3	5	5	-	5	-	0	1	1
7.	4	5	5	-	4	-	1	3	3
8.	3	4	4	-	4	-	1	3	3
9.	3	4	4	-	5	-	1	3	4
10.	4	5	5	-	5	-	1	2	2
Průměr	3,2	4,5	4,5		4,7		0,6	1,9	2
Směrodatná odchylka	0,4	0,5	0,5		0,9		0,49	0,83	1

Tabulka 7b - Hmotnostní koncentrace při vícečetném měření ve vnitřním prostředí

Nejlépe lze porovnávat částice PM<sub>2,5</sub> neboť jejich hmotnostní koncentrace je zaznamenávána pomocí všech levných čítačů. Z naměřených dat jsou zřejmé rozdíly mezi všemi přístroji. Při měření Laser Detectorem II hodnoty aerosolových částic PM<sub>2,5</sub> fluktuují okolo 5  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .



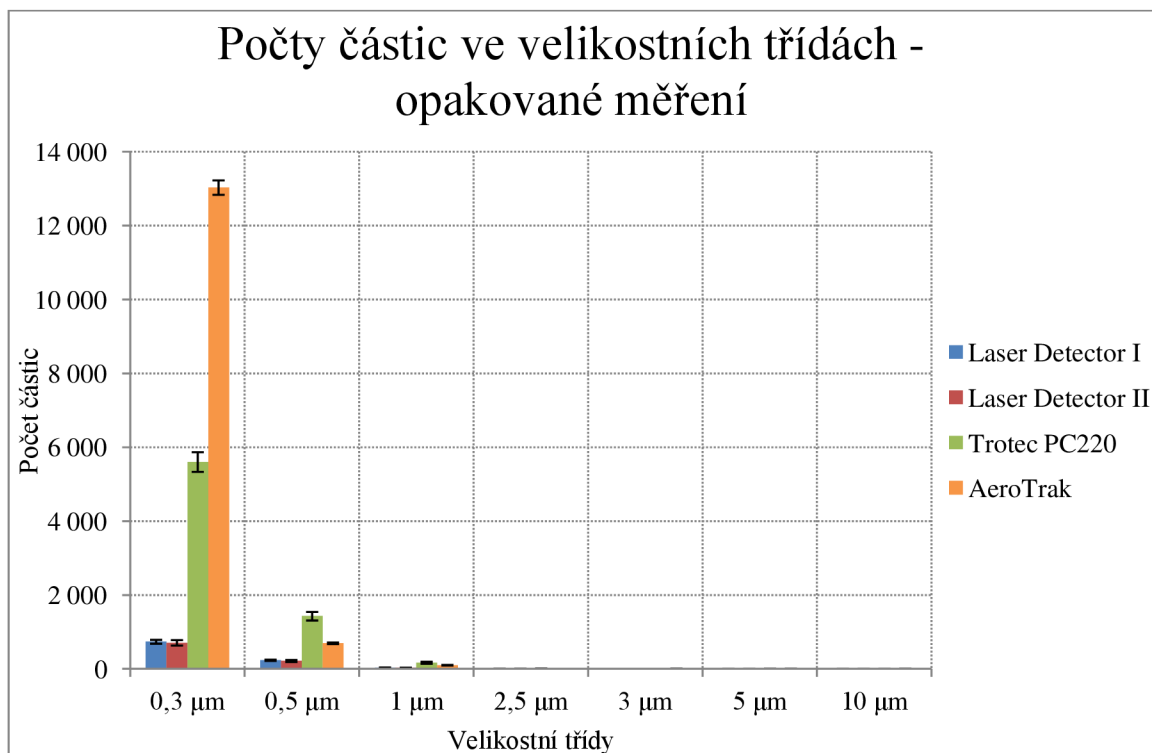
Graf 3 - Průměrné hodnoty hmotnostních koncentrací při opakovaném měření

**Počty částic ve velikostních třídách při měření ve vnitřním prostředí**

Velikostní třídy	Měření						Průměr	Směrodatná odchylka
	1.	2.	3.	4.	5.	6.		
<b>Laser Detector I</b>								
0,3 µm	756	792	786	657	729	702	737	51,92
0,5 µm	238	254	257	212	235	225	236,8	17,1
1 µm	42	31	38	22	40	27	33,3	7,94
2,5 µm	5	0	3	0	1	2	1,8	1,94
3 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
5 µm	0	0	0	0	0	0	0	0
10 µm	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Laser Detector II</b>								
0,3 µm	702	750	564	732	726	774	708	74,55
0,5 µm	216	234	166	229	224	229	216,3	25,4
1 µm	35	30	22	27	38	34	31	5,87
2,5 µm	5	0	1	1	3	2	2	1,79
3 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
5 µm	1	0	1	0	0	0	0,3	0,52
10 µm	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Trotec PC220</b>								
0,3 µm	5176,2	5502,8	5498,9	5716,8	5865,5	5863,3	5603,9	265,57
0,5 µm	1422,7	1459,0	1321,3	1274,7	1512,4	1582,6	1428,8	115,66
1 µm	123,9	156,1	166,3	203,7	187,1	170,9	168,0	27,34
2,5 µm	15,2	16,6	11,7	14,5	12,7	13,1	13,9	1,81
3 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
5 µm	1,8	2,1	4,2	5,3	2,1	0,7	2,7	1,71
10 µm	0,4	1,1	1,8	1,1	1,8	0,7	1,1	0,57
<b>AeroTrak</b>								
0,3 µm	12841,5	13319,3	12971,1	13033,9	12838,4	13202,3	13034,4	194,42
0,5 µm	672,9	726,9	682,0	696,0	690,6	705,4	695,6	18,99
1 µm	89,1	109,8	98,1	107,7	103,1	99,6	101,2	7,47
2,5 µm	-	-	-	-	-	-	-	-
3 µm	5,3	8,0	6,6	7,2	7,0	5,9	6,7	0,94
5 µm	3,7	4,9	4,1	4,2	4,2	3,3	4,1	0,54
10 µm	3,6	3,8	2,9	3,4	2,7	2,2	3,1	0,6

**Tabulka 8 - Počty částic ve velikostních třídách při vícečetném měření ve vnitřním prostředí**

Referenčním hodnotám se opět nejvíce přiblížil Trotec, ovšem je nutné brát v potaz, že u Laser Detectorů neznáme jejich průtok. Markantní rozdíl je patrný ve frakcích s aerosoly o menších rozměrech. S rostoucím rozměrem aerosolů se snižuje i odchylka přístrojů od referenčních hodnot.



Graf 4 - Průměrné počty částic ve velikostních třídách při opakovaném měření

### 7.3 Měření s velmi čistým vzduchem

Tabulka 9 prezentuje výsledné hmotnostní koncentrace aerosolových částic a Tabulka 10 výchytky výsledných dat Temtopu. Do Tabulky 11 byly zaznamenány počty aerosolů v jednotlivých velikostních třídách. Jelikož jde o experiment s velmi čistým vzduchem, senzory by neměly snímat téměř žádný signál, tudíž by se výsledky všech přístrojů měly blížit nulovým hodnotám. U přístrojů měřící částice ve velikostních třídách znovu proběhl přepočít na počet částic v jednom litru.

**Hmotnostní koncentrace aerosolů při měření s čistým vzduchem**

	PM <sub>1,0</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ]		PM <sub>2,5</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ]		PM <sub>10</sub> [μg.m <sup>-3</sup> ]	
	10 min	15 min	10 min	15 min	10 min	15 min
Temtop M2000C	-	-	0,1	0	0,1	0
Dienmern	0	0	0	0	0,1	0
Xiaomi JCY01ZM	-	-	1	1	-	-
Laser Detector I	0	0	0	0	0	0
Laser Detector II	0	0	0	0	0	0

Tabulka 9 - Hmotnostní koncentrace aerosolových částic při měření s velmi čistým vzduchem

Z výsledků měření s velmi čistým vzduchem po deseti minutách je zřejmé, že vzduch v krabici nebyl ještě zcela zbaven aerosolů, neboť u hmotnostních koncentrací i počtů částic ve velikostních frakcích byla některými přístroji zaznamenána konkrétní data, ačkoliv šlo o nízké hodnoty. Po uplynutí dalších pěti minut lze pozorovat větší pročištění vzduchu, jelikož senzory aktualizovaly svá data na nulové hodnoty.



Laser Detector I a II uvádějí nulový AQI a stabilní nulové hodnoty od čtrnácté minuty experimentu, na rozdíl od čítače Dienmern, který u hmotnostních koncentrací PM<sub>2,5</sub> místy fluktuje mezi 0 a 0,1 µg.m<sup>-3</sup>. Xiaomi jako jediný naměřil stejné hmotnostní koncentrace po deseti i patnácti minutách, z čehož je patrná pomalejší reakce na změny v jeho blízkém okolí. Dalším negativem je skutečnost, že zhruba po dvaceti minutách ukončil své měření a vypnul se. Ani po časovém intervalu, během něhož byl připojený k napájení, nezapočal další operaci.

Temtop M2000C nezobrazuje stabilně nulové hodnoty. Přibližně po dvaceti minutách měření začíná kolísat kolem 0 a 1 µg.m<sup>-3</sup>, tyto výkyvy zobrazuje Tabulka 10.

**Fluktuace hodnot Temtopu M2000C**

	20 min	22 min	23 min	25 min
počet částic na liter	637	405	81	753
PM <sub>2,5</sub> [µg.m <sup>-3</sup> ]	0,6	0,2	0	0,5
PM <sub>10</sub> [µg.m <sup>-3</sup> ]	0,8	0,3	0	0,7

**Tabulka 10 - Zobrazení fluktuace Temtopu M2000C**

**Počty částic ve velikostních třídách při měření s čistým vzduchem**

	Laser Detector I		Laser Detector II		Trotec PC220		AeroTrak 9310	
	10 min	15 min	10 min	15 min	10 min	15 min	10 min	15 min
0,3 µm	3	0	6	0	100	33	170	137
0,5 µm	1	0	2	0	28	9	6	4
1 µm	0	0	1	0	0	0	0	0
2,5 µm	0	0	0	0	0	0	0	0
5 µm	0	0	0	0	0	0	0	0
10 µm	0	0	0	0	0	0	0	0

**Tabulka 11 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách při měření s čistým vzduchem**

U třídění částic do velikostních frakcí je možné pozorovat taktéž sestupnou tendenci naměřených dat u všech přístrojů, což značí jejich správnou funkčnost. Rozdíl je patrný mezi levnými čítači a referenčním AeroTrakem, u něhož je nutné brát v potaz jeho velkou citlivost, která je ovšem promítnuta v jeho ceně. K jeho výsledkům se nejvíce přiblížil Trotec, jehož odchylka se pohybovala v rozmezí desítek částic. Naopak u obou Laser Detectorů byla pro nejmenší velikostní frakci přes sto částic.

## 7.4 Měření ve venkovním prostředí

Výsledné hodnoty z měření ve venkovním prostředí zobrazuje Tabulka 12. V Tabulce 13 jsou uvedeny referenční hodnoty z monitorovací stanice Arboretum. Při získání dat ze stanice Arboretum bylo zjištěno, že k dispozici jsou pouze hmotnostní koncentrace PM<sub>10</sub>.

### Hmotnostní koncentrace při měření ve venkovním prostředí

	PM <sub>1,0</sub>	PM <sub>2,5</sub>	PM <sub>10</sub>
Trotec PC220	-	11	36
Temtop M2000C	-	29,2	39,8
Laser Detector I	19	28	28
Laser Detector II	22	32	35
Dienmern	8	14	17
Xiaomi	-	31	-

Tabulka 12 - Hmotnostní koncentrace při měření ve venkovním prostředí

### Hmotnostní koncentrace z monitorující stanice Arboretum

	PM <sub>10</sub>
Datum a čas	1h [ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
04. 04. 2019 11:00-12:00 SELČ	48,4

Tabulka 13 - Hmotnostní koncentrace zaznamenané monitorující stanicí Arboretum-Brno

Ve vnějším prostředí všechny levné čítače dle očekávání zvýšily udávané hmotnostní koncentrace. Vzhledem k vzdálenosti mezi umístěním experimentu a polohou monitorovací stanice nejsou hodnoty měřící stanice Arboretum zcela směrodatné. Pro velmi hrubé porovnání jsou ovšem dostačující. Nejvíce se jim přiblížily Temtop, Trotec a Laser Detector II, jež zobrazují obdobná data. Odchylka od referenčních hodnot Laser Detectoru I je  $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , ale znatelný je i rozdíl od výsledků Laser Detectoru II, tedy stejného měřiče. Vyhodnocení Dienmernu je odlišné od všech přístrojů, což potvrzuje jeho pomalou aklimatizaci.

## 8 Diskuze

Cílem práce bylo porovnat různé typy levných čítačů pro měření čistoty ovzduší z hlediska přesnosti vyhodnocování aerosolových částic vzhledem k jejich ceně. Za tímto účelem bylo provedeno několik experimentů. Srovnání jednotlivých přístrojů s dražšími a kvalitnějšími není jednoznačné, neboť u měření ostatních parametrů byl zapojen referenční přístroj, ale nebyly použity všechny levné čítače. Při vyhodnocování aerosolových částic mohly být s referenčními hodnotami porovnány pouze měřiče určující počty těchto částic ve velikostních třídách.

Přístroj Dienmern hned v prvním experimentu výrazně zaostával jak za referenčními hodnotami, tak za výsledky ostatních měřičů. Ani u zaznamenávání aerosolových částic nebylo jeho vyhodnocení uspokojivé. Z měření ostatních parametrů a ve venkovním prostředí je patrná jeho pomalá reakce na změnu podmínek, a to nejen u vyhodnocování teploty a vlhkosti, ale i u hmotnostních koncentrací aerosolů. Zdlouhavá aklimatizace může být následkem nepřítomnosti ventilátoru, který by vzorek vzduchu vháněl do přístroje. Nutno také podotknout, že Dienmern patří k levnějším z použitých měřičů, což může mít vliv na použitý software a příslušenství. Toto tvrzení je ovšem pouhou spekulací, a to zejména kvůli nedostatku informací, například o vlnové délce laserového paprsku. Dalším aspektem negativních výsledků Dienmernu může být i vzorkovací doba 1,5 s, kterou lze považovat za relativně krátkou oproti Trotecu PC220 či AeroTraku, u nichž bylo nastaveno vzorkování 60 s.

Temtop M2000C se projevil jako nestabilní přístroj. Některé z jeho výsledků odpovídají referenčním hodnotám, avšak například u měření s čistým vzduchem lze pozorovat fluktuaci dat, která by měla zůstat ustálená. Z těchto výsledků je zřejmý přibližný způsob vyhodnocování, tedy primární zaznamenání průtoku vzduchu a až následné provedení zpracování dat. To znamená, že přístroj nejprve nasaje vzduch, analyzuje ho jako celek a poté z něj určí výsledné hmotnostní koncentrace. Navíc byl přístroj dodán s poruchou jednoho tlačítka a nebylo možné zobrazit hlavní menu. Reklamace nebyla provedena z důvodu nízké pořizovací ceny přístroje a dodání z USA.

Trotec PC220 se nejvíce přiblížil referenčním hodnotám při měření ostatních parametrů (teplota a vlhkost) a adekvátně aktualizoval svá data po rychlé změně podmínek. Velmi dobře zaznamenal i aerosolové částice, a to jak ve vnitřním a venkovním prostředí, tak s čistým vzduchem. Z naměřených výsledků je tedy patrná vyšší citlivost senzoru. Jeho velkou výhodou je udávání hmotnostních koncentrací aerosolů i počtů jejich částic ve velikostních frakcích. Mezi další klady patří rozsáhlé množství dostupných informací oproti jiným levným čítačům. Všechna tato pozitiva ovšem odpovídají jeho vyšší ceně.

Velkým nedostatkem čítače Xiaomi je, že na displeji zobrazuje pouze hmotnostní koncentrace částic PM<sub>2,5</sub>. Časový průběh vyhodnocování, zaznamenanou teplotu a vlhkost by mělo být možné získat z mobilní aplikace. Nutno podotknout, že tuto aplikaci se nepodařilo zprovoznit ani po opětovném úsilí třech osob nezávisle na sobě. Stejně jako u výše zmíněného Dienmernu je z naměřených hodnot zřejmá delší reakční doba, již lze přisuzovat absenci

ventilátoru. Dalším negativem je fakt, že i přes neustálé připojení k napájení ukončil čítač proces měření. A jelikož manuál přístroje je v čínském jazyce, lze se pouze domnívat, co je příčinou jeho vypnutí.

U experimentu pro zjištění počtů aerosolových částic ve vnitřním prostředí je při opakovaném měření zřejmé, že se zmenšujícím se průměrem je patrný nárůst rozdílu získaných hodnot mezi všemi čítači, což lze přisuzovat citlivosti měřičů. I přes výraznou odchylku ve výsledcích Laser Detectorů, Trotecu a AeroTraku je třeba dbát na cenový odstup a fakt, že u Laser Detectorů neznáme jejich průtok.

Výhodou Laser Detectoru PMS5003 G5 je, stejně jako u Trotecu PC220, udávání hmotnostních koncentrací aerosolů i počtů částic ve velikostních frakcích. Ovšem není uvedeno, zda jsou tyto počty vyjádřeny diferencně, či kumulativně. Pozitivem je stanovování hodnot AQI. Pro zjištění způsobu vyjádření počtů aerosolových částic ve velikostních třídách byl proveden experiment s monodisperzními částicemi, které generoval kondenzační generátor TSI CMAG 3475. Počty částic jsou pravděpodobně udávány kumulativně, avšak výsledky měření jsou velmi nepřesné. A proto nelze získané hodnoty považovat za průkazné.

Při vyhodnocování filtrů nebyly zaznamenány žádné částice, což může být zapříčiněno nastavením mikroskopu, který detekuje především kovové částice. Jelikož se v praxi nejvíce využívá tento způsob vyhodnocení, nebylo nastavení změněno. Tyto výsledky mohou být ovlivněny i dobou ponechání filtrů na vzduchu. Zvolený interval čtyř hodin je poměrně krátký, avšak z důvodu měnících se podmínek v laboratoři bylo nezbytné ho takto přizpůsobit, aby získaná data bylo možné porovnat s vyhodnocením levných čítačů. Dalším aspektem mající vliv na výsledky tohoto měření je fakt, že vzduch přes filtr proudí samovolně. Spoléhá se tedy na přirozenou difúzi a usazování částic, což může být příčinou takto nízkých hodnot.

## 9 Závěr

Experimentální část přinesla představu o schopnostech měření jednotlivých přístrojů. Bylo použito celkem sedm levných čítačů, konkrétně Dienmern, Xiaomi JCY01ZM, Temtop M2000C, Trotec PC220 a Laser Detector PMS5003 G5, který byl v experimentu zastoupen dvakrát. Pro uvedení referenčních hodnot teploty a vlhkosti sloužil kalibrovaný měřič CEM DT-321S, počty aerosolových částic ve velikostních třídách stanovoval AeroTrak 9310 a pro venkovní měření byly brány hodnoty z monitorovací stanice Brno-Arboretum. Vyhodnocování filtrů proběhlo v externí laboratoři. Všechny ostatní experimenty byly provedeny v laboratoři na Českém metrologickém ústavu.

Po provedení měření ostatních parametrů, částic ve vnitřním a venkovním prostředí a s čistým vzduchem, byl bezesporu nejkvalitnějším čítačem Trotec PC220. Vzhledem k této skutečnosti je úspornější variantou dražších přístrojů, která ale stále udává uspokojivé výsledky. Proto je vhodný i pro měření s vyššími nároky na přesnost vyhodnocení. Pokud je kladen důraz na nižší cenu, je nejvhodnější volbou přístroj Laser Detector PMS5003 G5. I přes odchylky jeho výsledků od referenčních hodnot, se dá považovat za cenově dostupnější alternativu dražších měřičů. Při dalším experimentu by bylo vhodné změřit průtok tohoto čítače, například aerosolovou komoru apod. Taktéž by bylo příhodné ověřit způsob vyjádření výsledných počtů částic ve velikostních třídách. Z experimentů je zjevné, že přístroje Xiaomi, Dienmern a Temtop M2000C udávají pouze informativní výsledky. Naměřená data těmito měřiči neodpovídala stanoveným hodnotám, z čehož lze vyvodit, že nejsou vhodné pro využití v žádné oblasti.

Výsledky venkovního měření jsou pouze orientační, aby poskytly alespoň představu o koncentracích aerosolů ve venkovním prostředí. Obecně jsou levné čítače vhodné především do domácností či prostorů s minimální mírou znečištění. Prozatím jejich výsledky slouží především k informativním účelům, ale vzhledem k výraznému rozvoji levných čítačů lze předpokládat postupné zvyšování jejich kvality a současně udržování nízké ceny.

## 10 Seznam použitých zdrojů

- Air Quality Index (AQI) Basics. AirNow [online]. 2016 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>
- BARTOŇ, Petr. *Past pro studium rozptylu světla na prachových zrnech* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://is.cuni.cz/webapps/zzp/detail/171847/>. Diplomová práce. Karlova univerzita, Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jiří Pavlů, Ph.D
- BRANIŠ, Martin a Iva HŮNOVÁ, ed. *Atmosféra a klima: aktuální otázky ochrany ovzduší*. V Praze: Karolinum, 2009. ISBN 978-80-246-1598-1.
- BRZEZINA, Jáchym. Není ozon, jako ozon. *ČHMÚ* [online]. 2018 [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://chmibrno.org/blog/2018/08/01/neni-ozon-jako-ozon/>
- Cascade impactor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2018-12-21]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cascade\\_Impactor.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cascade_Impactor.png)
- CYRYS, Josef, Joachim HEINRICH, Gerard HOEK, et al. *Comparison between different traffic-related particle indicators: Elemental carbon (EC), PM<sub>2.5</sub> mass, and absorbance* [online]. 2003, **13**(2), 134-143 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1038/sj.jea.7500262. ISSN 1559-0631. Dostupné z: <http://www.nature.com/articles/7500262>
- DPF-CAT systems* [online]. 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.dpf-cat.cz/>
- FUZZI, S., U. BALTENSPERGER, K. CARSLAW, et al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2015, **15**(14), 8217-8299 [cit. 2018-12-18]. DOI: 10.5194/acp-15-8217-2015. ISSN 1680-7324. Dostupné z: <https://www.atmos-chem-phys.net/15/8217/2015/acp-15-8217-2015.pdf>
- HÁJKOVÁ, Zdeňka, Pavla BAUEROVÁ, Antonín FEJFAR a Miroslav ŠLOUF. Elektronový mikroskop - Klíč k odhalení tajemství mikro- a nanosvěta. *Chemické listy* [online]. 2018, **112**, 128-134 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/2995/2987>
- HAPIDIN, Dian Ahmad, et al. Aerosol Chamber Characterization for Commercial Particulate Matter (PM) Sensor Evaluation. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2019, **19**(1), 181-194 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.4209/aaqr.2017.12.0611. ISSN 16808584. Dostupné z: <http://www.aaqr.org/doi/10.4209/aaqr.2017.12.0611>
- Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. *IRZ* [online]. 2003 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [http://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0005/112199/E79097.pdf](http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf)

Informace o zdravotních rizicích spojených s kvalitou ovzduší v roce 2017. *MZP* [online]. 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdravotni\\_dusledky\\_znecistení\\_ovzduši/\\$FILE/000-Zdravotni\\_rizika\\_2016-20180105.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zdravotni_dusledky_znecistení_ovzduši/$FILE/000-Zdravotni_rizika_2016-20180105.pdf)

JOHNSON, Karoline K., Michael H. BERGIN, Armistead G. RUSSELL a Gayle S.W. HAGLER. Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments. *Aerosol and Air Quality Research* [online]. 2018, **18**(3), 565-578 [cit. 2019-03-14]. DOI: 10.4209/aaqr.2017.10.0418. ISSN 16808584. Dostupné z: <http://www.aaqr.org/doi/10.4209/aaqr.2017.10.0418>

KRÁTKÝ, Šimon. *Porovnání vodní dýmky, elektronických cigaret a klasických cigaret z hlediska emitovaných částic* [online]. Brno, 2015 [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=104275](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=104275). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. František Lízal, Ph.D.

Laser Diffraction Testing. *Particle Technology Labs* [online]. 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: <https://www.particletechlabs.com/analytical-testing/particle-size-distribution-analyses/laser-diffraction>

NDIR. *PROTRONIX* [online]. 2016 [cit. 2019-03-14]. Dostupné z: <https://www.careforair.eu/odborne-vyrazy/ndir/>

Polétavý prach. *IRZ* [online]. [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/irz/repository/latky/poletavy\\_prach.pdf](https://www.irz.cz/irz/repository/latky/poletavy_prach.pdf)

Přízemní ozón a fotochemický smog. *Vítejte na Zemi* [online]. 2013 [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: [http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=prizemni\\_ozon\\_a\\_fotochemicky\\_smog&site=doprava](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=prizemni_ozon_a_fotochemicky_smog&site=doprava)

SKŘEHOT, Petr. Prevence nehod a havárií. *Portál BOZP* [online]. 2015 [cit. 2019-02-10]. Dostupné z: [http://www.portalbozp.cz/wp-content/uploads/2014/09/Prevence-nehod-a-havarii\\_1.dil\\_Kapitola-3.pdf](http://www.portalbozp.cz/wp-content/uploads/2014/09/Prevence-nehod-a-havarii_1.dil_Kapitola-3.pdf)

Snow crystals. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2005 [cit. 2019-02-06]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snow\\_crystals.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Snow_crystals.png)

Systém monitorování zdravotního stavu obyvatelstva České republiky ve vztahu k životnímu prostředí: Souhrnná zpráva za rok 2017. *SZÚ* [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z: [http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/souhrnna\\_zprava/SZU\\_2017\\_BOOK\\_new.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/souhrnna_zprava/SZU_2017_BOOK_new.pdf)

VODIČKA, Petr a Jaroslav SCHWARZ. Analýza elementárního a organického uhlíku v aerosolech. *Chemické listy* [online]. 2017, **111**(6), 354-362 [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/69/69>

Williams, R., Vasu Kilaru, E. Snyder, A. Kaufman, T. Dye, A. Rutter, A. Russell, AND H. Hafner. Air Sensor Guidebook. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-14/159 (NTIS PB2015-100610), 2014

Yáñez, et al. Particle Size Characterization: Comparison of Laser Diffraction (LD) and Scanning Electron Microscopy (SEM). *Acta Microscopica* [online]. 2014, **23**(1), 11-17 [cit. 2018-12-18]. ISSN 0798-4545. Dostupné z:

[https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/13554/CONICET\\_Digital\\_Nro.16825.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/13554/CONICET_Digital_Nro.16825.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

ZHENG, Tongshu, et al. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmospheric Measurement Techniques* [online]. 2018, **11**(8), 4823-4846 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.5194/amt-11-4823-2018. ISSN 1867-8548. Dostupné z: <https://www.atmos-meas-tech.net/11/4823/2018/>

Zdravotní důsledky a rizika znečištění ovzduší: Odborná zpráva za rok 2017. *SZÚ* [online]. Praha, 2018 [cit. 2018-12-18]. Dostupné z:

[http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne\\_zpravy/OZ\\_17/ovzdusi\\_2017.pdf](http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/odborne_zpravy/OZ_17/ovzdusi_2017.pdf)



## Seznam použitých zkratk a symbolů

AQI – Air Quality Index

ČHMÚ – Český hydrometeorologický ústav

ČMI – Český metrologický institut

ČSÚ – Český statistický ústav

EC – elementární forma uhlíku (Elemental Carbon)

EPA – Agentura pro ochranu životního prostředí (Environmental Protection Agency)

IARC – Mezinárodní agentura pro výzkum rakoviny (International Agency for Research on Cancer)

IRZ – integrovaný registr znečišťování

OC – organická forma uhlíku (Organic Carbon)

OM – organická částice (Organic Matter)

NDIR – nerozptýlené infračervené světlo (Nondispersive Infrared)

PM<sub>x</sub> – velikostní frakce aerosolů (Particulate Matter)

SEM – skenovací elektronový mikroskop

Stk – Stokesovo číslo [-]

SZÚ – Státní zdravotní ústav

TEM – transmisní elektronový mikroskop

TVOC – těkavé organické látky (Total Volatile Organic Compounds)

WHO – Světová zdravotnická organizace (World Health Organization)

$d_p$  – průměr částice [ $\mu\text{m}$ ]

$\rho_p$  – hustota materiálu [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ]

$u_*$  – frikční rychlost [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$\mu_a$  – viskozita vzduchu [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

$\nu$  – kinematická viskozita [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Měření teploty a vlhkosti při ustálených laboratorních podmínkách .....	34
Tabulka 2 - Měření teploty a vlhkosti při rychlé změně podmínek .....	34
Tabulka 3 - Měření teploty při rychlé změně podmínek - dynamický test .....	35
Tabulka 4 - Měření vlhkosti při rychlé změně podmínek - dynamický test .....	35
Tabulka 5 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách pro experiment s filtry .....	36
Tabulka 6 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách pro vyhodnocené filtry .....	37
Tabulka 7a - Hmotnostní koncentrace při vícečetném měření ve vnitřním prostředí .....	37
Tabulka 7b - Hmotnostní koncentrace při vícečetném měření ve vnitřním prostředí .....	38
Tabulka 8 - Počty částic ve velikostních třídách při vícečetném měření ve vnitřním prostředí .....	39
Tabulka 9 - Hmotnostní koncentrace aerosolových částic při měření s čistým vzduchem .....	40
Tabulka 10 - Zobrazení fluktuace Teploty M2000C .....	41
Tabulka 11 - Počty částic aerosolů ve velikostních třídách při měření s čistým vzduchem ....	41
Tabulka 12 - Hmotnostní koncentrace při měření ve venkovním prostředí .....	42
Tabulka 13 - Hmotnostní koncentrace zaznamenané monitorující stanicí Arboretum-Brno ...	42

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Porovnání velikostí částic aerosolů s reálnými objekty (DFP CAT, 2018) .....	13
Obrázek 2 - Průměrné složení PM <sub>2,5</sub> a PM <sub>10</sub> po celé Evropě (Fuzzi et al., 2015) .....	14
Obrázek 3 - Schéma laserové difrakce (Particle Technology Labs, 2018) .....	19
Obrázek 4 - Sněhová vločka vyobrazená rastrovacím elektronovým mikroskopem (Wikipedia, 2005) .....	20
Obrázek 5 - Schéma optického, transmisního a rastrového mikroskopu (Chemické Listy, 2018) .....	21
Obrázek 6 - Schéma kaskádového impaktoru (Wikipedia, 2015) .....	22
Obrázek 7 - Rozdělení hodnot AQI (AirNow, 2016) .....	24
Obrázek 8 - Dienmern .....	25
Obrázek 9 - Trotec PC220 .....	26
Obrázek 10 - Laser Detector I .....	26
Obrázek 11 - Laser Detector II .....	26
Obrázek 12 - Temtop M2000C .....	27
Obrázek 13 - Xiaomi JCY01ZM .....	27
Obrázek 14 - CEM DT-321S .....	28
Obrázek 15 - AeroTrak 9310 .....	28
Obrázek 16 - Zeiss Axio Imager.M2m .....	29
Obrázek 17 - Měření teploty a vlhkosti při rychlé změně podmínek .....	30
Obrázek 18 - Měření částic ve vnitřním prostředí s filtry .....	31
Obrázek 19 - Přístroje měřící hmotnostní koncentrace aerosolových částic .....	32
Obrázek 20 - Přístroje určující počty aerosolových částic ve velikostních třídách .....	32
Obrázek 21 - Měření s čistým vzduchem .....	33
Obrázek 22 - Měření hmotnostních koncentrací částic ve venkovním prostředí .....	33

## **Seznam grafů**

Graf 1 - Závislost teploty na čase při rychlé změně podmínek - dynamický test .....	35
Graf 2 - Závislost vlhkosti na čase při rychlé změně podmínek - dynamický test .....	36
Graf 3 - Průměrné hodnoty hmotnostních koncentrací při opakovaném měření .....	38
Graf 4 - Průměrné počty částic ve velikostních třídách při opakovaném měření .....	40

## **Seznam příloh**

Příloha 1 - Protokoly z mikroskopické analýzy filtru č. 1 a 2
Příloha 2 - Zobrazení prachové částice mikroskopem

# Příloha 1 - Protokoly z mikroskopické analýzy filtru č. 1 a 2

PxF Manumeter PS/QMM 11.5-Jh	<b>Cleanliness analysis report</b> Result particle measurement	22.02.2019 12:54:47
------------------------------------	---	------------------------

Vyrobek: CP ML:  
Vzorek: ČISTOTA VZDUCHU LABORATOŘ H350

Druh testu:

Oblast:

Typové číslo:  
Zakazník:

DHS Zeiss (B51.0155/0031)

Objectiv:	5 x + 1.0 x	Calibration [ $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ ]:	1.9 $\mu\text{m}$
Filter size [mm]:	47.0mm	Analyzed size [mm]:	42.0 mm
Threshold:	0 / 120		

Výsledky:

Size Class	All	Max	Fibre	Others
2-3 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
3-5 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
5-10 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
10-25 $\mu\text{m}$	27	0	0	27
25-50 $\mu\text{m}$	46	0	0	46
> 50 $\mu\text{m}$	42	0	3	39
Sum	115	0	3	112

Císlo davky:

Pracka:

Identifikační číslo,  
DMC:

Císlo pracky:

Odberné místo,  
stanice:

Zarizení v laboratorii

Vymazaných vláken:

Komentáře:

Čistota vzduchu filtr č. 1

Výsledek:

OK

Auditor: Dvorakova

Podpis: .....

PxF Manometer PS/QMM 11.5-Jh	<b>Cleanliness analysis report</b> Result particle measurement	22.02.2019 12:44:22
------------------------------------	---	------------------------

Vyrobek: CP ML:  
Vzorek: CISTOTA VZDUCHU LABORATOŘ H350

Druh testu:

Oblast:

Typove cislo:  
Zakaznik:

DHS Zeiss (B51.0155/0031)

Objectiv:	5 x + 1.0 x	Calibration [ $\mu\text{m}/\text{Pixel}$ ]:	1.9 $\mu\text{m}$
Filter size [mm]:	47.0mm	Analyzed size [mm]:	42.0 mm
Threshold:	0 / 119		

Vysledky:

Size Class	All	Max	Fibre	Others
2-3 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
3-5 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
5-10 $\mu\text{m}$	0	0	0	0
10-25 $\mu\text{m}$	23	0	0	23
25-50 $\mu\text{m}$	40	0	0	40
> 50 $\mu\text{m}$	36	0	9	27
<b>Sum</b>	<b>99</b>	<b>0</b>	<b>9</b>	<b>90</b>

Cislo davky:

Pracka:

Identifikacni cislo,  
DMC:

Cislo pracky:

Odberne misto,  
stanice:

Zarizeni v laboratoru

Vymazaných vláken:

Komentáře:

Čistota vzduchu filtr č. 2

Vysledek:

OK

Auditor: Dvorakova

Podpis: .....

## Příloha 2 - Zobrazení prachové částice mikroskopem

	<b>Single image report</b>	22.02.2019 12:55
--	----------------------------	---------------------

Length: 23  $\mu\text{m}$

