VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV
ENERGY INSTITUTE

NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ PRO HODNOCENÍ ÚČINNOSTI FILTRACE PŘENOSNÝCH ČISTIČEK VZDUCHU

DESIGN OF THE METHODOLOGY OF MEASUREMENT FOR EVALUATION OF FILTRATION EFFICIENCY OF PORTABLE AIR CLEANERS AND PURIFIERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. Michaela Dvořáková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. František Lízal, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	**Bc. Michaela Dvořáková**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	**doc. Ing. František Lízal, Ph.D.**
Akademický rok:	2020/21

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

Návrh metodiky měření pro hodnocení účinnosti filtrace přenosných čističek vzduchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti je na trhu řada typů čističek vzduchu. Jednak jsou to čističky využívající filtry a ventilátor, dále čističky na principu elektrostatické odlučivosti a čističky ionizační. Je třeba vytvořit metodiku jejich porovnávání zejména z hlediska účinnosti a rychlosti filtrace, případně i z hlediska hluku a obtěžování průvanem. V rámci práce bude také provedeno srovnání nejméně dvou čističek vzduchu.

Cíle diplomové práce:

Provést rešerši fyzikálních principů a jednotlivých typů čističek vzduchu.
Vytvořit metodiku pro porovnávání čističek z hlediska účinnosti a rychlosti filtrace.
Navrhnout metodiku měření, sestavit měřicí trať a provést měření účinnosti a rychlosti filtrace. Měření provést pro nejméně dva typy čističek.
Analyzovat výsledky, porovnat měřené čističky.
Stanovit doporučení pro použití čističek, případně možnosti vylepšení konstrukce.

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 diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

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 čističek vzduchu. Objasňuje principy filtrace a popisuje základní typy čističek vzduchu. Součástí práce je navržená metodika pro porovnání čističek vzduchu vzhledem k rychlosti a účinnosti filtrace. V experimentální části této práce je provedeno měření pro dva druhy čističek a jejich vzájemné porovnání. Vybrané čističky byly De'Longhi AC230 s mechanickými filtry a ionizační čistička Ionic-CARE Triton X6. V rámci této práce byla sestavena měřicí trať v domácím prostředí pro simulaci reálných podmínek pro funkci čističek vzduchu. Výsledky měření poskytují informace o průběhu početních koncentrací aerosolu v měřeném prostředí a účinnosti filtrace čističek vzduchu.

Klíčová slova

Aerosol, čistička vzduchu, kvalita ovzduší, filtrace, početní koncentrace částic

Abstract

This work focuses on the research and comparison of several types of air purifiers. It clarifies the principles of filtration and describes the basic types of air purifiers. Part of this work is designed methodology of measurement for comparison of filtration efficiency and filtration rate. The experimental part of this work contains the measurement and comparison made for two types of air purifiers. Selected purifiers were De'Longhi AC230 with mechanical filters and ionic air purifier Ionic-CARE Triton X6. Within the framework of this work an experimental set-up was constructed in the home environment for the simulation of real conditions for the function of the air purifiers. The measurement results provide information about aerosol number concentration process during the measurements and evaluation of filtration efficiency of air purifiers.

Key words

Aerosol, air purifier, air quality, filtration, particle number concentration

Bibliografická citace

DVOŘÁKOVÁ, Michaela. *Návrh metodiky měření pro hodnocení účinnosti filtrace přenosných čističek vzduchu.* Brno, 2021. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132323. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce František Lízal.

Prohlášení

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

V Brně dne…… Podpis:……

Poděkování

Tímto bych chtěla velmi poděkovat vedoucímu své diplomové práce doc. Ing. Františkovi Lízalovi, Ph.D. za věnovaný čas, ochotu, cenné rady a velkou vstřícnost. Ráda bych také poděkovala Mgr. Jiřímu Šperkovi, Ph.D. z Českého metrologického institutu za rady a pomoc při přípravě experimentu. V neposlední řadě děkuji všem, kteří byli ochotni zapůjčit mi potřebná zařízení a sdíleli se mnou své zkušenosti.

.

Obsah

Úvod ... 11
1 Kvalita ovzduší ... 12
1.1 Aerosoly ... 13
1.1.1 Velikostní rozdělení aerosolů ... 14
2 Filtrace částic ... 15
2.1 Účinnost filtru ... 16
3 Čističky vzduchu ... 19
3.1 Druhy čističek ... 19
3.1.1 Čističky vzduchu s mechanickými filtry ... 19
3.1.2 Čističky s elektrostatickým filtrem ... 20
3.1.3 Čističky vzduchu s ionizátorem ... 21
3.1.4 Adsorpční čističky ... 22
3.1.5 Čističky s UV zářením ... 22
3.1.6 Čističky s fotokatalytickým principem ... 23
3.1.7 Ostatní principy ... 24
3.2 Přehled čističek vzduchu ... 25
4 Porovnání čističek vzduchu ... 30
5 Metodika měření ... 32
5.1 Testovací komora ... 32
5.1.1 Testovací komora pro porovnání čističek z hlediska protiprašné účinnosti a generace ozonu ... 32
5.1.2 Testovací komora pro porovnání čističek z hlediska hluku ... 33
5.2 Systém pro měření částic ... 33
5.3 Testovací prostředí ... 34
5.4 Podmínky měření ... 34
5.5 Postup zkoušky pro určení výkonu čističky vzduchu ... 35
5.5.1 Pokles koncentrace částic při vypnuté čističce vzduchu ... 35
5.5.2 Pokles koncentrace částic při zapnuté čističce vzduchu ... 36
5.5.3 Měření akustického výkonu čističek vzduchu ... 37
5.5.4 Měření koncentrace ozonu ... 37
5.6 Vyhodnocení měření ... 38
5.6.1 Veličiny pro vyhodnocení měření odstraňování částic ... 38

5.6.2 Veličiny pro vyhodnocení měření koncentrace ozonu ... 39
5.6.3 Veličiny pro vyhodnocení měření hladin akustického výkonu ... 40
6 Měření účinnosti a rychlosti filtrace ... 41
6.1 Testovací komora ... 41
6.2 Měřicí přístroje ... 42
6.2.1 Lighthouse Solair 3100 ... 42
6.2.2 Sonoff TH16 ... 43
6.2.3 Ventilátor Proklima ... 43
6.2.4 Testované čističky vzduchu ... 44
6.3 Popis experimentu ... 44
6.4 Experiment s vypnutou čističkou vzduchu ... 46
6.5 Experiment se zapnutou čističkou vzduchu ... 46
7 Výsledky měření a diskuze ... 47
7.1 Výsledky měření ... 47
7.2 Vyhodnocení výsledků ... 52
7.3 Diskuze ... 52
8 Závěr ... 54
Seznam použitých zdrojů ... 55
Seznam použitých zkratek a symbolů ... 59
Seznam obrázků ... 62
Seznam tabulek ... 62
Seznam grafů ... 62
Seznam příloh ... 63

Úvod

Velmi významnou částí životního prostředí je ovzduší. Okolní vzduch ovlivňuje lidské zdraví, a pokud je tento vzduch kontaminován, škodlivé částice se mohou dostat hluboko do dýchacích cest, kde mohou způsobit vážné zdravotní problémy. Faktorem není pouze množství vdechovaných škodlivin, ale i doba vystavení člověka znečišťující látce nebo její schopnost působit na lidský organismus. Obecně je známo, že se kvalita okolního prostředí snižuje, což může mít dopad nejen na lidské zdraví, ale i vegetaci a různé ekosystémy. V současnosti roste zájem o kvalitu ovzduší nejen ve venkovním prostředí, ale zejména ve vnitřních prostorech, jako jsou kanceláře, domácnosti apod. S tím je spojen vývoj zařízení, která mohou kvalitu ovzduší v interiéru zlepšovat.

Filtrace je běžnou metodou vzorkování aerosolů a velmi častým způsobem čištění vzduchu. Ačkoliv jsou známy základní principy, je proces filtrace částic složitý. Zjednodušeně lze říci, že se jedná o oddělení pevné látky od kapaliny či plynu. Tento princip je hojně využíván pro odstranění nežádoucích částic například z vody nebo vzduchu. Účinnost filtrace závisí nejen na vlastnostech filtru, ale i na velikosti a vlastnostech filtrovaných částic.

Čistička vzduchu je zařízení, které snižuje míru znečištění okolního ovzduší a zvyšuje tak jeho kvalitu. Existuje mnoho typů čističek s různými principy filtrace. Jde například o čističky s filtry a ventilátorem, s elektrostatickými filtry nebo ionizační čističky vzduchu. Velmi často jsou principy filtrace v přístrojích kombinovány, aby bylo z prostředí odstraněno co nejvíce škodlivých látek. Porovnání a testování čističek vzduchu je důležité nejen z hlediska jejich účinnosti filtrace vzduchu, ale i z hlediska hluku, popřípadě ostatních negativních vlivů na lidské zdraví. Pro kvalitativní srovnání čističek vzduchu slouží zahraniční metodiky a normované postupy.

1 Kvalita ovzduší

Znečištění ovzduší je v poslední době čím dál více diskutované téma. Vzhledem ke snižující se úrovni kvality ovzduší roste povědomí a zájem o tuto oblast. Předcházení a zmírnění kontaminace ovzduší je známé jako ochrana ovzduší. Ta zahrnuje snahu minimalizovat rizika pro lidské zdraví, omezení zatížení životního prostředí i možnost tvorby předpokladů pro regeneraci jednotlivých částí životního prostředí. V současnosti je kladen velký důraz na čistotu ovzduší jak ve venkovním, tak ve vnitřním prostředí (MŽP, 2012).

Míra znečištění ovzduší závisí na několika faktorech. Důležitá je přítomnost výrazného zdroje škodlivých látek v blízkém okolí, což mohou být pro venkovní prostředí průmyslové zdroje, doprava, elektrárny, skládky odpadu, ale i zemědělská činnost. Například ve městech je těchto zdrojů mnoho a lze tedy očekávat, že vlivem jejich společného působení se kvalita ovzduší bude zhoršovat. Kvalita ovzduší ve vnitřních prostorech může být ovlivněna pronikáním škodlivin z venkovního prostředí nebo kombinací znečištění od zdrojů umístěných uvnitř. To jsou například stavební a povrchové materiály, rozpouštědla i tabákový kouř. Kvalita ovzduší tedy může být uvnitř a vně budov stejná i zcela odlišná (SZÚ, 2019).

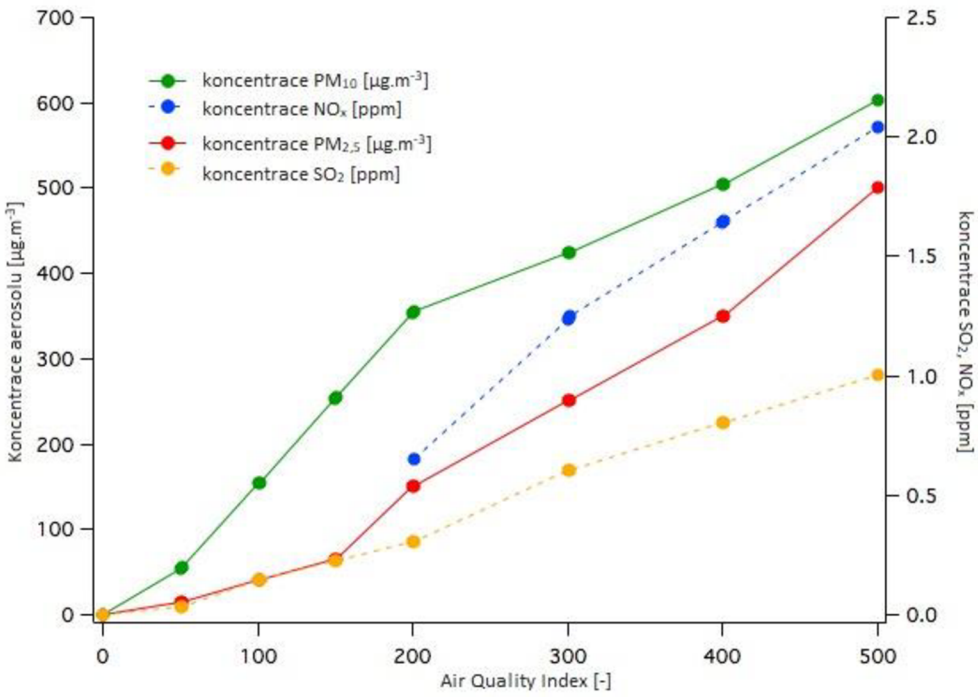
Zdroje znečištění lze dělit na antropogenní a přírodní. V případě prvního zmíněného jde například o spalovací procesy, dopravu, průmyslovou výrobu, apod., jinými slovy se jedná o lidskou činnost. V druhém případě lze jako primární zdroj považovat přírodní děje, konkrétně například sopečnou činnost, prašné bouře či lesní požáry. Ovšem je možné sem zařadit i lidskou činnost, kupříkladu podporování množení plísní v domech, což může poskytnout ideální podmínky pro výskyt bakterií a virů (Jones, 1999).

Látky znečišťující ovzduší jsou šířeny v atmosféře a mohou tedy ovlivňovat kvalitu ovzduší nejen v bezprostřední blízkosti od zdroje, ale i ve vzdálenějším okolí. Škodlivých látek, které ovlivňují kvalitu ovzduší, je mnoho. Základních šest škodlivin stanovila Agentura pro ochranu životního prostředí (EPA – Environmental Protection Agency). Konkrétně je to ozon, oxid uhelnatý, aerosoly, oxid dusičitý, oxid siřičitý a olovo. Všechny tyto látky mají nezanedbatelný vliv na zdraví člověka a jsou pro ně stanoveny imisní limity, jejichž překročení výrazně zvyšuje riziko zhoršení zdravotního stavu (Williams et al., 2014). Znečištění ovzduší jemnými částicemi polétavého prachu je jedním z hlavních globálních rizikových faktorů pro lidské zdraví. Tyto částice mohou způsobovat zdravotní komplikace včetně ischemické choroby srdeční, mrtvice, chronické obstrukční plicní choroby, rakoviny a infekcí dolních cest dýchacích (Barn et al., 2018).

Pro popsání kvality ovzduší se využívá mnoho metod. Air Quality Index (AQI) je často používaným kritériem, jehož cílem je informovat o míře kontaminace okolního prostředí a s ní souvisejících zdravotních rizicích. Je to bezrozměrná veličina, kterou lze spočítat pomocí rovnice (1). Pohybuje se v rozmezí 0-500 a čím vyšší je její hodnota, tím více znečištěné je ovzduší a má větší dopad na lidské zdraví. Obr. 1 zobrazuje šest mezních hodnot AQI pro aerosoly, oxid siřičitý a oxidy dusíku. Intervaly mezi vyznačenými body reprezentují jednotlivé kategorie AQI, přičemž při hodnotách pod 100 není znečištění bráno jako rizikové (AirNow, 2016).

$$AQI = \left[\frac{(PM_{obs} - PM_{min})(AQI_{max} - AQI_{min})}{PM_{max} - PM_{min}}\right] + AQI_{min} \quad (1)$$

Kde PM_{obs} je konkrétní hmotnostní koncentrace, pro kterou je AQI počítán [μg.m^{-3}], AQI_{max} je vyšší mezní hodnota AQI pro kategorii, které odpovídá PM_{obs} [-], AQI_{min} je nižší mezní hodnota AQI pro kategorii, které odpovídá PM_{obs} [-], PM_{max} je vyšší mezní koncentrace odpovídající hodnotě AQI_{max} [μg.m^{-3}] a PM_{min} je nižší mezní koncentrace odpovídající hodnotě AQI_{min} [μg.m^{-3}].



Obr. 1 - Kategorie AQI pro aerosoly, oxid siřičitý a oxidy dusíku (WordPress, 2013)

1.1 Aerosoly

Částice aerosolů jsou hlavní znečišťující látky ve vnitřním i venkovním prostředí. Jedná se o dvoufázovou směs kapalných a pevných látek rozptýlených v plynu, běžně vzduchu. Z pohledu doby kdy se aerosoly slučují, je možné je dělit na primární (ze zdroje vychází již směs částic) a sekundární (jednotlivé částice se shlukují do směsi až v atmosféře). Mají značný vliv na podnebí, například na tvorbu mraků nebo viditelnost (Hinds, 1999).

Existuje mnoho typů aerosolů. Jejich rozdělení závisí na skupenství rozptýlených látek. Jedná se především o mlhy, kdy je aerosol tvořen částicemi v kapalném skupenství, které mohou vznikat kondenzací přesycených vodních par, dým a prach, které jsou tvořeny pevnými částicemi, a kouř, který je tvořen pevnými i kapalnými částicemi. Důležitým typem jsou také bioaerosoly zahrnující organické látky, například bakterie, viry nebo houby (Skřehot, 2014).

Aerosoly lze charakterizovat dle tvaru, velikosti nebo chemického složení. Z chemického hlediska lze rozlišovat aerosoly homogenní a heterogenní. Nejčastěji jsou složeny ze síranů, dusičnanů a amoniaku. Menší část zaujímá mořská sůl, vodíkové ionty nebo voda. V atmosféře se velmi často objevují aerosoly uhlíkaté, jejichž hlavní složkou je elementární

(EC – Elemental Carbon) a organický (OC – Organic Carbon) uhlík. EC vzniká při nedokonalém spalování a je tvořen sloučeninami uhlíkatých látek, jež obsahují velké množství funkčních skupin. OC je tvořen mnoha organickými sloučeninami. Na jeho vzniku se výrazně podílí nejen antropogenní spalování, ale i přírodní děje. K analýze organického a elementárního uhlíku v aerosolech se využívá termo-optická analýza, kdy OC je uvolněn ze vzorku po zahřátí bez nutnosti přítomnosti kyslíku, zatímco EC pro své uvolnění kyslík vyžaduje (Vodička a Schwarz, 2017).

Neopomenutelným kritériem vlivu na lidské zdraví je schopnost aerosolů absorbovat chemické látky. Dlouhodobá expozice aerosolům obsahujících mutagenní či rakovinotvorné látky může způsobovat závažné onemocnění dýchacího, popřípadě kardiovaskulárního, systému (Skřehot, 2014).

1.1.1 Velikostní rozdělení aerosolů

Kapalné látky obsažené v aerosolu mají většinou sférický tvar a jejich velikost je jednoznačně definována průměrem částice. Pevné látky mohou mít jakýkoliv tvar a pro určení jejich velikosti je užíván ekvivalentní průměr, což je průměr sférické částice, která má pro danou fyzikální veličinu stejnou hodnotu jako sledovaná částice. Pokud je aerosol složen z částic stejných velikostí, jedná se o monodisperzní aerosol. V opačném případě jde o polydisperzní aerosol (Skřehot, 2014).

Při popisu aerosolů je velmi často užíváno dělení dle rozměru na frakce s označením PM_x (Particulate Matter), kde x označuje prahovou hodnotu pro maximální průměr částice. Například do frakce $PM_{2,5}$ spadají všechny částice s průměrem maximálně 2,5 μm (Shi et al., 2016). Velikost částic je úzce spojená s mírou vlivu aerosolů na zdraví člověka. Obecně platí, že čím menší je velikost aerosolu, tím déle přetrvá v ovzduší a tím větší rizika může způsobovat. Větší částice například zůstanou na začátku dýchacích cest, často je zachytí nosní chloupky, menší se dostanou do průdušek a nejmenší částice lze najít až v plicních sklípcích (Skřehot, 2014).

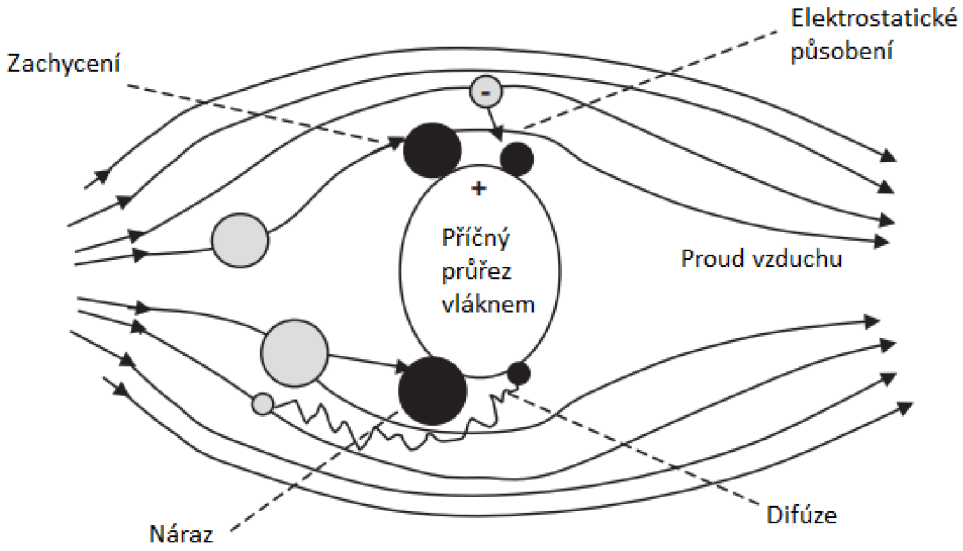
V současnosti je pozornost věnována nanočásticím. Těmi se rozumí částice v rozsahu velikostí od 1 nm do 0,1 μm. Vzhledem k jejich velikosti jsou velmi snadno inhalovatelné a mohou pronikat do plic a následně do krevního oběhu a lidských orgánů. Vliv nanočástic na lidské zdraví závisí nejen na jejich velikosti a místě vstupu, ale například i na hodnotě pH v lidských orgánech a tkáni (Miller, Raftis, Langrish et al., 2017).

2 Filtrace částic

Koncentrace škodlivin závisí na rychlosti produkce nebo uvolňování, rychlosti odstranění znečišťující látky a rychlosti výměny vzduchu v daném prostoru. Dříve byl problém s kvantifikací expozice kvůli nevhodnému použití měřicích zařízení ve vnitřním prostředí, jelikož tyto přístroje byly určeny především ke stanovení míry venkovního znečištění. V současnosti se vyvíjejí technologie nejen pro venkovní aplikace, ale i pro vnitřní prostory, a to například zařízení do automobilů, domácností, kanceláří, atd. (Jones, 1999).

Zjednodušeně řečeno je filtrace sběr částic, který nachází uplatnění v různých aplikacích, jako je například ochrana dýchacích cest, čištění ovzduší v místnostech, zpracování nebezpečných materiálů, aj. (Hinds, 1999). Účinnost filtrace závisí na faktorech týkajících se nejen samotného filtru, ale i vzduchu proudícího skrze něj. Jde například o pórovitost a tloušťku filtru nebo rozměr částic obsažených ve vzduchu. (Vallero, 2008).

Škodlivé látky mohou uváznout ve filtru pěti hlavními způsoby, a to nárazem (impakcí), zachycením (intercepcí), difúzí, usazením vlivem gravitace nebo elektrostatickým působením, jak je znázorněno na obr. 2. Filtr je tedy schopen eliminovat i částečky škodlivin, které jsou menší než velikost pórů. Tyto mechanismy fungují nejen u filtrů, ale i v plicích nebo čističkách vzduchu (Vallero, 2008).



Obr. 2 - Možnosti zachycení částic na filtru (Vallero, 2008)

Difúze je důležitá pro velmi malé částice aerosolu (≤ 1 μm). Funguje na principu Brownova pohybu, neboli neuspořádaném pohybu mikroskopických částic v kapalině nebo plynu. Částice nekopíruje proud vzduchu, ale pohybuje se vůči němu náhodně (Sung et al., 2019). Mechanismus zachytávání funguje nejvíce u částic o velikosti 0,1 μm až 1 μm, kdy částice opisuje linii proudu a srazí se s elementem filtrace. Nárazem jsou filtrovány ty částice, jež se vlivem setrvačnosti odkloní od trajektorie proudu a narazí do vlákna. Aby setrvačná síla překonala sílu od proudu vzduchu, musí mít částice dostatečně velkou hmotnost, proto tento

princip platí zejména pro částice větší než 1 μm. Princip elektrostatické filtrace spočívá nejen v elektrickém vzájemném působení mezi atomy částic a filtru v bodě dotyku, tj. Van der Waalsovy síly, ale také v elektrostatické přitažlivosti částice a filtračního média (Vallero, 2008).

Existuje mnoho typů filtrů, jež se liší velikostí, tvarem i materiálem. Nejčastěji používanými jsou filtry z mikrovláken a s porézní membránou. První zmíněné mají pórovitost 70-90 %, rychlost proudění vzduchu skrz filtr nepřesahuje 0,1 m/s. Vlákna těchto filtrů mohou být celulózová, skelná nebo plastová a jejich velikost bývá od submikrometru po 100 μm. Filtry s porézní membránou mají pórovitost značně nižší, zhruba 50-90 %, což odpovídá velikosti pórů 0,01-10 μm. Vzduch proudí po nepravidelné trajektorii a strukturální prvky, které tvoří póry, zachycují pevné částice. Obvykle jsou tyto filtry vyrobeny z esterů celulózy, slinutých kovů, polyvinylchloridu a dalších plastů (Hinds, 1999).

Dalším typem jsou filtry s kapilárními póry spadající do skupiny membránových filtrů. Jsou vyráběny z polykarbonátové vrstvy tlusté 10 μm, jež je vystavena vlivu štěpných fragmentů a poté leptána pro vytvoření pórů ve tvaru válce. Oproti membránovým filtrům nemají tak vysokou účinnost pro filtraci částic menších než je velikost pórů. To je zapříčiněno jejich jemným povrchem, pro který jsou značně využívány ke sběru částic v elektronové mikroskopii (Hinds, 1999).

V současnosti jsou hojně využívány filtry obsahující nanovlákna. Jedná se o jemná vlákna o velikostech 1-1000 nm. Mají velkou pórovitost, což znamená, že mají velký měrný objem. Další výhodou je vysoká propustnost a malá plošná hmotnost, díky čemuž nachází uplatnění v mnoha filtračních aplikacích, jako například filtrace vody, vzduchu, krve, chemických látek, aj. Účinnost nanovlákenných filtrů je velmi vysoká, a to zejména při filtraci aerosolů o velikostech 0,1-0,5 μm, kdy je účinnost filtrů z mikrovláken minimální (Podgórski, Bałazy, Gradoń, 2006).

Nanovlákna jsou vyrobena z polymeru několika způsoby. Mezi hlavní procesy patří elektrostatické zvlákňování, vícesložkové zvlákňování nebo tavné foukání. Nejčastěji je využíván princip elektrostatického zvlákňování. Průměr vlákna závisí na koncentraci polymerního roztoku. Čím je roztok méně koncentrovaný, tím tenčí vlákno lze vyrobit. S tím ovšem souvisí zvýšené množství par emitovaných z roztoku. Další nevýhodou je časová náročnost této metody a s tím spojené vysoké finanční náklady (Podgórski, Bałazy, Gradoń, 2006).

2.1 Účinnost filtru

Účinnost filtru lze definovat jako frakci vstupujících částic, která je jím zachycena. Podíl zachycených částic je nazýván klasickou účinností E [%], dalším typem může být účinnost hmotnostní E_m [%], což je podíl hmotnosti částic, které se ve filtru nahromadily k celkové hmotnosti částic vstupujících do filtru. Obecně je hmotnostní účinnost větší jak početní. Pro výpočet lze uvádět rovnice:

$$E = \frac{N_{in} - N_{out}}{N_{in}} \tag{2}$$

$$E_m = \frac{C_{in} - C}{C_{in}} \tag{3}$$

kde N [-] značí počet částic a C [-] hmotnost částic před vstupem a po výstupu z filtru. Velmi často je uváděna také penetrace P [%] filtru neboli podíl částic, který projde skrz filtr. Lze ji vypočítat jako:

$$P = \frac{N_{out}}{N_{in}} = 1 - E \tag{4}$$

Pro výpočty penetrace je důležitá rychlost vzduchu měřená těsně před filtrem, nazývána čelní rychlost, U_0 [m.s^{-1}]. Je počítána z objemového průtoku Q [m^3.s^{-1}] a příčného průřezu A [m^2], kterým vzduch vstupuje do filtru.

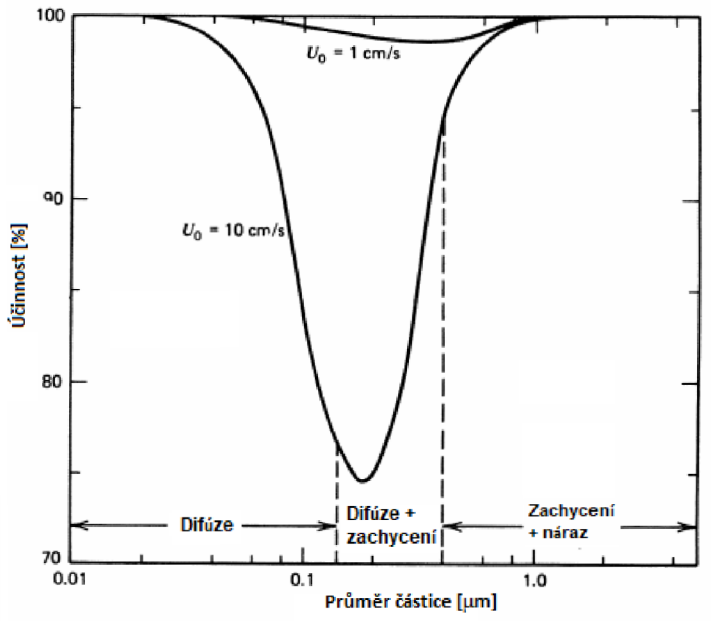
$$U_0 = \frac{Q}{A} \tag{5}$$

Vzhledem k omezení průtoku vzduchu je skutečná rychlost proudění uvnitř filtru vyšší než čelní rychlost. Závisí také na hustotě filtru α, jež je inverzní k pórovitosti filtru.

$$U_f = \frac{Q}{A \cdot (1 - \alpha)} \tag{6}$$

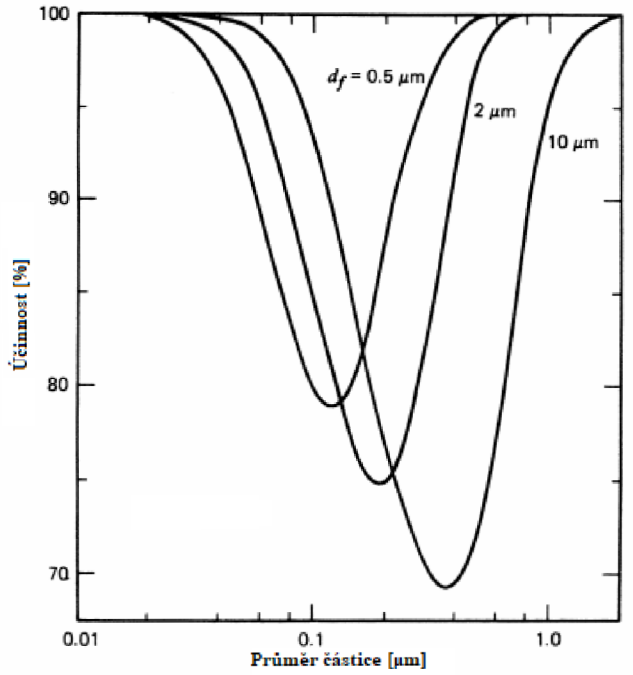
$$\alpha = 1 - pórovitost = \frac{objem\ filtračního\ vlákna}{celkový\ objem\ filtru} \tag{7}$$

Pro různé velikosti částic a čelní rychlosti značně dominuje náraz, difúze a usazení vlivem gravitace. Účinnost dosahuje svého minima pro určité velikosti částic. Pro mechanické filtry je to obvykle 0,05-0,5 μm, což znázorňuje obr. 3 (Hinds, 1999).



Obr. 3 - Účinnost filtrace v závislosti na průměru částice (Hinds, 1999)

Při proudění vzduchu přes filtr a jeho postupném zanášení narůstá tlaková ztráta. Tu si lze představit jako odpor všech vláken filtru vůči proudu vzduchu. Obr. 4 zobrazuje, jak se projeví změna průměru vlákna, d_f, na účinnosti filtru. Všechny tři filtry na obrázku mají stejnou tlakovou ztrátu. Z obrázku je zřejmé, že pokud se zmenšuje velikost vlákna, velikost částice pro minimální účinnost se snižuje a minimální účinnost se zvýší (Hinds, 1999).



Obr. 4 – Účinnost v závislosti na změně průměru vlákna (Hinds, 1999)

3 Čističky vzduchu

Dříve bylo řešením pro zlepšení ovzduší ve vnitřním prostředí větrání čistým venkovním vzduchem, tedy výměna znečištěného vzduchu uvnitř budovy za čistý venkovní. Ovšem vzhledem k rostoucí koncentraci škodlivých částic, především ve více zalidněných oblastech, je přirozené větrání značně zkomplikováno (Sung et al., 2019).

Čistička vzduchu je přístroj, který slouží k odstranění znečišťujících látek z ovzduší. Přednostně jsou využívány ve vnitřním prostředí, zejména domácnostech, nemocnicích, kancelářích, školách, atd. Lze je montovat i do ventilace, což zaručí cirkulaci čistého vzduchu v celé budově (Hutten, 2015). V současnosti je kladen důraz i na eliminaci zápachu, alergenů a ostatních dráždivých částic, jako jsou například tabákový kouř, prach atd. Čističky vzduchu jsou tedy velkým přínosem pro osoby trpící astmatem nebo různými druhy alergií.

Kritickým faktorem může být síla zdroje znečištění a jeho vzdálenost od čističky. Přenosné čističky menších rozměrů, které neobsahují ventilátor, nemusí být schopny přiměřeně snížit množství škodlivých látek v okolním prostředí. V takových případech je třeba primárně eliminovat zdroj škodlivin (Kubba, 2017).

3.1 Druhy čističek

Běžné typy čističek vzduchu ve vnitřním prostředí obsahují vysoce účinné filtry částic vzduchu, tzv. HEPA filtry (High Efficiency Particulate Arrestance), elektrostatické odlučovače, ionizátory, UV filtry nebo uhlíkové filtry (Sung et al., 2019). Čističky vzduchu lze dělit na přenosné a nepřenosné. Jak již název napovídá, jde o přístroje, které lze přemístit, například z jedné místnosti do druhé, nebo naopak nelze, což mohou být čistící systémy umístěné ve ventilacích apod.

3.1.1 Čističky vzduchu s mechanickými filtry

Mechanické čističky vzduchu často využívají filtry ze skelného mikrovlákna či elektretu neboli filtru obsahujícího elektrostaticky nabitý filtrační materiál. Mohou mít kruhový, panelový nebo kombinovaný tvar a často bývají nainstalovány do ventilace nebo jsou použity jako konečný filtr. Důležitým faktorem účinnosti mechanických filtrů je velikost pórů. Jak již bylo zmíněno, filtrovat lze i částice mnohem menší, než je velikost pórů, avšak odvíjí se od ní průtok vzduchu a tlaková ztráta při proudění (Hutten, 2015).

Zatímco filtry z mikrovláken zpočátku svou účinnost zvyšují vlivem zanášení, u elektretových filtrů účinnost klesá, jelikož při usazování částic je snižován elektrický náboj. Zvýšení účinnosti lze docílit přidáním aditiv, jako je například titaničitan barnatý, $BaTiO_3$. Náboj filtru je ovlivněn vlhkostí vzduchu a částicemi, které jím prochází. Usazené škodliviny zapříčiňují snížení trvanlivosti filtru vlivem neutralizace náboje, ale mohou vést i k jejímu zvýšení vlivem zanesení filtru, stejně jako je to u filtrů z mikrovláken (Kilic, Shim, Pourdeyhimi, 2015).

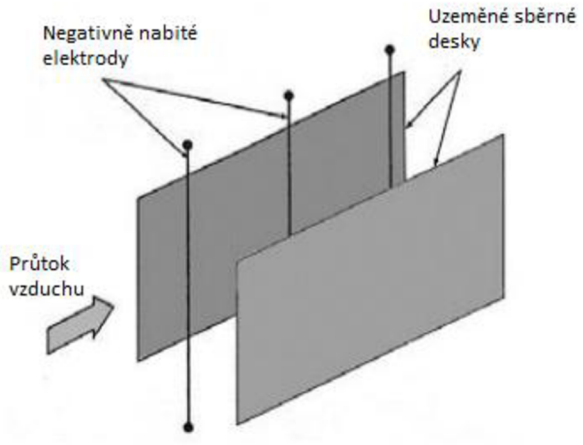
Nejpoužívanější metodou pro čištění vzduchu je HEPA filtr. Důvodem k jeho aplikaci je především jeho vysoká účinnost zachytávání částic, tj. >99,97 % pro částice o velikosti

0,3 µm. Průměr částic 0,3 µm odpovídá částicím, které jsou filtrovány s nejmenší účinností, neboli MPPS (Most Penetrating Particle Size). Další výhodou je skutečnost, že nedochází k produkci žádných škodlivých látek. Hromadění částic na filtru ovšem zvyšuje tlakovou ztrátu při proudění vzduchu přes filtr, proto je nutná jeho pravidelná výměna (Sung et al., 2019). V některých případech je před HEPA filtr v čističkách vzduchu umístěn předfiltr, což vede k prodloužení životnosti HEPA filtru. Předfiltr má větší velikosti pórů a umožňuje zachytit rozměrnější částice, jež by zbytečně zanášely HEPA filtr (Roy et al., 2019).

3.1.2 Čističky s elektrostatickým filtrem

Způsob fungování elektrostatických čističek, ESP (Electrostatic Precipitators), spočívá ve využití elektrostatického pole. Elektrostatické filtry se od klasických filtrů liší tím, že vytváří elektrické pole pro ionizaci částic, které jím procházejí. Jedná se o filtry pracující na principu korónového výboje[1], který vzniká na hranách elektrod s malým poloměrem křivosti, kam je přiváděno vysoké napětí. Díky tomu je elektrické pole v okolí elektrod velmi silné a silně nehomogenní a při dosažení dostatečně velkých odpudivých sil dochází na hrotu elektrody k emisi elektronů. Filtry tvoří kovové desky, dráty nebo tyče, jež jsou elektricky nabité. Kontaminovaný vzduch je veden přes filtr, který mu předá elektrický náboj. Poté nabité částice pokračují skrz další filtr s opačným nábojem, k němuž jsou přitahovány. Tím je dosaženo velmi kvalitního čištění vzduchu (Roy et al., 2019).

Výhodou ESP je jejich schopnost odstranit ze vzduchu i částice o velmi malých rozměrech na rozdíl od mechanických HEPA filtrů. Toho lze dosáhnout při vysokém vstupním napětí, neboť platí, že čím vyšší je napájecí napětí, tím jemnější částice lze přístrojem eliminovat (Roy et al., 2019). Na obr. 5 je znázorněno schéma čištění vzduchu pomocí ESP.



Obr. 5 - Schéma ESP (Roy et al., 2019)

[1] Korónový výboj je nárazová ionizace plynu. Vznikají při něm volné elektrony a kladně či záporně nabité ionty. Dle náboje iontů lze rozlišovat kladnou a zápornou korónu. Při vzniku záporné koróny je však zvýšena tvorba ozonu a proto je tedy pro čištění vzduchu upřednostněna kladná koróna, ačkoliv je méně účinná (ASHRAE Journal, 2018).

3.1.3 Čističky vzduchu s ionizátorem

Elektricky neutrální vzduch prakticky neexistuje, neboť okolní atmosféra je neustále ionizována. Ionizaci lze popsat jako proces tvorby iontů, neboli elektricky nabitých částic, z atomů či molekul, jež jsou v přirozeném stavu elektricky neutrální. Dochází k ní uvolněním elektronu z jedné částice a jeho přijetím částicí jinou. Energetickým zdrojem aktivujícím ionizaci může být srážka elektronu s molekulou nebo elektromagnetické záření, jako je kosmické, ultrafialové či gama záření radioaktivních materiálů. Pokud je dosaženo minimálního množství energie potřebné k uvolnění elektronu (ionizační energie), je elektron oddělen a zbylá částice nese kladný náboj převládající v jádru (kationt). Pro přijmutí do orbitalu jiného atomu nebo molekuly musí volný elektron překonat odpudivou sílu elektronového obalu, poté obsadí nejnižší možnou energetickou hladinu a částice získá záporný náboj (aniont). Vzhledem k nízké stabilitě se tyto nabité částice shlukují s neutrálními do skupin molekul, které jsou nazývány lehké anionty a kationty (Černecký et al., 2015).

Záporné ionty mají velmi pozitivní vliv na lidské zdraví, a to jak fyzické, tak psychické. Hojně se vyskytují v přírodě, a to zejména v lesích, jeskyních nebo po bouřce, díky tomu je tento vzduch lidmi vnímám jako čerstvý. Koncentrace aniontů ve vzduchu, který dýcháme, by měla být okolo 800 aniontů na cm^3, v přírodě se lze setkat s obsahem až 50 000 na cm^3 zejména v blízkosti vodopádů, naopak uvnitř místností se jejich hodnota blíží k nule (Svoboda, 2008). Ve vnitřním prostředí tedy převládají kationty, jež jsou produkovány moderními spotřebiči, jako jsou například LED obrazovky, počítače, mobilní telefony atd. Velmi špatný vliv na anionty přítomné ve vnitřním prostředí má především klimatizace, která vytváří umělé prostředí ničící přírodní mikroklima a úpravou vzduchu z něj odstraňuje záporné ionty (Černecký et al., 2015).

Ionizátor lze popsat jako zařízení, které vzduchu dodává záporný elektrický náboj. Jak již bylo zmíněno u elektrostatických čističek, využívá ionizátor ke generaci potřebných elektronů korónový výboj. K účinné eliminaci škodlivin ze vzduchu dochází při použití ionizátoru s kolektorovými deskami, jako tomu je například u ESP. Může docházet i k sekundárnímu čištění vzduchu, které je způsobeno vazbou volného elektronu s kladně nabitou částicí škodlivé látky. Nečistota s neutrálním nábojem je poté přitahována k místům, jež mají nulový potenciál, jako jsou stěny, podlahy, nábytek, apod. (EPA, 2018). Aplikace samotného ionizátoru do čističek vzduchu slouží převážně k obohacení čistého vzduchu o záporně nabité ionty. Z tohoto důvodu je vzhledem k uspořádání čističky vzduchu ve většině případů umístěn jako poslední (Strejček, 2012).

Hlavní výhodou čističek s ionizátorem je kompaktnost a nízké finanční náklady. Ionizaci lze u většiny čističek také manuálně zapínat a vypínat (Sung et al., 2019). Proces ionizace vzduchu však může generovat ozon, a to úmyslně nebo neúmyslně. Ozon je toxická látka, kterou je třeba ze vzduchu eliminovat, jelikož při dlouhodobé expozici člověka ozonu je škodlivý lidskému zdraví. Jedná se tedy o negativní účinek ionizace. Navíc reakce mezi chemickými sloučeninami ve vnitřním prostředí a ozonem vede ke vzniku dráždivých a škodlivých látek. Například reakce mezi ozonem a těkavými organickými látkami – TVOC

(Total Volatile Organic Compounds) zapříčiňuje tvorbu sekundárních aerosolů, které mohou narušit účinnost těchto přístrojů. Pokud rychlost generování sekundárních aerosolů přesáhne rychlost odstraňování částic, může se z čističky vzduchu stát zdroj znečištění. Pro minimalizaci tvorby ozonu jsou použity ionizátory na bázi uhlíkových vláken nebo kovových hrotů či drátů, které tvoří vysoké koncentrace unipolárních iontů s nízkými emisemi ozonu (Shi et al., 2016). Další nevýhodou čističek vzduchu s ionizátorem je nadměrný elektrostatický výboj a náboj předmětů v místnosti, což vede ke zvýšenému usazování prachu na povrchu (Černecký et al., 2015).

Existují malé čističky vzduchu s ionizátorem, které jsou určeny pro čištění vzduchu přímo v oblasti dýchací zóny člověka. Umisťují se kolem krku nebo jsou připnuty na oblečení v blízkosti nosu a úst (Shi et al., 2016).

3.1.4 Adsorpční čističky

Důvodem aplikace adsorpčních čističek je schopnost adsorbentu, který obsahují, pohlcovat jiné látky a tím odstranit ze vzduchu nejen znečišťující látky, ale i různé nežádoucí páry a pachy. Jako pohlcovač se běžně používá uhlíkový filtr, jenž obsahuje aktivní uhlí, či hydrogenuhličitan sodný (jedlá soda). Adsorpce plynů je vhodná pro domácnosti, ve kterých se hojně vyskytuje formaldehyd uvolňující se z nábytku, podlah, ale i koberců, a je nebezpečný pro lidské zdraví (Hutten, 2015).

Existují dva základní způsoby pohlcování částic, a to fyzikální adsorpce a chemisorpce. Nejdříve nastává první ze zmíněných typů, kde je dominantním faktorem Brownův pohyb molekul a pomocí Van der Waalsových sil interagují molekuly plynu s póry a zachytávají se. Následuje chemisorpce, při níž zbylé škodlivé částice chemicky reagují s vrstvou aktivního uhlí, čímž tvoří sloučeniny, jež uváznou ve filtru (Roy et al., 2019). Obr. 6 zobrazuje princip adsorpce aktivního uhlí.

Obr. 6 - Princip adsorpce aktivního uhlí (Roy et al., 2019)

3.1.5 Čističky s UV zářením

Vzhledem k obavám z pandemie virů, jako je prasečí chřipka (H1N1) nebo koronavirus (SARS-CoV), se v minulých letech začaly rozvíjet techniky čištění vzduchu, které by umožňovaly jejich eliminaci. Mezi široce používané metody patří ošetření netermickou plazmou, tepelné ošetření, UV záření a fotokatalýza (Kim, Jang, 2018).

Do některých čističek vzduchu je zabudována UV lampa, tedy zdroj ultrafialového záření. Jejím účelem je eliminace nežádoucích mikroorganismů, bakterií, virů a plísní. Používá

se jako doplněk čističek, jelikož není schopná odstranit prach (Roy et al., 2019). Mnohdy je přítomnost UV lampy v čističce kombinována s fotokatalyzátorem. Účinnost UV fotokatalýzy je ovlivněna několika faktory. Může záviset na měrné vlhkosti, době ozáření, vzdálenosti lampy a fotokatalyzátoru, atd. Nejčastěji jsou pro eliminaci virů a bakterií používány vlnové délky 254 nm a 365 nm (Kim, Jang, 2018).

UV záření narušuje molekulární vazbu fotodegradací. To znamená, že fotonová energie UV záření je dostatečně velká, aby docházelo k rozbití chemické vazby a tím k tvorbě volných radikálů. Ty dále reagují a způsobují prasknutí chemického řetězce (Perkins, 2007). V současnosti se začíná využívat vakuového UV záření (VUV)[2], které má oproti klasickému UV světlu větší fotonovou energii. Díky této energii VUV světlo rozkládá většinu chemických vazeb a štěpí molekuly kyslíku a vody, čímž vytváří reaktivnější oxidanty, jako jsou hydroxylové radikály, ale i ozon. K omezení tvorby ozonu je využíván katalytický rozklad, kde je jako katalyzátor TiO_2 s příměsí vzácných kovů, například palladium, platina, či zlato. Výhodou VUV záření je fakt, že vysoké účinnosti lze dosáhnout i při krátké době ozáření ($\leq$ 0,125 s) o vlnové délce < 200 nm (Kim, Jang, 2018).

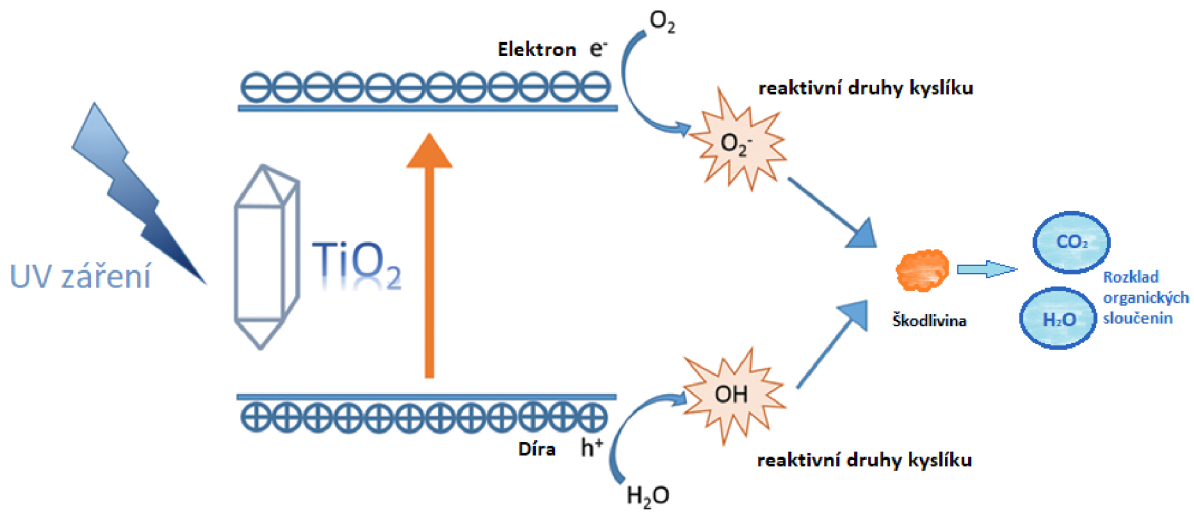
3.1.6 Čističky s fotokatalytickým principem

Princip fungování těchto čističek spočívá ve fotokatalýze, neboli procesu, při němž probíhá rozklad chemických látek, virů, bakterií a mikročástic prachu za působení fotokatalyzátoru a světelného záření. Primárně se jedná o fotolýzu, tedy rozklad látek působením světla, která je urychlena pomocí fotokatalyzátoru (Roy et al., 2019)

Záření vhodné vlnové délky působí na fotokatalytický materiál a spouští tím chemickou reakci. Konkrétně světlo absorbuje energii fotonů, což umožní elektronu se uvolnit z vazby a zanechat po sobě díru, vznikne tzv. pár elektron-díra. Tento pár je na povrchu fotokatalyzátoru připravený reagovat a tím usnadňuje absorpci organických látek. Následně může dojít k redoxní reakci, kdy vznikají reaktivní druhy kyslíku, které jsou schopny se od povrchu vzdálit a rozložit organické i anorganické škodliviny na oxid uhličitý, vodu a další látky (Roy et al., 2019).

Hlavní typy fotokatalyzátorů používaných v čističkách vzduchu jsou oxidy kovů, sulfidy kovů a materiály neobsahující kovy. Obvyklým fotokatalyzátorem je oxid titaničitý, TiO_2, který lze nanášet například na HEPA filtry. Při působení viditelného světla probíhá absorpce pouze v omezeném rozsahu vlnových délek, proto je přednostně využíváno UV záření s vlnovou délkou 351-400 nanometrů (Roy et al., 2019). Obr. 7 znázorňuje princip rozkladu organických sloučenin fotokatalýzou.

[2] Termín vakuové UV záření se používá pro tzv. daleké záření, které je absorbováno ve vzduchu. Vlnové délky jsou v rozmezí 100-200 nm (BOZP, 2004).



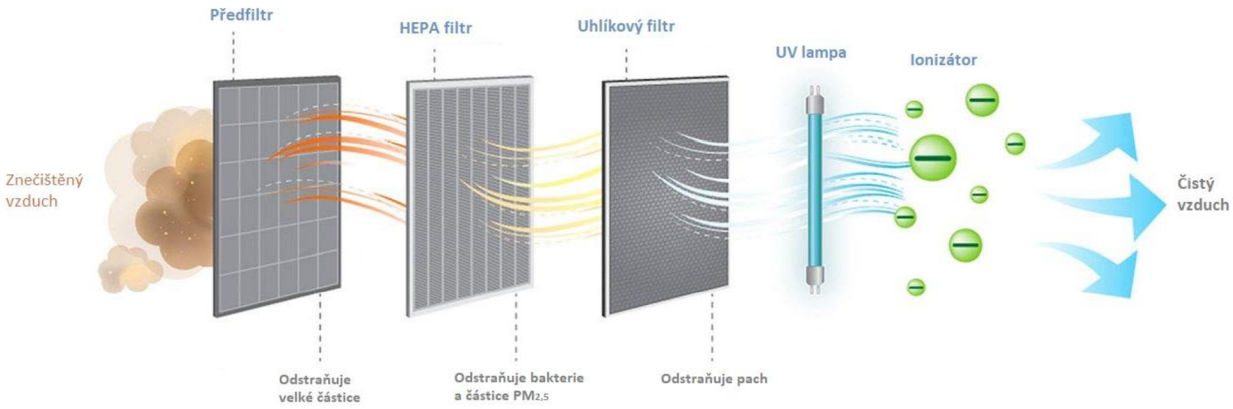
Obr. 7 - Schéma fotokatalytického rozkladu látek (Pimentel et al., 2016)

3.1.7 Ostatní principy

Polyakrylnitrilové (PAN) filtry jsou nanovlákna fungující na principu adheze částic. Jedná se o vzduchový filtr skládající se z nanopolymerních materiálů, které jsou schopny odfiltrovat znečišťující látky z ovzduší. Výroba těchto filtrů je realizována pomocí elektrostatického zvlákňování, kde jsou z roztoku polymeru vlivem elektrostatických a kapilárních sil tvořena ultra jemná vlákna. Polymerní roztok je spojen přímo s vysokým napětím, díky němuž vzniká elektricky nabitý proud polymeru, který je nanášen na uzemněný materiál. Ve své podstatě je to průhledný filtr, jenž se aplikuje na okno v místnosti, kde vytvoří ochranný filtr a při větrání odstraňuje škodliviny vnikající z venkovního prostředí. Vzhledem k účinnosti představují PAN filtry alternativu k filtraci částic pomocí HEPA filtrů, zároveň mají velmi vysokou tlakovou ztrátu (Roy et al., 2019). Pro zvýšení účinnosti lze přidat nanovlákna, jako je například oxid grafenový (GO), redukovaný oxid grafenový (rGO) nebo kovové organické struktury (MOF – Metal Organic Frameworks). Tato aditiva zvyšují kapacitu zachytávání škodlivin díky silné vazebné afinitě a zároveň snižují tlakovou ztrátu při proudění, neboť je možné ponechat větší velikost pórů než by měl samotný PAN filtr (Huang et al., 2020).

V dnešní době je problémem likvidace filtrů. Například HEPA filtry mohou způsobovat sekundární znečištění, což vede k vývoji filtrů z recyklovatelných materiálů. Filtry využívající sójový protein představují biologicky rozložitelnou metodu snižování koncentrace znečišťujících látek ve vzduchu. Protein získaný ze sójových bobů lze získat ve třech formách, a to v podobě izolátu (SPI - Soy Protein Isolate), koncentrátu sójového proteinu nebo sójové mouky. SPI je využíván přednostně díky největšímu obsahu bílkovin a nízkým nákladům (Roy et al., 2019). Obsahuje také mnoho funkčních chemických skupin, které jsou schopny reagovat se škodlivými látkami. Velmi často je kombinován s bakteriální celulózou za účelem lepší filtrace škodlivin. Při procesu čištění vzduchu slouží ve filtru bakteriální celulóza k předběžnému fyzickému zachytávání škodlivin a SPI přitahuje kontaminované částice pomocí elektrostatické síly a dipólové přitažlivosti. Při volbě vhodného poměru SPI a bakteriální celulózy dosahuje účinnost filtru 99,9 % a zároveň nízké tlakové ztráty (Liu et al., 2017).

V praxi jsou všechny tyto principy různě kombinovány. Volba jednotlivých části je ovlivněna místem použití, požadavky uživatele, i cenovou náročností. Na obr. 8 možné uspořádání jednotlivých částí čističky vzduchu.



Obr. 8 – Možné uspořádání jednotlivých částí čističky vzduchu (Technology Designer, 2019)

3.2 Přehled čističek vzduchu

V následující tabulce je uveden přehled různých čističek vzduchu. Porovnání bylo provedeno z hlediska principu čištění vzduchu, účinnosti, doporučené velikosti místnosti, maximálního vzduchového výkonu, hlučnosti, certifikace a ceny.

Tabulka 1 - Přehled čističek vzduchu – uvedené parametry byly převzaty od výrobců

Winix WAC U300	
Princip čištění vzduchu:	5 stupňů: předfiltr, aktivní uhlíkový filtr, antibakteriální úprava CleanCel®, HEPA filtr, ionizace PlasmaWave®
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	30 (max. 60)
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	330
Hlučnost [dB]:	26-55
Certifikace:	AHAM1, ECARF2, B.A.F.3, ARB4 , účinnost testována odborníky z portálu Proalergiky.cz, PlasmaWave testována na Yonsei Univerzity, CE, RoHS, Energy Star
Cena:	6 500 Kč

Winix ZERO

Princip čištění vzduchu:	4 stupně: omyvatelný předfiltr, HEPA filtr, uhlíkový filtr, ionizace PlasmaWave 2.0 ®
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	35 (max. 99)
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	390
Hlučnost [dB]:	27,8-60
Certifikace, testování:	AHAM, ECARF, B.A.F., ARB, účinnost testována odborníky z portálu Proalergiky.cz, PlasmaWave testována na Yonsei Univerzity
Cena:	5 990 Kč

Winix ZERO PRO

Princip čištění vzduchu:	5 stupňů: omyvatelný předfiltr, HEPA filtr, omyvatelný AOC filtr s aktivním uhlím, úprava CleanCel®, ionizace PlasmaWave 2.0 ®
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	42 (max. 120)
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	470
Hlučnost [dB]:	26,4-56
Certifikace, testování:	AHAM, ECARF, B.A.F., ARB, účinnost testována odborníky z portálu Proalergiky.cz, PlasmaWave testována na Yonsei Univerzity
Cena:	8 990 Kč

Winix ZERO +

Princip čištění vzduchu:	5 stupňů: omyvatelný předfiltr, HEPA filtr, uhlíkový CD filtr, úprava CleanCel®, ionizace PlasmaWave®
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	42 (max. 120)
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	470
Hlučnost [dB]:	26,4-56
Certifikace, testování:	AHAM, ECARF, B.A.F., ARB, účinnost testována odborníky z portálu Proalergiky.cz, PlasmaWave testována na Yonsei Univerzity
Cena:	10 600 Kč

Xiaomi Mi Air Purifier 2S

Princip čištění vzduchu:	Třívrstvý filtr s aktivním uhlím
Účinnost [%]:	99,99
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	20-35
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	310
Hlučnost [dB]:	-
Certifikace, testování:	CADR
Cena:	2 990 Kč

Xiaomi Mi Air Purifier Pro

Princip čištění vzduchu:	HEPA H11
Účinnost [%]:	99,99
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	60
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	500
Hlučnost [dB]:	-
Certifikace, testování:	CADR
Cena:	5 100 Kč

Ionic-CARE Triton X6

Princip čištění vzduchu:	Ionizátor a elektrostatický filtr, bez ventilátoru - pohyb vzduchu zabezpečují elektrody (elektronový vítr[3])
Účinnost [%]:	95
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	75
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	65
Hlučnost [dB]:	0
Certifikace, testování:	Expertíza Státního zdravotního ústavu Praha
Cena:	3 500 Kč

iPro Air

Princip čištění vzduchu:	5 filtrů: hliníkový, katalytický, formaldehydový, antibakteriální a HEPA filtr, UV lampa, ionizátor
Účinnost [%]:	99,9
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	20-60
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	320
Hlučnost [dB]:	26
Certifikace, testování:	-
Cena:	5 500 Kč

[3] Pokud na hranách elektrod dochází k tvorbě elektronů, opouštějí tyto elektrony elektrodu vysokou rychlostí a tím s sebou strhávají okolní vzduch. Tento proud vzduchu vyvolaný emisí elektronů se nazývá elektronový vítr (Kim et al., 2012).

Philips AC3259/10

Princip čištění vzduchu:	Filtr NanoProtect
Účinnost [%]:	99
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	47
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	393
Hlučnost [dB]:	-
Certifikace, testování:	ECARF, Airmid7 , AHAM
Cena:	14 000 Kč

Sencor SHA 8400WH

Princip čištění vzduchu:	4 stupně: vstupní, uhlíkový a HEPA filtr, UV-C záření
Účinnost [%]:	99,9
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	20-40 (max. 100)
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	178
Hlučnost [dB]:	30-50
Certifikace, testování:	-
Cena:	3 000 Kč

Sencor SHA 9400WH

Princip čištění vzduchu:	8 stupňů: vstupní filtr, Pre-HEPA (prodloužení životnosti HEPA), HEPA, uhlíkový filtr, formaldehydový filtr, UV-C záření, katalytický filtr (PCO), ionizace
Účinnost [%]:	99,9
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	50
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	483
Hlučnost [dB]:	29-60
Certifikace, testování:	-
Cena:	8 000 Kč

Rohnson R 9600

Princip čištění vzduchu:	7 stupňů: 5 odnímatelných filtrů: hliníkový prachový předfiltr, katalytický, formaldehydový, antibakteriální, HEPA filtr, UV sterilizační lampa, ionizátor
Účinnost [%]:	99,9
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	20-60
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	320
Hlučnost [dB]:	29-48
Certifikace, testování:	-
Cena:	7 000 Kč

Rowenta Intense Pure Air PU4020F1

Princip čištění vzduchu:	4 stupně: předfiltr, aktivní uhlíkový filtr, Allergy filtr, NanoCaptur filtr likvidující formaldehyd
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	35
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	170
Hlučnost [dB]:	
Certifikace, testování:	ECARF
Cena:	6 500 Kč

Concept CA1000 Perfect Air

Princip čištění vzduchu:	4 stupně filtrace: hrubý filtr, prachový předfiltr, anti-formaldehyd/uhlíkový filtr, HEPA filtr, UV lampa a ionizátor
Účinnost [%]:	99,98
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	25-35
Maximální vzduchvý výkon [m^3/h]:	238
Hlučnost [dB]:	30-55
Certifikace, testování:	-
Cena:	3 500 Kč

Electrolux EAP150

Princip čištění vzduchu:	neomyvatelný HEPA filtr, předfiltry, elektrostatický filtr a filtr s aktivním uhlím
Účinnost [%]:	99,97
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	32
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	153
Hlučnost [dB]:	28,5-43,3
Certifikace, testování:	-
Cena:	3 400 Kč

De'Longhi AC230

Princip čištění vzduchu:	Omyvatelný předfiltr, HEPA filtr, fotokatalytický filtr s UVC lampou a ionizátor
Účinnost [%]:	99,9
Doporučená velikost místnosti [m^3]:	80
Maximální vzduchový výkon [m^3/h]:	255
Hlučnost [dB]:	30-50
Certifikace, testování:	-
Cena:	9 800 Kč

4 Porovnání čističek vzduchu

Při hodnocení čističek vzduchu se primárně posuzují tyto základní parametry. Prvním je protiprašná účinnost, jinak řečeno, jak dobře je přístroj schopen odfiltrovat znečišťující látky z prostředí, kam je umístěn. Druhé kritérium je objemový průtok, neboli množství vzduchu, který čističkou projde, v $m^3.h^{-1}$. Hladina akustického tlaku je další porovnávací hodnotou udávající hlučnost přístroje. Úzce souvisí s výkonem a rychlostí ventilátoru. Parametr CADR (Clean Air Delivery Rate) je posledním z řady základních hodnotících kritérií. Popisuje, jaké množství vzduchu bez škodlivých látek čistička produkuje a je uváděn v $m^3.h^{-1}$ (Hutten, 2016). Kromě základních parametrů je možné čističky vzduchu klasifikovat například dle životnosti filtrů a jejich výměny, účinnosti při znečištění filtrů, produkce ozonu, rychlosti ventilátoru, účinnosti ionizace (Čističky vzduchu, 2016).

Hodnota parametru CADR je stanovena z rovnice:

$$CADR = V \cdot (k_{č} - k_n) \tag{8}$$

Kde V je objem místnosti [m^3], $k_č$ je celkové množství částic (měřené) [min^{-1}], k_n je přirozené množství částic, tedy při vypnuté čističce, [min^{-1}] (Hutten, 2016).

Hodnocení se vztahuje na velikost místnosti a procento odfiltrovaných částic. Čím vyšší je hodnota CADR, tím lepší je výkon přístroje. Každé znečišťující látce je přiřazeno individuální hodnocení CADR (Hutten, 2016). V praxi je velmi často CADR udáván pro nejvyšší stupeň ventilátoru, což ovšem znamená větší hlučnost přístroje.

V současné době se čističky vzduchu porovnávají pomocí několika testovacích metod, které se od sebe navzájem liší. Jedná se například o americkou normu US ANSI/AHAM AC-1:2015, čínskou normu GB/T 18801:2015 nebo kanadskou normu NRCC-54013. Srovnání těchto norem z hlediska jejich obsahu znázorňuje Tabulka 2. Je zřejmé, že všechny normy obsahují měření pro porovnání účinnosti filtrace prachových částic. Americká a kanadská norma navíc obsahují měření jiných zdraví škodlivých látek a alergenů. Téma nanočástic je popsáno pouze v kanadské normě, včetně jejich měření a generace. Porovnání čističek vzduchu vzhledem k jejich hlučnosti a měření produkce ozonu obsahuje také pouze kanadská norma. Nedostatky jednotlivých metodik měření tedy spočívají zejména v porovnání čističek vzduchu z hlediska hlučnosti, generace ozonu a zahrnutí nanočástic.

Tabulka 2 - Porovnání norem z hlediska obsahu

	US ANSI/AHAM AC-1:2015	NRCC-54013	GB/T 18801:2015
Filtrace částic	Prachové částice, pyl, cigaretový kouř	Prachové částice, těkavé organické látky	Prachové částice
Zahrnutí nanočástic	ne	ano	ne
Měření hluku	ne	ano	ne
Měření ozonu	ne	ano	ne
Měření UV záření	ne	ne	ne
Měření provozního výkonu	ano	ano	ne
Měření pohotovostního výkonu	ano	ano	ne
Měření průtoku vzduchu	ne	ano	ne

5 Metodika měření

Návrh metodiky by měl poskytnout ucelený postup, který bude zahrnovat aspekty pro porovnání čističek vzduchu vzhledem k jejich účinnosti filtrace, hlučnosti i případné generaci ozonu. Tato metodika je upravenou formou dostupných zahraničních norem US ANSI/AHAM AC-1:2015 a NRCC-54013 a české normy ČSN EN 60335-2-65 ed. 2. Vztahuje se na přenosné čističky vzduchu pro vnitřní prostředí.

5.1 Testovací komora

V testovací komoře je nutno přesně regulovat a udržovat parametry prostředí jako je rychlost proudění vzduchu, teplota, relativní vlhkost, tlak, úroveň pozadí částic, ozonu a těkavých organických látek. Rozsah uvažovaných podmínek je typický pro obytné místnosti v České republice a je třeba simulovat situaci ve skutečně větraných místnostech, popřípadě v místnostech s ventilačními systémy. Dále je také třeba vybavit testovací komoru zařízeními, která jsou typická pro obytné prostory a uspořádat je tak, aby testovací komora byla co nejpřesnějším modelem obytné místnosti, popřípadě prostoru, pro který je čistička vzduchu určena.

5.1.1 Testovací komora pro porovnání čističek z hlediska protiprašné účinnosti a generace ozonu

Konstrukce

Vnitřní rozměry testovací komory jsou 2,5 m, 3,5 m a 3,0 m (26,3 m^3). Pokud specifikace čističky vzduchu udává použití přístroje pro prostory s objemem nad 30 m^3, je třeba odpovídajícím způsobem rozměry testovací komory zvětšit. Konstrukce je u země utěsněná zvenku i zevnitř těsnící hmotou, aby nedocházelo k infiltraci okolního vzduchu do komory a úniku vzduchu z testovací komory do okolí.

Podlaha

Doporučen je hladký povrch (linoleum, vinyl, dlažba, atd.

Filtrace přiváděného vzduchu

Vzduch přiváděný do testovací komory by měl být nejdříve pročištěn. Filtrace by měla probíhat přes předfiltr (účinnost min. 60 %) a následně HEPA filtr (účinnost min. 99,97 %).

Cirkulace vzduchu

Správný oběh vzduchu by měl zajistit recirkulační ventilátor a směšovací stropní ventilátor.

Monitorování dat

Zařízení v testovací komoře by měla být schopna monitorovaná data ukládat a sdílet se zařízeními mimo testovací komoru, aby do ní nebyl vyžadován vstup po celou dobu měření.

Připojení

K dispozici by mělo být adekvátní připojení pro jednotlivé přístroje. Jedná se především o připojení odběru vzorků, napájení a komunikace.

Údržba

Celá testovací komora by měla být přístupná pro čistění a údržbu.

5.1.2 Testovací komora pro porovnání čističek z hlediska hluku

Pro vyhodnocení akustického výkonu by mělo být měření prováděno v dozvukové zkušební komoře, která vyhovuje požadavkům metody ISO 3743-1. Místnost komory má rozměry 7,96 m, 7,09 m, 4,87 m a objem 251,7 m^3. Povrchy místnosti jsou z tvrdého natřeného betonu. Čistička vzduchu je umístěna na podlaze uprostřed místnosti s minimální vzdáleností 1 m od okolních stěn. V místnosti je instalováno pět nízkofrekvenčních zvukově absorpčních panelů, aby se snížila nízkofrekvenční prostorová variace hladin zvuku v místnosti.

5.2 Systém pro měření částic

Generace částic

Zkušební částice jsou aerosolové částice běžně obsažené ve vzduchu. Generátor částic musí poskytovat stabilní zkušební částice dostatečné koncentrace v rozsahu velikostí průměru 0,02 μm až 3 μm, aniž by došlo k přetížení čítače aerosolových částic.

Zařízení pro měření částic

Vzhledem ke skutečnosti, že se testované částice pohybují v rozmezí velikostí od nanočástic (<0,1 μm) až po hrubé částice (>2,5 μm), žádný přístroj nebude schopen proměřit celé spektrum částic. Je třeba získat celkové koncentrace částic ve velikostních skupinách pro nanočástice a jemné i hrubé částice. Pro měření částic větších než 1 μm jsou aplikovány optické čítače částic (OPC – Optical Particle Counter) určující velikost částic na základě intenzity rozptýleného světla. Pro měření nanočástic jsou nejčastěji používány přístroje SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer) s kondenzačním čítačem částic (CPC – Condensation Particle Counter) a analyzátorem diferenciální mobility (DMA – Differential Mobility Analysis), jelikož nanočástice jsou příliš malé, aby je mohl detekovat optický čítač. DMA využívá souvislosti mezi elektrickou mobilitou a velikostí částice. Díky tomuto principu klasifikuje částice do velikostních tříd. Princip funkce CPC spočívá ve vystavení částic přesyceným parám, které na jejich povrchu kondenzují a částice tím zvětšují svou velikost. Tyto zvětšené částice už lze zaznamenat pomocí OPC.

Zařízení pro měření hluku

Vybavení používané pro akustická měření referenčního zdroje zvuku a každého zkušebního zdroje by mělo zahrnovat mikrofon, předzesilovač mikrofonu, napájení mikrofonu a zařízení pro kalibraci.

Zařízení pro měření koncentrace ozonu

Měřicí zařízení pro koncentrace ozonu by mělo být založeno na principu UV absorpce nebo chemiluminiscence[4]. Přístroj by měl být schopen měřit v rozsahu 1,5 ppb až po 100 ppm s přesností 2 % a rozlišením 0,1 ppb. Doba odezvy zařízení by měla být maximálně 1 minuta.

5.3 Testovací prostředí

Přístroje pro měření teploty vzduchu by měly být schopny měřit v rozmezí 15 °C až 35 °C s přesností ±0,1 °C. Tato přesnost musí být zaručena pro rozdíl mezi teplotou vzduchu a střední radiační teplotou rovnou nebo menší než 10 °C. V případě potřeby by měla být přijata preventivní opatření k ochraně senzoru před jakýmkoliv vlivem tepelného záření z okolních zdrojů tepla, například generátoru aerosolů, čističek vzduchu, atd. Přístroje by měly velmi rychle reagovat. Doba odezvy by neměla přesáhnout 1 s.

Přístroje pro měření relativní vlhkosti vzduchu by měly být schopné měřit v rozsahu od 0 % do 100 % s přesností ±1 %. Rozlišení nástroje by mělo být 0,1 %. Doba odezvy nástroje by měla být nejkratší možná doba odezvy (minimálně 1 minuta).

K měření rychlosti vzduchu se použije všesměrový anemometr. Jako alternativu lze použít směrově citlivé anemometry, ale pouze v případě, že jsou schopny indikovat skutečnou rychlost vzduchu v jakékoli zkušební poloze. Přístroje by měly být schopny měřit rychlost vzduchu v rozsahu 0,1 $m.s^{-1}$ až 5 $m.s^{-1}$ s přesností ±0,05 $m.s^{-1}$ nebo ±5 % odečtu, podle toho, která hodnota je větší. Rozlišení přístroje by mělo být alespoň 0,01 $m.s^{-1}$ a doba odezvy neměla přesáhnout 0,2 s.

Ověření kvality systému měření

Kvalifikační a kalibrační zkoušky slouží k ověření, zda lze v takto sestaveném systému provést přesné měření účinnosti filtrace přenosných čističek vzduchu. Je nutné provést následující měření:

- rychlost proudění vzduchu, teplota, vlhkost, tlak;
- koncentrace částic na pozadí a horní limitní koncentrace pro čítače částic;
- koncentrace ozonu na pozadí;
- směšování vzduchu v komoře;
- doba odezvy systému;
- kalibrace všech přístrojů.

5.4 Podmínky měření

Pro vyhodnocení výkonnosti a porovnání přenosných čističek vzduchu se všechna měření provádějí ve zkušební komoře popsané výše za následujících podmínek:

[4] Chemiluminiscence je emise světla ve viditelné, nebo infračervené oblasti. Vlivem vybuzení elektronů pomocí chemické reakce se elektrony dostávají do vyšších energetických hladin elektronového obalu a při návratu do hladin základních vyzařují luminiscenční záření (Ragavan, Neethirajan, 2019).

- Přenosná čistička vzduchu je umístěná uprostřed místnosti.
- Teplota v komoře je 21 ±2 °C a relativní vlhkost je 40 ±5 %.
- Rychlost výměny vzduchu v komoře by neměla přesáhnout 0,03 výměny vzduchu za hodinu.
- Přijatelné rozmezí početních koncentrací částic pro počáteční podmínky zkoušky je 200 až 400 částic.cm^{-3}, u nanočástic je minimální koncentrace 10 000 částic.cm^{-3}, perioda vzorkování je 20 s při průtoku vzduchu 1 l.min^{-1} ±5 %.
- Maximální koncentrace částic pozadí neboli přípustná koncentrace částic ve zkušební komoře před zavedením zkušebních částic nesmí být větší než 0,03 částic.cm^{-3}. Pokud tohoto nelze snadno dosáhnout, musí být provedeny další postupy čištění zkušební komory.
- Měření částic bude prováděno uprostřed komory.
- Místa pro dávkování částic budou ze stěny na straně komory ve výšce nejméně 0,8 m nad podlahou.

Příprava před měřením

Pokud to umožní specifika výrobce, umístí se čistička vzduchu do středu testovací komory tak, aby vyústění pročištěného vzduchu bylo co nejblíže středu komory. V případě, že je vzduch z čističky vypouštěn pouze určitým směrem, nesmí být orientován k čítačům částic. U čističek s víceúrovňovým nastavením výkonu je vždy nastaven nejvyšší stupeň čištění vzduchu. Dle pokynů výrobce je nutno zkontrolovat funkčnost všech přístrojů a měřidel.

5.5 Postup zkoušky pro určení výkonu čističky vzduchu

5.5.1 Pokles koncentrace částic při vypnuté čističce vzduchu

1. Čistička vzduchu se umístí do testovací komory dle kapitoly 5.4, ověří se její funkčnost a poté se vypne.
2. Stropní směšovací ventilátor se uvede do provozu.
3. Koncentrace na pozadí musí klesnout pod hodnotu 0,03 částic.cm^{-3} pro částice v rozmezí velikostí 0,5 µm až 3,0 µm pomocí filtračního systému testovací komory. Současně je nutno regulovat prostředí, aby podmínky v komoře splňovaly požadavky uvedené v kapitole 5.4.
4. Po dosažení žádané koncentrace pozadí testovací komory je tato koncentrace zaznamenána a vypnuta regulace prostředí.
5. Ihned je spuštěn přívod vzduchu do generátoru aerosolu a následně zapnut samotný generátor dokud koncentrace částic na pozadí nedosáhne požadované počáteční hodnoty stanovené v kapitole 5.4 (200 až 400 částic.cm^{-3}).
6. Pokud je koncentrace na pozadí v požadovaných mezích počátečních hodnot, je vypnut generátor aerosolu i jeho přívod vzduchu.
7. Po uplynutí jedné minuty, až se vzduch v komoře promísí, bude vypnut směšovací stropní ventilátor. Recirkulační ventilátor bude v provozu po celou dobu zkoušky.

8. Od vypnutí ventilátoru musí uběhnout minimálně jedna minuta, aby bylo zajištěno, úplné zastavení ventilátoru. Následuje spuštění čítačů částic a zaznamenání hodnot koncentrací částic, což je prvním bodem měření. Pokud koncentrace aerosolu není v počátečních mezích, je nutno měření skončit.
9. Údaje o koncentracích budou získávány po dobu 60 minut s jednominutovými intervaly. Minimálně je zapotřebí devět měřicích bodů.
10. Během zkoušky je třeba zaznamenat průměrnou relativní vlhkost a teplotu v testovací komoře.
11. Výpočet konstanty rozpadu pro aerosol dle rovnice (10).
12. Určení přijatelnosti měření určením směrodatné odchylky odstraňování částic dle rovnice (16).

5.5.2 Pokles koncentrace částic při zapnuté čističce vzduchu

1. Čistička vzduchu se umístí do testovací komory dle kapitoly 5.4, ověří se její funkčnost a poté se vypne.
2. Stropní směšovací ventilátor se uvede do provozu.
3. Koncentrace na pozadí musí klesnout pod hodnotu 0,03 částic.cm^{-3} pro částice v rozmezí velikostí 0,5 μm až 3,0 μm pomocí filtračního systému testovací komory. Současně je nutno regulovat prostředí, aby podmínky v komoře splňovaly požadavky uvedené v kapitole 5.4.
4. Po dosažení žádané koncentrace pozadí testovací komory je tato koncentrace zaznamenána a vypnuta regulace prostředí.
5. Ihned je spuštěn přívod vzduchu do generátoru aerosolu a následně zapnut samotný generátor dokud koncentrace částic na pozadí nedosáhne požadované počáteční hodnoty stanovené v kapitole 5.4 (200 až 400 částic.cm^{-3}).
6. Pokud je koncentrace na pozadí v požadovaných mezích počátečních hodnot, je vypnut generátor aerosolu i jeho přívod vzduchu.
7. Po uplynutí jedné minuty, až se vzduch v komoře promísí, bude vypnut směšovací stropní ventilátor. Recirkulační ventilátor bude v provozu po celou dobu zkoušky.
8. Od vypnutí ventilátoru musí uběhnout minimálně jedna minuta, aby bylo zajištěno, úplné zastavení ventilátoru a následně je spuštěna čistička vzduchu.
9. Spuštění čítačů částic a zaznamenání hodnot koncentrací částic je prvním bodem měření. Pokud koncentrace aerosolu není v počátečních mezích, je nutno měření skončit.
10. Údaje o koncentracích budou získávány po dobu 60 minut s jednominutovými intervaly. Je nutné využít všechny přijatelné datové body, minimálně je však potřeba devět datových bodů.
11. Během zkoušky je třeba zaznamenat průměrnou relativní vlhkost a teplotu v testovací komoře. Následně je vypnuta čistička vzduchu.
12. Výpočet konstanty rozpadu pro aerosol dle rovnice (10) a korelačního koeficientu dle rovnice (11).
13. Určení přijatelnosti měření určením směrodatné odchylky odstraňování částic dle rovnice (16).

14. Stanovení parametru CADR pro měřenou čističku vzduchu dle rovnice (8) a jeho směrodatné odchylky pomocí rovnice (17). Pokud je směrodatná odchylka menší než hodnota parametru CADR = 39 $m^3.h^{-1}$, nebo 20 % hodnoty parametru CADR, určuje větší z těchto hodnot, zda lze měření považovat za přijatelné.

5.5.3 Měření akustického výkonu čističek vzduchu

Čistička vzduchu je zapnuta na nejvyšší možný výkon, a pokud disponuje jinými funkcemi, měly by být zapnuty i tyto funkce. Hodnocení akustického výkonu přenosných čističek vzduchu se stanoví pomocí naměřených hladin akustického výkonu čističek, aby mohla být odhadnuta očekávaná hladina akustického tlaku váženého filtrem A v typické obytné místnosti v České republice. Průměrný objem obytných místností je 50,0 m^3 a průměrná doba dozvuku je 0,5 s.

5.5.4 Měření koncentrace ozonu

Vyhodnocují se emise ozonu při spuštěné i vypnuté čističce vzduchu. Tento test je určen ke kontrole, zda není samotná čistička vzduchu sama zdrojem znečišťujících látek. Měření koncentrace ozonu by mělo být provedeno ve vzdálenosti 50 mm od čističky vzduchu a přístroj pro zaznamenání koncentrace by měl být umístěn ve středu proudu vzduchu vycházejícího z čističky. Podle normy ČSN EN 60335-2-65 ed. 2 Zvláštní požadavky na čističe vzduchu nesmí koncentrace ozonu ve vzdálenosti 50 mm od přístroje překročit hodnotu 50 ppb. Tato hodnota je také limitem pro osmihodinovou expozici v pracovním prostředí.

Měření emisí ozonu při vypnuté čističce vzduchu

1. V testovací komoře jsou podmínky stanovené v kapitole 5.4, proběhne ověření funkčnosti čističky vzduchu a následuje její vypnutí.
2. Je provedeno měření koncentrací ozonu a vyhodnocena ustálená koncentrace ozonu na pozadí. Tato koncentrace nesmí za ustálených podmínek překročit hodnotu 50 ppb.
3. Emise ozonu jsou následně počítány dle rovnice (18).

Měření emisí ozonu při zapnuté čističce vzduchu

1. V testovací komoře jsou podmínky stanovené v kapitole 5.4, proběhne ověření funkčnosti čističky vzduchu a následuje její spuštění na plný výkon.
2. Měření koncentrace ozonu mimo testovací komoru. Minimální doba trvání tohoto měření je 5 minut.
3. Měření koncentrace ozonu v testovací komoře po dobu 24 hodin. Vypočítá se rovnovážná koncentrace ozonu, která je definována průměrem všech 30 minutových ustálených koncentrací korigovaných na pozadí. U zařízení, kde se koncentrace ozonu za ustálených podmínek nezvýšila, je nutno měření ukončit.
4. Vypnutí čističky vzduchu a sledování koncentrace ozonu. Měření koncentrace ozonu by mělo být nejméně dalších 30 minut, pokud je pro analýzu vyžadováno minimálně 9 platných datových bodů.
5. Výpočet konstanty rozpadu podle rovnice (10) pro ozon a míry emisí ozonu podle rovnice (18).

6. Porovnání vypočítané míry emisí ozonu s předepsanou úrovní emisí, která zajistí ustálenou koncentraci ozonu 50 ppb podle kapitoly 5.6.2. Ohodnoťte emise ozonu podle kapitoly.

5.6 Vyhodnocení měření

5.6.1 Veličiny pro vyhodnocení měření odstraňování částic

Rychlost poklesu koncentrace částic je stanovena pomocí konstanty rozpadu. Rovnice pro její výpočet má stejný tvar jako rovnice pro radioaktivní rozpad. V tomto případě je však snižování koncentrace způsobeno depozicí a aglomerací aerosolů, nikoliv rozpadem jader částic. Jelikož výměnu vzduchu v testovací komoře lze zanedbat, není do výpočtu konstanty rozpadu zahrnuta rychlost výměny vzduchu. Konstanta rozpadu je vyjádřena z rovnice (9) pro výpočet koncentrace v libovolném čase měření:

$$C_{t_i} = C_0 e^{-kt_i} \tag{9}$$

Kde C_{ti} je koncentrace částic v čase t_i [počet částic.cm^{-3}], C_0 je počáteční koncentrace v čase $t = 0\ s$ [počet částic.cm^{-3}], k je konstanta rychlosti rozpadu [min^{-1}] a t je čas [min].

Úpravou rovnice (9) je vyjádřena konstanta rozpadu jako:

$$k = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} t_i \ln C_{t_i}\right) - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \ln C_{t_i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} {t_i}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2} \tag{10}$$

Kde n je počet měření [-].

Pokud je tato konstanta počítána pro měření s vypnutou čističkou vzduchu, kapitola 5.5.1, stanovuje rychlost přirozeného poklesu koncentrace částic ve vzduchu v testovací komoře. Vypočtená konstanta rozpadu pro měření se zapnutou čističkou vzduchu, kapitola 5.5.2, určuje rychlost poklesu koncentrace částic pomocí čističky vzduchu včetně rychlosti přirozeného poklesu koncentrace částic.

Pro popis a hodnocení korelačních vztahů mezi dvěma veličinami je často užívána lineární regresní funkce. Korelační koeficient r [-] vyjadřuje míru lineární asociace mezi dvěma náhodnými veličinami, v tomto případě mezi časem a přirozeným logaritmem koncentrace znečišťující látky. Jeho výpočet je proveden pomocí koeficientu determinace r^2 [-]:

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i\right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} {x_i}^2\right)\left(\sum_{i=1}^{n} {y_i}^2\right)} \tag{11}$$

Kde jednotlivé členy lze vyjádřit jako:

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i = \sum_{i=1}^{n} t_i \ln C_{t_i} - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \ln C_{t_i}\right) \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^2 = \sum_{i=1}^{n} t_i^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)^2 \tag{13}$$

$$\sum_{i=1}^{n} y_i^2 = \sum_{i=1}^{n} t_i \ln C_{t_i}^2 - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} \ln C_{t_i}\right)^2 \tag{14}$$

Korelační koeficient nabývá hodnot od -1 do 1. Minimální hodnota korelačního koeficientu je 0,95 pro celkovou koncentraci částic a 0,9 pro jednotlivé velikostní třídy částic. Tato hodnota určuje, zda lze měření považovat za přijatelné.

Obecně lze odhad směrodatné odchylky pro regresní přímku stanovit podle rovnice:

$$S_{reg} = \sqrt{\frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n}\left(\ln C_{t_i} - b - mt_i\right)} \tag{15}$$

Kde S_{reg} je odhad směrodatné odchylky regresní přímky [-], b je průsečík regresní přímky s osou neboli ekvivalent odhadované počáteční koncentrace [částic. m^{-3}] a m je sklon regresní přímky [min^{-1}].

Odhad směrodatné odchylky sklonu regresní přímky pro částice je poté stanoven jako:

$$S_{sklonu} = \sqrt{\frac{S_{reg}^2}{\sum_{i=1}^{n} t_i - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} t_i\right)}} \tag{16}$$

Výpočet parametru CADR stanovuje rovnice (8). Směrodatná odchylka tohoto parametru je pak stanovena pomocí rovnice:

$$S_{CADR} = V\left(S_{sklonu,k_č}^2 + S_{sklonu,k_n}^2\right) \tag{17}$$

Kde V je objem místnosti [m^3], $S_{sklonu,kč}$ je směrodatná odchylka regresní přímky při zapnuté čističce vzduchu [min^{-1}], neboli směrodatná odchylka celkové rychlosti poklesu koncentrace částic, a $S_{sklonu,kn}$ je směrodatná odchylka regresní přímky při vypnuté čističce vzduchu, tedy směrodatná odchylka rychlosti přirozeného poklesu koncentrace částic [min^{-1}].

5.6.2 Veličiny pro vyhodnocení měření koncentrace ozonu

Míra emise ozonu je počítána pomocí rovnice:

$$E_o = C_e k_e V \tag{18}$$

Kde E je míra emisí ozonu [mg.h^{-1}], C_e je rovnovážná koncentrace měřená v ustáleném stavu [mg.m^{-3}] a k_e je konstanta rozpadu pro ozon [min^{-1}].

Pro vnitřní prostory v České republice je stanoven hygienický limit koncentrace ozonu na 50 ppb. Pro porovnání čističek vzduchu z hlediska emisí ozonu je třeba porovnat spočítané emise ozonu pomocí rovnice (18) s tímto limitem.

5.6.3 Veličiny pro vyhodnocení měření hladin akustického výkonu

Očekávanou hladinu akustického tlaku váženou filtrem A lze spočítat jako:

$$L_{pA} = L_{WA} + 10\log\left[\frac{4 \cdot T_{60}}{0{,}161 \cdot V}\right] \tag{19}$$

Kde L_{PA} je hladina akustického tlaku vážená filtrem A [dB], L_{WA} je hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB] určená normou ISO 3743-1, T_{60} je průměrná doba dozvuku v typickém obytné místnosti [s] a V je objem místnosti [m^3].

Při použití hodnot pro typickou obytnou místnost v České republice lze dosadit do rovnice (19):

$$L_{pA} = L_{WA} + 10\log\left[\frac{4 \cdot 0{,}05}{0{,}161 \cdot 50}\right] = L_{WA} - 6{,}1$$

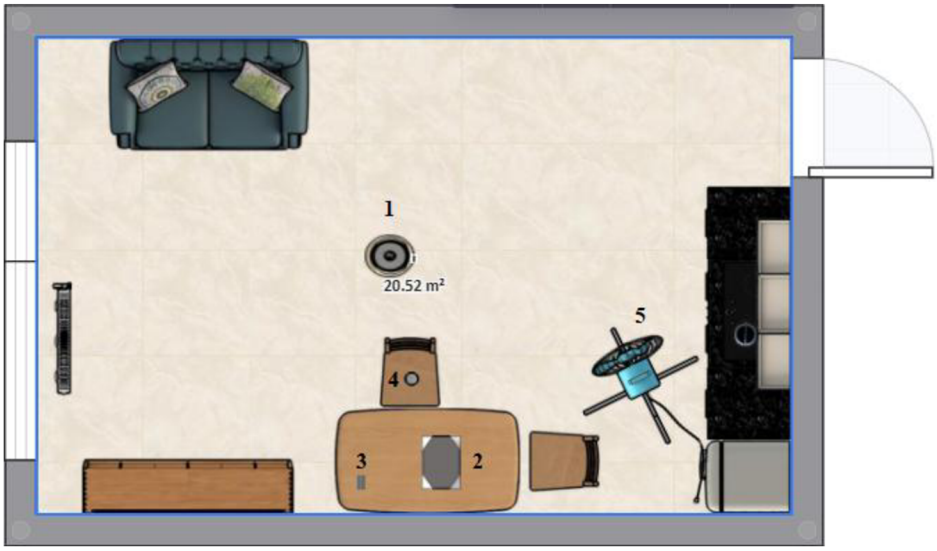
Produkovaný hluk čističkou vzduchu je určen celkovou hladinou akustického tlaku váženého filtrem A, který nejlépe připodobňuje hladiny zvuku k hladinám, které vnímá lidské ucho.

6 Měření účinnosti a rychlosti filtrace

Vzhledem k současné situaci s pandemií koronaviru SARS-CoV-2 se měření nemohlo uskutečnit v laboratoři, ale proběhlo v domácích podmínkách. Nebylo tedy možné zajistit podmínky uvedené v navržené metodice, avšak měření simuluje reálné podmínky, ve kterých by měly být čističky vzduchu běžně používány.

6.1 Testovací komora

Testovací komorou byla obývací místnost v bytovém domě o rozměrech 5,7 m, 3,2 m a 2,6 m. Vnitřní objem místnosti je tedy 47,2 m^3. Podlaha je pokryta dlažbou. Okno orientované na východ. Vybavení v místnosti je typické pro obývací pokoj s kuchyňským koutem, tedy kuchyňská linka, jídelní stůl, židle, pohovka, televize a skříň. Testovací místnost a přibližné rozestavění přístrojů zobrazují Obr. 9 a 10.



Obr. 9 - Vizualizace testovací místnosti pohled shora (1-čistička vzduchu, 2-optický čítač, 3-zařízení pro měření teploty a vlhkosti, 4-svíčka sloužící jako generátor aerosolu, 5-ventilátor)

Obr. 10 - Vizualizace testovací místnosti boční pohled (1-čistička vzduchu, 2-optický čítač, 3-zařízení pro měření teploty a vlhkosti, 4-svíčka sloužící jako generátor aerosolu, 5-ventilátor)

6.2 Měřicí přístroje

6.2.1 Lighthouse Solair 3100

Princip přístroje Solair 3100 spočívá v měření částic pomocí jejich optických vlastností. Jedná se o optický čítač částic. Za pomoci vnitřní pumpy je vzduch vtahován do přístroje, kde jsou částice řazeny šesti kanály. Následně prochází skrz světelný paprsek a fotodioda pomocí příchozího signálu stanoví počet částic v jednotlivých třídách. Světelným zdrojem je laserová dioda, rozsah měřicích částic je od 0,3 μm do 25 μm a průtok vzduchu je 28,3 $l.min^{-1}$. Velikosti jednotlivých kanálů jsou 0,3 μm, 0,5 μm, 1,0 μm, 3,0 μm, 5,0 μm a 10,0 μm.

Vzorkování je prováděno v intervalech od sekundy po 99 hodin. Vyhodnocení je realizováno pomocí určování koncentrací, počtů částic, nebo okamžitého počtu částic. Vyjádření počtů částic ve velikostních třídách je možné jak kumulativně, tak diferenčně. Účinnost přístroje je uváděna 50 % pro částice menší než 0,45 μm a 100 % pro větší částice. Přístroj umožňuje propojení se softwarem LMS Express a LMS RT pomocí drátového připojení.

Obr. 11 - Lighthouse Solair 3100

6.2.2 Sonoff TH16

Přístroj pro měření teploty a vlhkosti určený do vnitřních prostor, jako jsou domácnosti, kanceláře, apod. Pro stanovení teplot a vlhkosti vzduchu obsahuje přístroj čidlo Si7021, které má rozsah měřených teplot -10 °C až 85 °C s přesností ±0,5 °C. Rozsah měřených vlhkostí je od 0 % do 80 % s přesností ±3 %. Ovládání přístroje je možné pouze přes mobilní aplikaci.

Obr. 12 - Sonoff TH16

6.2.3 Ventilátor Proklima

Stojanový ventilátor byl použit pro měření z důvodu potřeby promísení vzduchu uvnitř místnosti. Maximální průtok vzduchu udávaný výrobcem je 2427 $m^3.h^{-1}$. Ventilátor lze spouštět ve třech výkonnostních stupních. Hlava ventilátoru umožňuje oscilaci, kterou lze pomocí zajišťovacího kolíku deaktivovat. Tato možnost byla využita při všech experimentech, hlava ventilátoru tedy zůstala v klidu a vzduch byl hnaný pouze jedním směrem.

Obr. 13 - Ventilátor Proklima

6.2.4 Testované čističky vzduchu

Pro porovnání byly zvoleny dvě čističky vzduchu. Jednalo se o čističku DeLonghi AC230 (Obr. 15) a Ionic-CARE Triton X6 (Obr. 14). Jejich specifikace je uvedena v kapitole 3.2 Přehled čističek vzduchu v Tabulce 1.

Obr. 14 - Čistička vzduchu Ionic-CARE Triton X6

Obr. 15 - Čistička vzduchu De'Longhi AC230

6.3 Popis experimentu

Nejdříve byla provedena zkušební měření pro stanovení optimálních podmínek. Jednalo se především o dobu větrání, ustálení parametrů, spuštění čítače, určení doby hoření svíčky i funkce ventilátoru a stupně výkonu čističky vzduchu. Dle výsledků těchto měření byla sestavena měřicí trať a určen postup uvedený v této kapitole.

Finální experimenty proběhly v již zmíněné obytné místnosti. Nejdříve bylo provedeno měření bez zapnuté čističky vzduchu neboli přirozený úbytek částic. Dalším měřením bylo testování čističky De'Longhi AC230 a následně proběhl experiment s čističkou Ionic-CARE Triton X6. Každý experiment byl proveden v jiný den, aby nedošlo k ovlivnění výsledků měření.

Vzhledem ke skutečnosti, že měření probíhalo v domácím prostředí, nebylo možné uskutečnit filtraci vzduchu přiváděného do místnosti, jak je uvedeno v metodice pro porovnání čističek vzduchu. Za účelem ustálení koncentrací částic ve venkovním a vnitřním prostředí bylo pomocí okna větráno 20 minut. Následovalo ustálení parametrů vnitřního prostředí po dobu 10 minut. V tomto časovém rozmezí byla ověřena funkčnost zařízení, to znamená pro Lighthouse Solair 3100 nasazení HEPA filtru a spuštění vzorkování po dobu jedné minuty.

Optický čítač byl umístěn na stole, vzdálen 0,8 m od podlahy, 1,3 m od čističky vzduchu a 1,4 m od ventilátoru. Po ověření funkčnosti byl čítač zapnut. Nastavení vzorkování bylo pro jednotlivá měření odlišné a jeho specifika jsou uvedena v popisu jednotlivých experimentů.

Jako generátor aerosolu byla zvolena hořící svíčka (Obr. 16) umístěná na židli ve výšce 0,45 m, 0,6 m daleko od čítače a 1,5 m od ventilátoru. Zapálena byla společně se spuštěním ventilátoru po 10 minutách od zapnutí čítače částic, aby došlo k úplnému ustálení parametrů uvnitř místnosti. Hoření trvalo 13 minut, poté byl plamen sfouknut. Vzhledem ke skutečnosti, že po uhašení plamene svíčky dochází stále ke generaci aerosolu ve formě dýmu, zůstává směšovací ventilátor zapnutý. Tento proces trvá přibližně 2 minuty, proto je ventilátor spuštěný 15 minut. Následně je ventilátor vypnut, svíčka uzavřena víkem a jsou zaznamenány počáteční koncentrace částic. Pro všechna měření je tento moment prvním bodem pro vyhodnocení.

Obr. 16 - Hořící svíčka jako generátor aerosolu

Všechny měřicí přístroje a čističky vzduchu byly připojeny k napájení po celou dobu měření. Teplota a vlhkost byly zaznamenávány po celou dobu měření. Hodnoty atmosférického tlaku byly získány z nejbližší meteostanice, v tomto případě z meteostanice Brno - Kraví hora. Kromě měřicích zařízení a čističek vzduchu nebyl spuštěn žádný jiný elektronický přístroj. V době před uskutečněním experimentu nebyla v místnosti provozována žádná činnost, již by provázelo generování aerosolu, popřípadě víření vzduchu v prostředí, jako je například vaření, vysávání apod. Pro zajištění co nejpříznivějších podmínek pro objektivnost měření se po zhasnutí svíčky a vypnutí ventilátoru až do konce měření v místnosti nikdo nepohyboval (obsluhující osoba odešla z místnosti).

6.4 Experiment s vypnutou čističkou vzduchu

Větrání, ustálení parametrů prostředí a nastavení přístrojů bylo provedeno dle výše zmíněného popisu. U optického čítače Lighthouse Solair 3100 bylo nastaveno vzorkování po jedné minutě. Po sfouknutí svíčky a zastavení ventilátoru byl počet částic zaznamenáván po dobu jedné hodiny. Celkem tedy proběhlo 85 cyklů.

6.5 Experiment se zapnutou čističkou vzduchu

Čistička vzduchu byla umístěna uprostřed místnosti na podlaze, boční stranou směřující k čítači. Bylo provedeno ověření její funkčnosti, což znamená zapnutí přístroje, vypnutí a zapnutí přídavných funkcí (například doba funkce čističky, automatické vyhodnocování AQI atd.), změna výkonu čističky aj. Poté byla čistička vypnuta.

Následovalo nastavení parametrů a provedení kroků zmíněných v popisu experimentu. Vzorkování optického čítače bylo nastaveno po jednominutových intervalech, aby udávalo kumulativní počty částic v jednotlivých velikostních třídách. Celkem bylo nastaveno 85 cyklů, které čítač provedl, aby v jeho měření bylo zahrnuto ustálení parametrů (10 minut), vliv svíčky a ventilátoru (15 minut) a samotná funkce čističky (60 minut). U čističky vzduchu Ionic-CARE Triton X6 bylo nastaveno 180 cyklů (funkce čističky 155 minut), a to z důvodu absence vnitřního ventilátoru přístroje, z čehož lze predikovat delší dobu potřebnou k vyčištění místnosti. Do vyhodnocení výsledků a porovnání čističek vzduchu bylo následně zahrnuto pouze prvních 60 cyklů, jako tomu bylo u čističky De'Longhi AC230.

Minutu po vypnutí ventilátoru a zavření svíčky byla zapnuta čistička vzduchu, u čističky vzduchu De'Longhi AC230 byla funkce AQS vypnuta a bylo nastaveno vypnutí čističky po jedné hodině. Výrobce u čističky De'Longhi AC230 uvádí průtok vzduchu pro první stupeň ventilátoru 110 $m^3.h^{-1}$, uvedená doba měření by tedy měla postačit pro pročištění celé místnosti. Pro čističku Ionic-CARE Triton X6 udává výrobce pro nastavení středního stupně ventilátoru velikost místnosti do 50 m^3 a průtok vzduchu 38 $m^3.h^{-1}$. Pokud bude tedy čistička zapnutá zmiňovaných 155 minut, mělo by opět dojít k filtraci celého objemu testovací místnosti. Po uplynutí stanovené doby měření došlo k vypnutí přístrojů a zastavení měření, u experimentu s čističkou De'Longhi AC230 automaticky, u Ionic-CARE Triton X6 manuálně.

7 Výsledky měření a diskuze

7.1 Výsledky měření

Při měření s vypnutou čističkou vzduchu byla během celého měření teplota vzduchu 23,2 °C, vlhkost vzduchu 68 % a atmosférický tlak 1008,5 hPa. Pro všechna měření byly počty částic přepočteny na početní koncentrace [počet částic.m^{-3}]. Výsledné hodnoty měření poklesu koncentrace částic při vypnuté čističce vzduchu jsou uvedeny v Příloze I. V Tabulce 3 jsou uvedeny průměrné, maximální a minimální hodnoty a směrodatné odchylky pro koncentrace částic v jednotlivých velikostních třídách.

Tabulka 3 - Výsledky měření bez zapnuté čističky vzduchu

	Početní koncentrace částic [počet částic.m^{-3}]					
Velikostní třídy	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm	3,0 µm	5,0 µm	10,0 µm
Průměr	98495298,3	43539006,5	15830247,8	169801,1	5651,7	40,7
Maximum	125258163	92970389	62875830	4082615	176184	707
Minimum	26964452	3404170	632721	14629	1696	0
Směrodatná odchylka	27930886,2	23667355,6	11534263,4	435996,9	18662,4	108,3

Při měření se zapnutou čističkou vzduchu byla nejdříve testována čistička De'Longhi AC230. Teplota v průběhu měření po celou dobu měření oscilovala mezi 23,0 °C a 23,1 °C. Vlhkost vzduchu byla ustálena na hodnotě 65 % a atmosférický tlak měl hodnotu 1012,1 hPa. Teplota při experimentu s čističkou Ionic-CARE Triton X6 byla po celou dobu 22,7 °C, měřená vlhkost vzduchu byla 64 % a atmosférický tlak byl 1014,5 hPa.

Číselné výsledky měření s čističkou De'Longhi jsou uvedeny v Příloze II a pro měření s čističkou Ionic-CARE Triton X6 v Příloze III. Průměrné, maximální a minimální hodnoty a směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tabulce 4 a 5.

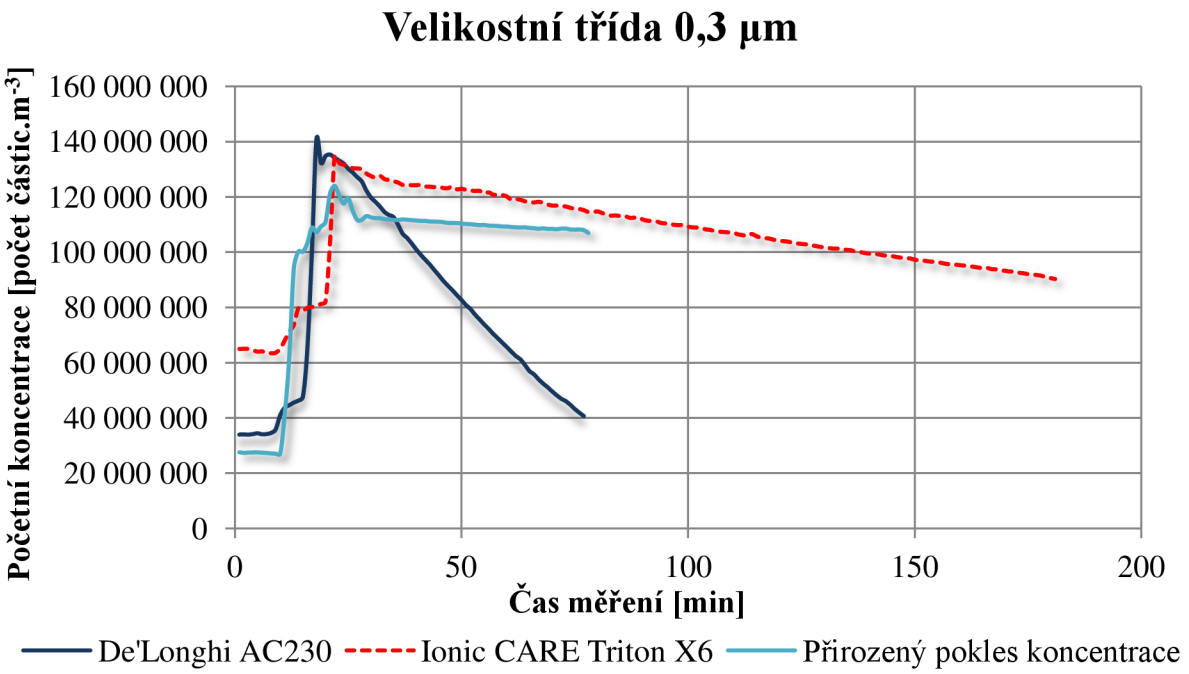
Tabulka 4 - Výsledky měření s čističkou De'Longhi AC230

	Početní koncentrace částic [počet částic.m^{-3}]					
Velikostní třídy	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm	3,0 µm	5,0 µm	10,0 µm
Průměr	78668668,7	37376448,1	12383035,2	85965,3	5564,7	49,1
Maximum	140915654	93146184	42942367	385265	14841	389
Minimum	33942686	3969293	847067	11696	671	0
Směrodatná odchylka	33703605,3	26973385,2	11269526,0	82270,7	4176,6	90,1

Tabulka 5 – Výsledky měření s čističkou Ionic-CARE Triton X6

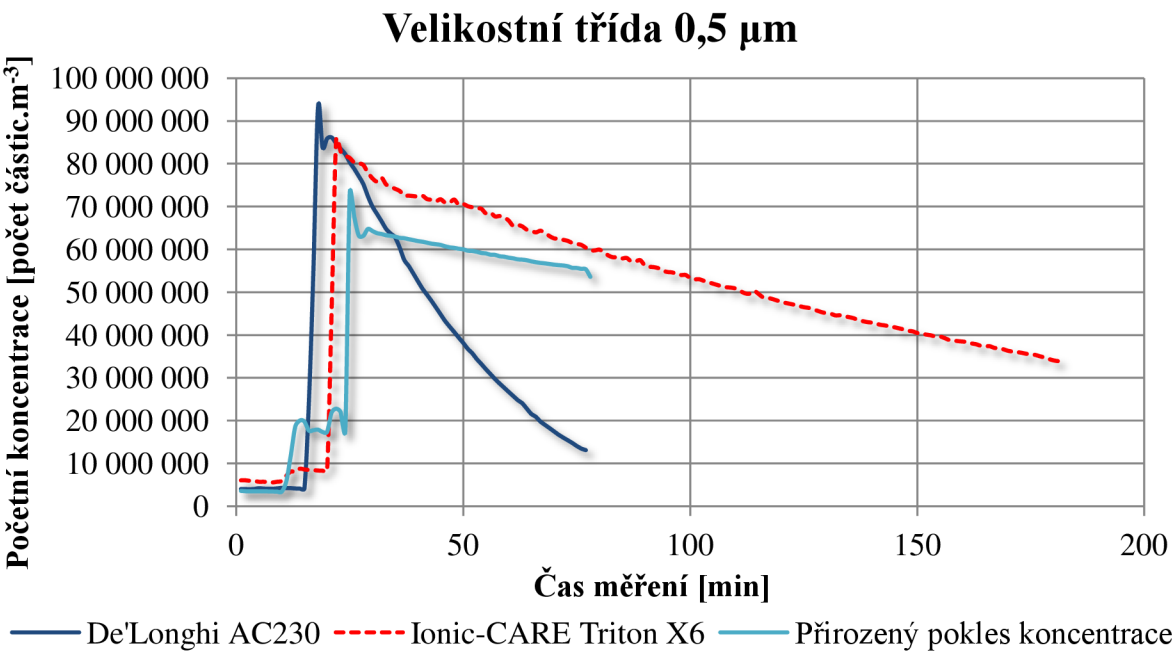
	Početní koncentrace částic [počet částic.m^{-3}]					
Velikostní třídy	0,3 µm	0,5 µm	1,0 µm	3,0 µm	5,0 µm	10,0 µm
Průměr	105175478,0	49238407,2	15245607,6	87910,3	8764,8	161,8
Maximum	134655548	85701519	38089011	416890	129258	2827
Minimum	63397244	5557703	836042	14558	353	0
Směrodatná odchylka	16518912,1	19690956,5	8748016,5	84737,3	16928,6	470,1

Pro lepší znázornění byly naměřené hodnoty ze všech experimentů vykresleny do grafů s jednotlivými velikostními třídami. V každém grafu jsou znázorněna výsledná data obou čističek vzduchu i přirozeného poklesu koncentrace částic.

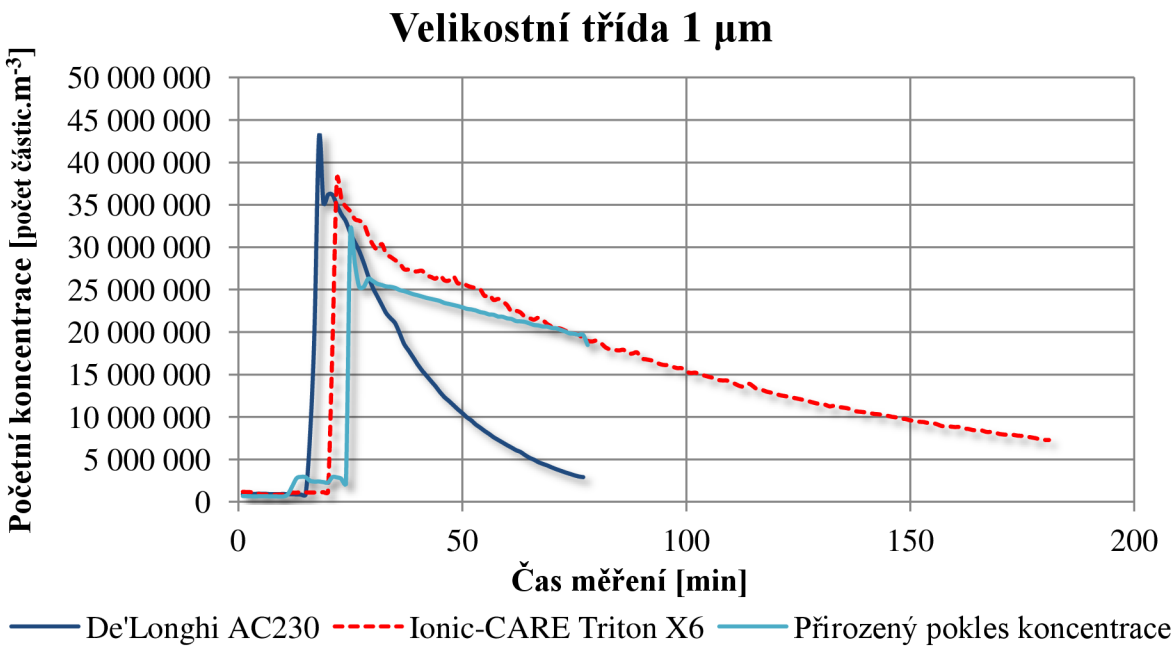


Graf 1 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 0,3 µm

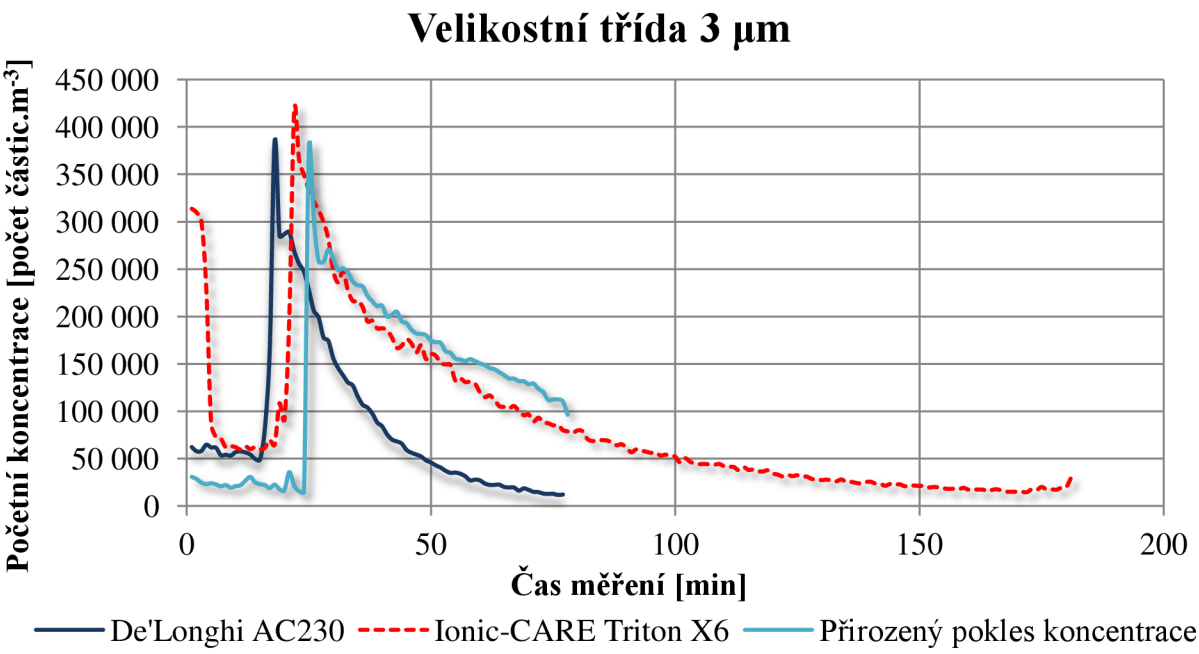
Z důvodu stanovení počtů částic kumulativním způsobem udává velikostní třída 0,3 µm početní koncentraci všech částic v měřeném objemu. Pro tuto frakci se koncentrace na začátku měření pohybovala kolem 34 částic.cm^{-3} pro čističku De'Longhi AC230, 65 částic.cm^{-3} pro Ionic-Care Triton X6 a 28 částic.cm^{-3} pro měření přirozeného poklesu koncentrace částic. Po generaci částic došlo k růstu koncentrace až do hodnot počátečních koncentrací pro hodnocení účinnosti čističek vzduchu a úbytku částic vlivem depozice a aglomerace. Počáteční koncentrace byla 133 částic.cm^{-3} pro měření obou čističek a 115 částic.cm^{-3} pro přirozený pokles koncentrace částic. Snahou bylo dosáhnout stejné koncentrace pro všechna měření, aby byl experiment objektivní.



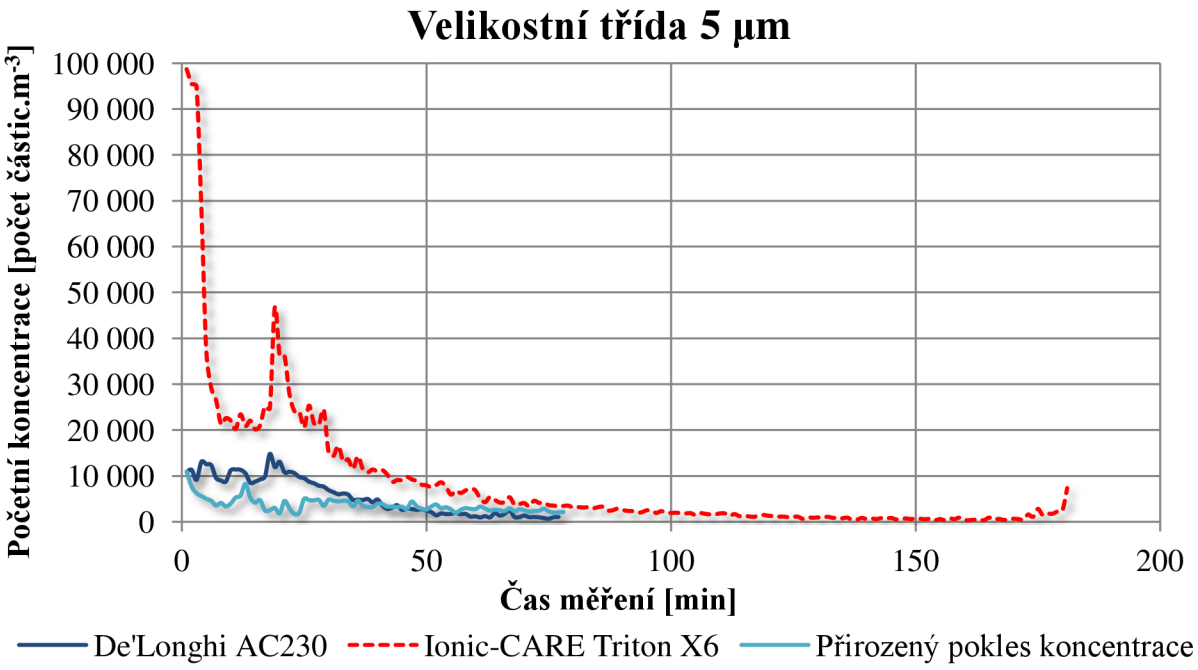
Graf 2 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 0,5 µm



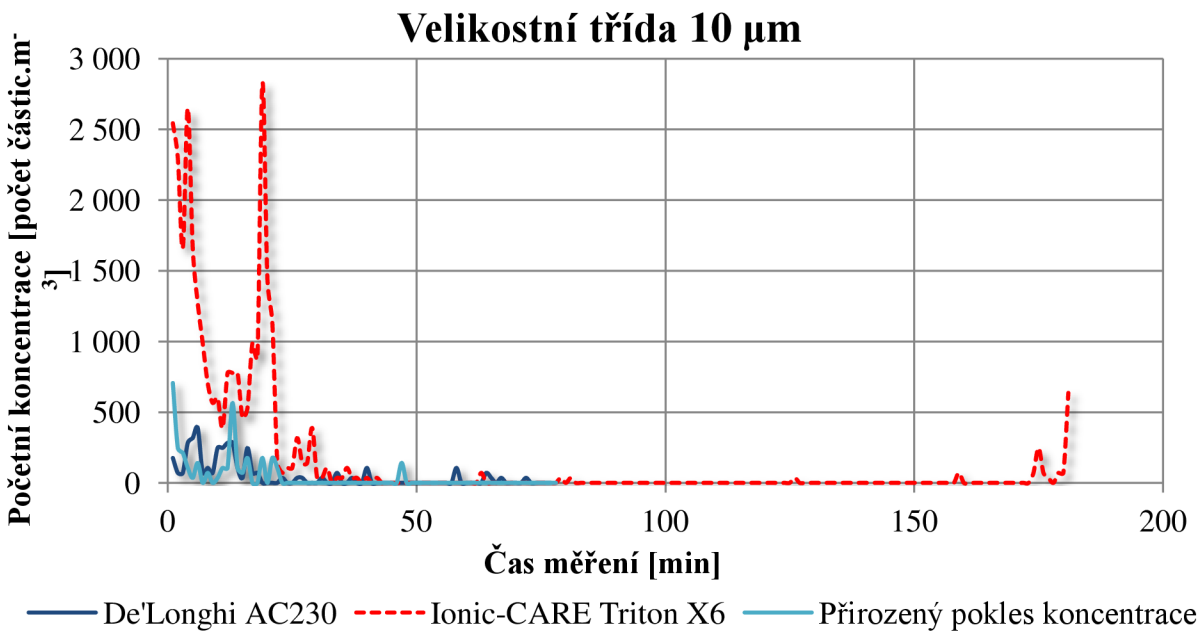
Graf 3 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 1 µm



Graf 4 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 3 µm



Graf 5 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 5 µm



Graf 6 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 10 µm

Z grafů jsou patrné všechny fáze měření. V prvních 10 minutách docházelo k ustálení podmínek uvnitř místnosti a hodnoty pro velikostní třídy 3 µm a menší lze považovat za stabilizované. U velikostních frakcí 5 µm a 10 µm si lze všimnout fluktuace hodnot, což může být způsobeno vlivem gravitace na částice větší než 1 µm, u menších částic lze vliv gravitační síly zanedbat. Větší částice tedy rychleji sedimentují na podlahu a ostatní předměty.

V další části následuje prudký vzrůst koncentrace vlivem zapálení svíčky a poté už snižování hodnot způsobené funkcí čističky vzduchu nebo vlivem přirozeného úbytku částic. Nejrychleji početní koncentrace klesá při měření s čističkou De'Longhi AC230, a to ve všech velikostních třídách. U čističky Ionic-CARE Triton X6 je snižování koncentrace značně pomalejší a dle očekávání vychází přirozený pokles koncentrace částic nejhůře. V závěru měření si lze všimnout kolísání hodnot pro experiment s ionizační čističkou. Tento výkyv byl pravděpodobně způsoben příchodem obsluhující osoby do místnosti, čímž došlo k rozvíření vzduchu.

Měření s vypnutou čističkou vzduchu má na začátku experimentu nejnižší koncentrace pro všechny velikostní třídy. Naopak v měření s čističkou Ionic-CARE Triton X6 je tato koncentrace výrazně vyšší než při ostatních měřeních. Pro velikostní třídy 3 µm a vyšší lze sledovat vysokou koncentraci na začátku experimentu, ale při ustálení podmínek v testovací místnosti, tzn. prvních 10 minut měření, dochází k výraznému poklesu hodnot. Důvodem může být rozvíření vzduchu při zapnutí čítače a následné ustálení. Vlivem generace aerosolu pomocí hořící svíčky se koncentrace u všech experimentů pro velikostní třídy 3 µm a menší postupně srovnávají.

7.2 Vyhodnocení výsledků

Dle rovnic pro vyhodnocení výsledků uvedených v kapitole 5.6.1 byly vypočítány hodnoty konstanty rozpadu, korelačního koeficientu, směrodatné odchylky sklonu regresní přímky, parametru CADR a jeho směrodatné odchylky. U všech experimentů byl výpočet proveden pro koncentrace získané v první hodině měření. U čističky De'Longhi AC230 a přirozeného poklesu koncentrace částic byla brána všechna data měření, u čističky vzduchu Ionic-CARE Triton X6 první část po jejím zapnutí. Výsledky jsou uvedené v Tabulce 6.

Tabulka 6 - Výsledné hodnoty pro porovnání čističek vzduchu

	k [min^{-1}]	r^2 [-]	r [-]	S_{reg} [-]	S_{sklonu} [min^{-1}]	CADR [$m^3.h^{-1}$]	S_{CADR} [$m^3.h^{-1}$]
De'Longhi AC230	0,0225	0,991232	0,9956	0,0326	0,000886	61,2612	0,00222
Ionic-CARE Triton X6	0,0022	0,97462	0,9872	0,0280	0,000763	3,5790	0,00165
Přirozený pokles koncentrace částic	0,0009	0,937287	0,9681	0,0139	0,000010		

Výsledné hodnoty konstant rozpadu odpovídají průběhu experimentů zobrazených v grafech. Pro čističku vzduchu De'Longhi AC230 vychází tato konstanta téměř o více než řád vyšší než při přirozeném poklesu koncentrace, což značí její správnou funkci. Hodnota konstanty rozpadu pro Ionic-CARE Triton X6 je o řád nižší než pro čističku vzduchu De'Longhi AC230 a od přirozeného poklesu koncentrace částic se liší velmi málo. Jak již bylo zmíněno, důvodem je proudění vzduchu skrz čističku pouze vlivem elektronového větru bez pomoci ventilátoru.

Přijatelná hodnota koeficientu korelace je 0,95. Z výsledků je patrné, že toto kritérium splňují všechna měření a lze je považovat za přijatelné. Parametr CADR vypočtený pro obě čističky vzduchu značí jednoznačně rychlejší a účinnější filtraci u čističky De'Longhi AC230 než u ionizační čističky Ionic-CARE Triton X6. Obě čističky vzduchu začínaly měřit při přibližně stejných koncentracích a podmínky v testovací místnosti byly také obdobné. Není zde tedy předpoklad, že by byl výkon čističky výrazně ovlivněn vnějšími vlivy.

7.3 Diskuze

Cílem práce bylo realizovat měření pro dva různé typy čističek vzduchu a provést jejich vzájemné porovnání z hlediska rychlosti a účinnosti filtrace. Za tímto účelem proběhla tři měření. Srovnání jednotlivých experimentů není zcela objektivní, jelikož každé měření proběhlo za mírně odlišných podmínek. Tyto podmínky závisí zejména na parametrech prostředí, jako jsou teplota a vlhkost vzduchu či počáteční koncentrace částic. Vzhledem k větrání venkovním vzduchem před měřením je experiment ovlivněn i parametry venkovního ovzduší. Snaha o eliminaci tohoto vlivu spočívala ve volbě podobných dnů pro měření vzhledem k počasí, teplotě, tlaku a vlhkosti, avšak je zřejmé, že přirozené podmínky nikdy nebudou naprosto stejné jako podmínky uměle vytvořené.

Vliv na měření má i samotná testovací místnost. Od navržené komory v metodice pro porovnání čističek vzduchu se liší nejen rozměry, ale i možností infiltrace okolního

vzduchu do místnosti nebo skutečností, že přiváděný vzduch nebylo možné filtrovat. Nebylo tedy možné nastolit identické podmínky pro všechna měření. Před a během měření byla monitorována pouze vlhkost a teplota vzduchu a z nejbližší meteostanice zaznamenán atmosférický tlak. Zařízení pro měření teploty a vlhkosti nedisponuje požadovanou přesností měření, avšak pro domácí podmínky se jeví jako dostačující. Optický čítač splňuje všechny požadavky na zařízení pro měření jemných a hrubých částic stanovené v metodice.

Vzhledem k podmínkám měření nebylo možné dodržet požadované počáteční koncentrace navržené v metodice pro porovnání čističek vzduchu (200 až 400 částic.cm^{-3}). Důvodem může být způsob generování aerosolu, kdy u hořící svíčky není možné regulovat množství produkovaných částic a dosáhnout tak požadovaných hodnot. I přes snahu dosáhnout stejné počáteční koncentrace pro všechna měření, dochází k mírným rozdílům, a to zejména mezi měřením se zapnutou a vypnutou čističkou vzduchu. Tento rozdíl může být způsoben vyšší vlhkostí vzduchu při měření přirozeného poklesu koncentrace částic, jelikož vlhkost vzduchu ovlivňuje dobu, po kterou částice zůstane ve vzduchu, než se usadí nebo koaguluje. Čím vyšší je vlhkost vzduchu, tím kratší dobu částice setrvává ve vznosu.

Měření s čističkou vzduchu De'Longhi AC230 má slibné výsledky filtrace částic co se rychlosti i účinnosti týče, ale je nutné brát v potaz přítomnost ventilátoru, který výrazně zvýšuje hlučnost čističky. Zároveň je třeba brát v úvahu, že ventilátor může měření ovlivnit vířením vzduchu, které při jeho funkci na první stupeň není tolik patrné, ale při funkci na nejvyšší stupeň, kdy je průtok vzduchu více než dvojnásobný, už může docházet nejen k víření vzduchu, ale i k obtěžování průvanem. Možnost snižování rychlosti i účinnosti filtrace by mohlo časem způsobovat například zanesení filtru.

Čistička Ionic-CARE Triton X6 z hlediska rychlosti filtrace není tak účinná jako čistička De'Longhi AC230, a to především kvůli absenci ventilátoru. Vzduch proudí skrz filtry pouze vlivem tzv. elektronového větru. U velikostních tříd 3 µm a menší je konečná koncentrace částic stále výrazně vyšší i po 150 minutách měření než u De'Longhi AC230 po hodině měření. Značnou výhodou nepřítomnosti ventilátoru je jednoznačně snížení hlučnosti čističky na úplné minimum.

Zvolená doba funkce a stupeň výkonu u obou čističek by dle výrobce měly postačit, aby došlo k pročištění celého objemu místnosti. U menších částic ustálení hodnot nenastává, ale pro částice od 3 µm výše lze zhruba po 50 minutách od spuštění čítače pozorovat stabilní koncentrace až do konce měření. Při měření s čističkou De'Longhi AC230 došlo k zastavení čističky i optického čítače automaticky, stejně jako při měření přirozeného poklesu koncentrace částic, závěr měření tedy nebyl ovlivněn možným zvířením vzduchu vlivem příchodu obsluhující osoby, jako tomu bylo u měření s čističkou Ionic-CARE Triton X6.

8 Závěr

Popularita přenosných čističek vzduchu v posledních letech narůstá a vzhledem k pandemii koronaviru SARS-CoV-2, je téma čistoty vzduchu ve vnitřním prostředí stále aktuálnější. Součástí této práce je navržená metodika pro porovnání přenosných čističek vzduchu, která vychází z dostupných norem a zaměřuje se na jejich nedostatky. Důraz je kladen především na měření hlučnosti, měření nanočástic a produkce ozonu. Vlivem současné situace způsobené pandemií koronaviru, nebylo možné při experimentu dodržet postupy a specifika uvedené v této metodice.

Experimentální část práce poskytla představu o rychlosti a účinnosti filtrace čističek vzduchu. Použité čističky vzduchu byly De'Longhi AC230 s mechanickými filtry a ventilátorem a ionizační čistička Ionic-CARE Triton X6. Pro měření počtu částic byl použit optický čítač Lighthouse Solair 3100. Teplotu a vlhkost stanovoval přístroj Sonoff TH16 a hodnoty atmosférického tlaku byly brány z meteostanice Brno – Kraví hora. Experiment byl proveden v testovací místnosti, kterou byl obývací pokoj v bytě. Směšování vzduchu uvnitř místnosti zajišťoval stojanový ventilátor Proklima a generace aerosolu byla realizována pomocí hořící svíčky.

Porovnání čističek vzduchu proběhlo pouze z hlediska eliminace prachových částic. Z hlediska rychlosti filtrace vyšla bezesporu lépe čistička De'Longhi AC230. Avšak i při spuštění na nejnižší výkon, byla zřejmá její hlučnost. Z tohoto důvodu je žádoucí její použití spíše v době, kdy se v daném prostoru nevyskytuje žádný člověk. Například tedy v domácnosti přes den, kdy obyvatelé odejdou do práce, v kanceláři naopak odpoledne, popřípadě přes noc, kdy už v místnosti nikdo nebude. Svým výkonem a průtokem vzduchu je vhodná i pro větší prostory, například kancelářské prostory pro více lidí, zasedací místnosti apod. Vylepšením konstrukčního řešení této čističky by mohlo být zmenšení jejích rozměrů. Pořizovací cena této čističky vzduchu je zhruba 10 000 Kč, čímž je ve srovnání s Ionic-CARE Triton X6 dražším, avšak i značně kvalitnějším, zařízením. Nevýhodou této čističky je také potřebná výměna filtru, což znamená další finanční náklady.

Ionic-CARE Triton X6 je velmi tichá ionizační čistička vzduchu. I při nastavení na nejvyšší výkon je téměř nehlučná. Rychlostí filtrace ovšem výrazně zaostává za čističkou De'Longhi AC230. Účinnost filtrace není příliš vysoká a je nutné brát v potaz dlouhou dobu čištění vzduchu, proto je vhodná pro menší prostory s objemem maximálně 20 m^3. Na rozdíl od čističek s ventilátorem může díky svému tichému provozu fungovat v kteroukoliv denní dobu, například i během noci v ložnici. Pořizovací náklady jsou přibližně 3 500 Kč a její další výhodou je možnost mechanického čištění elektrostatických filtrů, což odstraní finanční náklady na výměnu zanesených filtrů za nové.

Obecně lze říci, že jsou přenosné čističky vzduchu vhodné pro menší prostory, jako jsou domácnosti, kanceláře atd. Obě testované čističky vzduchu jsou účinná zařízení, avšak záleží na prioritách uživatele. Při potřebě rychlého a účinného čištění vzduchu je vhodnější čistička vzduchu De'Longhi AC230. Pokud není kladen důraz na dobu čistění, ale spíše na hlučnost, je lepší volbou ionizační čistička Ionic-CARE Triton X6.

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

BARN, Prabjit, Enkhjargal GOMBOJAV, Chimedsuren OCHIR, et al. The effect of portable HEPA filter air cleaners on indoor PM2.5 concentrations and second hand tobacco smoke exposure among pregnant women in Ulaanbaatar, Mongolia: The UGAAR randomized controlled trial. Science of The Total Environment [online]. 2018, **615**, 1379-1389 [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.291. ISSN 00489697. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969717326426

Changes in IAQ Caused By Corona Discharge Air Cleaner. ASHRAE Journal [online]. 2018, , 64-67 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: https://www.dynamicaqs.com/commercial/phocadownload/CoronaDischargeEAC.pdf

Customizing Indoor Air Quality. Technology Designer [online]. 2019 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: https://www.technologydesigner.com/2019/11/12/customizing-indoor-air-quality/

ČERNECKÝ, Jozef, Karina VALENTOVÁ, Elena PIVARČIOVÁ a Pavol BOŽEK. Ionization Impact on the Air Cleaning Efficiency in the Interior. Measurement Science Review [online]. 2015, 2015, **15**(4), 156-166 [cit. 2020-02-26]. DOI: 10.1515/msr-2015-0023. ISSN 1335-8871. Dostupné z: http://content.sciendo.com/view/journals/msr/15/4/article-p156.xml

HINDS, William C. Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles. 2nd ed. New York: John Wiley, c1999. A Wiley-Interscience publication. ISBN 04-711-9410-7.

How is the Air Quality Index (AQI) calculated?. *WORDPRESS* [online]. 2013 [cit. 2021-06-06]. Dostupné z: https://stimulatedemissions.wordpress.com/2013/04/10/how-is-the-air-quality-index-aqi-calculated/

HUANG, Jinhui Jeanne et al. Fabrication of bead-on-string polyacrylonitrile nanofibrous air filters with superior filtration efficiency and ultralow pressure drop. *Separation and Purification Technology* [online]. 2020, **237** [cit. 2021-03-21]. ISSN 13835866. Dostupné z: doi:10.1016/j.seppur.2019.116377

HUTTEN, Irwin M., 2. Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-0-08-098301-1.

Jak porovnávat funkčnost čističek vzduchu? Čističky vzduchu [online]. 2016 [cit. 2020-02-09]. Dostupné z: https://www.cistickyvzduchu.cz/blog/aktuality/test-jak-porovnavat-funkcnost-cisticek-vzduchu

JONES, A.P. Indoor air quality and health. Atmospheric Environment [online]. 1999, **33**(28), 4535-4564 [cit. 2020-06-29]. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00272-1. ISSN 13522310. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1352231099002721

KILIC, Ali, Eunkyoung SHIM a Behnam POURDEYHIMI. Electrostatic Capture Efficiency Enhancement of Polypropylene Electret Filters with Barium Titanate. Aerosol Science and Technology [online]. 2015, 2015, **9**(8), 666-673 [cit. 2020-02-26]. DOI: 10.1080/02786826.2015.1061649. ISSN 0278-6826. Dostupné z: http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2015.1061649

KIM, Bumchang, Sanghyun LEE, You Seop LEE a Kwan Hyoung KANG. Ion wind generation and the application to cooling. Journal of Electrostatics [online]. 2012, **70**(5), 438-444 [cit. 2021-5-16]. ISSN 03043886. Dostupné z: doi:10.1016/j.elstat.2012.06.002

KIM, Jeonghyun a Jaesung JANG. Inactivation of airborne viruses using vacuum ultraviolet photocatalysis for a flow-through indoor air purifier with short irradiation time. Aerosol Science and Technology [online]. InTech, 2018, 2016-08-24, **52**(5), 557-566 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1080/02786826.2018.1431386. ISBN 978-953-51-2484-9. ISSN 0278-6826. Dostupné z: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02786826.2018.1431386

KUBBA, Sam. Handbook of Green Building Design and Construction: LEED, BREEAM, and Green Globes. 2. Butterworth-Heinemann, 2017. ISBN 978-0-12-810433-0.

Kvalita vnitřního ovzduší (IAQ). SZÚ [online]. 2019 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: http://www.szu.cz/uploads/documents/chzp/ovzdusi/inairg/seminare_2019/1_uvod_indoor.pdf

LIU, Xiaobing et al. Soy protein isolate/bacterial cellulose composite membranes for high efficiency particulate air filtration. Composites Science and Technology [online]. 2017, **138**, 124-133 [cit. 2020-03-01]. DOI: 10.1016/j.compscitech.2016.11.022. ISSN 02663538. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0266353816305796

MILLER, Mark R., Jennifer B. RAFTIS, Jeremy P. LANGRISH, et al. Inhaled Nanoparticles Accumulate at Sites of Vascular Disease. *ACS Nano* [online]. 2017, **11**(5), 4542-4552 [cit. 2021-5-18]. ISSN 1936-0851. Dostupné z: doi:10.1021/acsnano.6b08551

Nanomaterials for Food Applications. Micro and Nano Technologies [online]. 2019, 2019 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: doi:10.1016/C2017-0-01042-X

Ochrana ovzduší. In: MŽP [online]. 2012 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/ovzdusi

PERKINS, S.W. The material properties of geosynthetics. Geosynthetics in Civil Engineering [online]. Elsevier, 2007, 2007, 19-35 [cit. 2020-09-06]. DOI: 10.1533/9781845692490.1.19. ISBN 9781855736078. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781855736078500023

PIMENTEL, Ana et al. Photocatalytic Activity of TiO2 Nanostructured Arrays Prepared by Microwave-Assisted Solvothermal Method. Semiconductor Photocatalysis - Materials, Mechanisms and Applications [online]. InTech, 2016, 2016-08-24 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.5772/63237. ISBN 978-953-51-2484-9. Dostupné z: http://www.intechopen.com/books/semiconductor-photocatalysis-materials-mechanisms-and-

applications/photocatalytic-activity-of-tio2-nanostructured-arrays-prepared-by-microwave-assisted-solvothermal-me

PODGÓRSKI, Albert, Anna BAŁAZY a Leon GRADOŃ. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters. Chemical Engineering Science [online]. Elsevier, 2006, **61**(20), 6804-6815 [cit. 2020-09-06]. DOI: 10.1016/j.ces.2006.07.022. ISBN 9781855736078. ISSN 00092509. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250906004507

RAGAVAN, K.V. a Suresh NEETHIRAJAN. Nanoparticles as Biosensors for Food Quality and Safety Assessment. *Nanomaterials for Food Applications* [online]. Elsevier, 2019, 2019, , 147-202 [cit. 2021-02-21]. ISBN 9780128141304. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-814130-4.00007-5

Residential air cleaners: A Technical Summary. *EPA Indoor Environments Division* [online]. 2018 [cit. 2021-4-21]. Dostupné z: https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-07/documents/residential_air_cleaners_-_a_technical_summary_3rd_edition.pdf

ROY, Aditya et al., A REVIEW OF GENERAL AND MODERN METHODS OF AIR PURIFICATION. Journal of Thermal Engineering [online]. 2019, **5**(2), 22-28 [cit. 2020-07-02]. DOI: 10.18186/thermal.529054. ISSN 2148-7847. Dostupné z: http://dergipark.gov.tr/doi/10.18186/thermal.529054

SHI, Shanshan, et al. Performance of wearable ionization air cleaners: Ozone emission and particle removal. *Aerosol Science and Technology* [online]. 2016, **50**(3), 211-221 [cit. 2021-5-21]. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786826.2016.1139045

SKŘEHOT, Petr. Prevence nehod a havárií. *Portál BOZP* [online]. 2014 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: http://www.portalbozp.cz/wp-content/uploads/2014/09/Prevence-nehod-a-havarii_1.dil_Kapitola-3.pdf

STREJČEK, Josef. Ionizátor vzduchu – popis, konstrukce, zkušenosti s užíváním zařízení [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-09-05]. Dostupné z: https://adoc.pub/ionizator-vzduchu-popis-konstrukce-zkuenosti-s-uivanim-zaize.html

SUNG, Jin-Ho, et al. Ultrafine particle cleaning performance of an ion spray electrostatic air cleaner emitting zero ozone with diffusion charging by carbon fiber. Building and Environment [online]. 2019, 2019, **166**(166) [cit. 2020-02-05]. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106422. ISSN 03601323. Dostupné z: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360132319306328

SVOBODA, J.: Ions and their contribution for living space. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2008, LVI, No. 2, pp. 189–198

UV záření. BOZPinfo [online]. 2004 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: https://www.bozpinfo.cz/uv-zareni

VALLERO, Daniel. Fundamentals of Air Pollution [online]. 4. London: Academic Press, 2008 [cit. 2020-09-03]. ISBN 978-0-12-373615-4. Dostupné z: http://payesh.saba.org.ir/saba_content/media/image/2016/11/8706_orig.pdf

VODIČKA, Petr a Jaroslav SCHWARZ. Analýza elementárního a organického uhlíku v aerosolech. Chemické listy [online]. 2017, **111**(6), 354-362 [cit. 2020-09-03]. 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

Woodford, Chris. HEPA filters [online]. 2018 [cit. 2020-02-08]. Dostupné z: https://www.explainthatstuff.com/hepafilters.html

Seznam použitých zkratek a symbolů

AQI – Air Quality Index

BOZP – bezpečnost a ochrana zdraví při práci

CPC – kondenzační čítač částic (Condensation Particle Counter)

DMA – analyzátor diferenciální mobility (Differential Mobility Analysis)

EC – elementární forma uhlíku (Elemental Carbon)

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

ESP – elektrostatické čističky vzduchu (Electrostatic Precipitators)

HEPA filtr – vysoce účinné filtry vzduchu (High Efficiency Particulate Arrestance)

H1N1 – virus prasečí chřipky

IRZ – integrovaný registr znečišťování

OC – organická forma uhlíku (Organic Carbon)

OM – organická částice (Organic Matter)

MOF – kovové organické struktury (Metal Organic Frameworks)

MPPS – částice filtrované s nejmenší účinností (Most Penetrating Particle Size)

MŽP – Ministerstvo životního prostředí

OPC – optický čítač částic (Optical Particle Counter)

PAN – polyakrylbitrilové filtry

PM_x – velikostní frakce aerosolů (Particulate Matter)

rGO – redukovaný oxid grafenový

SARS-CoV – koronavirus

SMPS - (Scanning Mobility Particle Sizer)

SPI – sójový protein ve formě izolátu (Soy Protein Isolate)

SZÚ – Státní zdravotní ústav

TVOC – těkavé organické látky (Total Volatile Organic Compounds)

A – příčný průřez [m^2]

AQI_{max} – vyšší mezní hodnota dané kategorie AQI [-]

AQI_{min} – nižší mezní hodnota dané kategorie AQI [-]

α – hustota filtru [%]

b – průsečík regresní přímky s osou [počet částic.m^{-3}]

d_p – průměr částice [μm]

d_f – průměr vlákna filtru [μm]

C – hmotnost částic na výstupu [-]

C_e – rovnovážná koncentrace ozonu [mg.m^3]

C_{in} – hmotnost částic na vstupu [-]

C_{ti} – koncentrace částic v čase t_i [počet částic.m^{-3}]

C_0 – počáteční koncentrace [počet částic.m^{-3}]

CADR – parametr pro hodnocení čističky vzduchu (Clean Air Delivery Rate) [m^3.h^{-1}]

E – účinnost [%]

E_m – hmotnostní účinnost [%]

E_o – míra emisí ozonu [mg.h^{-1}]

k – konstanta rychlosti rozpadu [min^{-1}]

k_e – konstanta rychlosti rozpadu pro ozon [min^{-1}]

$k_č$ – konstanta rychlosti rozpadu při zapnuté čističce vzduchu [min^{-1}]

k_n – konstanta rychlosti rozpadu při vypnuté čističce vzduchu [min^{-1}]

L_{pA} – hladina akustického tlaku vážená filtrem A [dB]

L_{WA} – hladina akustického výkonu vážená filtrem A [dB]

m – sklon regresní přímky [min^{-1}]

n – počet měření [-]

N_{in} – počet částic na vstupu [-]

N_{out} – počet částic na výstupu [-]

P – penetrace filtru [%]

PM_{max} – vyšší mezní koncentrace odpovídající AQI_{max} [μg.m^{-3}]

PM_{min} – nižší mezní koncentrace odpovídající AQI_{min} [μg.m^{-3}]

PM_{obs} – konkrétní koncentrace, pro kterou je počírán AQI [$\mu g.m^{-3}$]

Q – objemový průtok [$m^3.s^{-1}$]

r – korelační koeficient [-]

r^2 – koeficient determinace [-]

S_{reg} – odhad směrodatné odchylky pro regresní přímku [-]

S_{sklonu} – odhad směrodatné odchylky sklonu regresní přímky [min^{-1}]

S_{CADR} – směrodatná odchylka parametru CADR [$m^3.h^{-1}$]

$S_{sklonu,kč}$ – odhad směrodatné odchylky při zapnuté čističce vzduchu [min^{-1}]

$S_{sklonu,kn}$ – odhad směrodatné odchylky při vypnuté čističce vzduchu [min^{-1}]

t – čas [min]

T_{60} – průměrná doba dozvuku [s]

U_0 – čelní rychlost [$m.s^{-1}$]

U_f – skutečná rychlost [$m.s^{-1}$]

V – objem místnosti [m^3]

Seznam obrázků

Obr. 1 - Kategorie AQI pro aerosoly, oxid siřičitý a oxidy dusíku (WordPress, 2013)..... 13
Obr. 2 - Možnosti zachycení částic na filtru (Vallero, 2008)..... 15
Obr. 3 - Účinnost filtrace v závislosti na průměru částice (Hinds, 1999)..... 18
Obr. 4 – Účinnost v závislosti na změně průměru vlákna (Hinds, 1999) 18
Obr. 5 - Schéma ESP (Roy et al., 2019)..... 20
Obr. 6 - Princip adsorpce aktivního uhlí (Roy et al., 2019) 22
Obr. 7 - Schéma fotokatalytického rozkladu látek (Pimentel et al., 2016) 24
Obr. 8 – Možné uspořádání jednotlivých částí čističky vzduchu (Technology Designer, 2019) 25
Obr. 9 - Vizualizace testovací místnosti pohled shora (1-čistička vzduchu, 2-optický čítač, 3-zařízení pro měření teploty a vlhkosti, 4-svíčka sloužící jako generátor aerosolu, 5-ventilátor) 41
Obr. 10 - Vizualizace testovací místnosti boční pohled (1-čistička vzduchu, 2-optický čítač, 3-zařízení pro měření teploty a vlhkosti, 4-svíčka sloužící jako generátor aerosolu, 5-ventilátor) 41
Obr. 11 - Lighthouse Solair 3100..... 42
Obr. 12 - Sonoff TH16 43
Obr. 13 - Ventilátor Proklima 43
Obr. 14 - Čistička vzduchu Ionic-CARE Triton X6..... 44
Obr. 15 - Čistička vzduchu De'Longhi AC230 44
Obr. 16 - Hořící svíčka jako generátor aerosolu 45

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Přehled čističek vzduchu – uvedené parametry byly převzaty od výrobců..... 25
Tabulka 2 - Porovnání norem z hlediska obsahu 31
Tabulka 3 - Výsledky měření bez zapnuté čističky vzduchu 47
Tabulka 4 - Výsledky měření s čističkou De'Longhi AC230..... 47
Tabulka 5 – Výsledky měření s čističkou Ionic-CARE Triton X6 48
Tabulka 6 - Výsledné hodnoty pro porovnání čističek vzduchu 52

Seznam grafů

Graf 1 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 0,3 µm..... 48
Graf 2 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 0,5 µm..... 49
Graf 3 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 1 µm..... 49
Graf 4 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 3 µm..... 50
Graf 5 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 5 µm..... 50
Graf 6 - Početní koncentrace částic v průběhu měření pro velikostní třídu 10 µm..... 51

Seznam příloh

Příloha I:

Výsledky měření přirozeného poklesu koncentrace částic

Příloha II:

Výsledky měření s čističkou vzduchu De'Longhi AC230

Příloha III:

Výsledky měření s čističkou vzduchu Ionic-CARE Triton X6

Příloha I:

Výsledky měření přirozeného poklesu koncentrace částic

Čas [min]	0,3 µm [počet částic.m^{-3}]	0,5 µm [počet částic.m^{-3}]	1,0 µm [počet částic.m^{-3}]	3,0 µm [počet částic.m^{-3}]	5,0 µm [počet částic.m^{-3}]	10,0 µm [počet částic.m^{-3}]
1	27551201	3594170	692297	30636	10954	707
2	27326714	3501201	672403	28551	7703	247
3	27445336	3479399	652544	24664	6254	212
4	27478481	3476254	652085	23004	5618	106
5	27498693	3497845	665654	23958	5018	35
6	27382191	3478975	662544	22686	4594	141
7	27292155	3463216	651767	20742	3569	0
8	27127986	3433463	648057	22085	4134	71
9	27037845	3407208	632721	19293	3357	0
10	26964452	3404170	635901	20919	3993	35
11	41329258	5742155	859823	21837	5300	106
12	62039435	11814558	1802049	26572	5724	106
13	94106608	18613251	2776749	30636	8304	565
14	100151519	20001131	2944594	25088	5230	106
15	100099859	19763887	2901661	23039	4170	71
16	103292544	17657350	2484417	21979	4735	177
17	108840530	17762968	2385583	18763	2473	0
18	107185336	17878233	2398339	22544	2544	0
19	109274134	17344382	2326007	17633	3039	177
20	110929364	17349541	2274947	16431	1837	0
21	121251731	21876325	2916820	35830	4594	177
22	123985760	22770177	2883852	21413	2933	106
23	120593746	21923004	2714982	15689	1696	0
24	117530813	17391625	2100636	14629	1979	0
25	119604064	73274523	31960106	376184	5018	0
26	114966714	67498304	28114735	303110	4735	0
27	111646855	63171625	25308834	258269	4664	0
28	111663216	63167067	25344876	257527	4806	0
29	113031519	64753145	26295300	270707	3463	0
30	112597314	64270989	26038127	260601	4841	0
31	112281661	63777244	25706502	249223	4594	0
32	112245583	63579541	25561590	250742	4452	0
33	111951378	63288163	25390601	246572	4594	0
34	111786466	63156325	25343216	236749	4488	0
35	111630671	62953710	25217880	232933	3357	0
36	111600283	62678693	24970106	231731	4629	0
37	111819470	62590389	24837420	221873	3534	0
38	111700318	62364735	24663110	215830	3251	0

39	111554240	62145901	24482509	210777	3216	0
40	111432191	61930954	24349647	211272	3958	0
41	111310813	61771095	24197102	199929	3852	0
42	111292226	61557314	24041696	201837	3322	0
43	111067138	61325512	23924170	204982	3322	0
44	111030954	61189788	23807456	195088	3216	0
45	110978339	61030742	23667456	192721	3286	0
46	110803993	60704028	23441060	185936	2792	0
47	110563958	60459470	23329223	182014	4452	141
48	110531378	60339682	23203958	181519	3357	0
49	110483887	60134629	23079187	180141	2898	0
50	110352580	59996431	22933286	174311	2686	0
51	110178622	59680530	22752226	172827	3357	0
52	110101802	59615936	22677456	171979	3781	0
53	109923781	59413463	22558127	163251	2968	0
54	109756113	59142403	22365124	161519	3180	0
55	109815124	59037951	22267314	155583	2721	0
56	109590424	58755477	22087350	154523	1943	0
57	109549965	58700848	22048445	152827	2615	0
58	109420989	58386042	21838021	154912	3004	0
59	109285689	58281873	21814947	152827	2827	0
60	109265371	58049753	21629293	150424	2756	0
61	109085512	57894240	21552827	148587	3322	0
62	108963180	57662898	21312650	145654	2898	0
63	108893110	57590035	21271272	144240	2473	0
64	108955053	57447138	21205901	141131	2650	0
65	108738410	57191519	21032580	137951	2544	0
66	108633180	56989859	20846820	134452	2332	0
67	108443498	56823145	20786749	134346	2968	0
68	108590071	56718269	20663640	131590	2332	0
69	108391272	56572155	20649788	131625	2721	0
70	108375300	56414947	20499293	128516	2544	0
71	108256007	56306784	20452862	129152	2226	0
72	108472650	56224912	20257739	123710	2367	0
73	108511767	56050848	20083074	120035	2403	0
74	108190106	55684452	19850353	111943	2862	0
75	108122155	55646572	19814594	112403	2297	0
76	108165760	55436996	19695088	112438	2014	0
77	107924912	55320636	19654382	110212	2085	0
78	106917385	53576572	18491449	96325	2155	0
Průměr	98104616,7	45132701,8	16406473,7	132899,8	3652,3	42,1
Maximum	123985760	73274523	31960106	376184	10954	707
Minimum	26964452	3404170	632721	14629	1696	0
Směrodatná odchylka	29183603,1	22978360,4	10103456,1	87438,2	1522,4	113,3

Příloha II:

Výsledky měření s čističkou vzduchu De'Longhi AC230

Čas [min]	0,3 µm [počet částic.m^{-3}]	0,5 µm [počet částic.m^{-3}]	1,0 µm [počet částic.m^{-3}]	3,0 µm [počet částic.m^{-3}]	5,0 µm [počet částic.m^{-3}]	10,0 µm [počet částic.m^{-3}]
1	34063993	3994452	929187	62155	10919	177
2	34011131	3997845	949223	57774	11343	71
3	33942686	3969293	928869	58057	9152	71
4	34127208	4040601	939470	64629	13110	283
5	34400883	4203781	945336	61731	12580	318
6	34043428	4112650	947456	61378	12367	389
7	34137173	4069823	910424	53498	9576	71
8	34554841	4078339	905477	54064	9011	106
9	35837668	4153675	904912	53039	8799	71
10	40975689	4279470	928622	56820	11237	247
11	43666820	4239929	896926	57668	11413	247
12	44580883	4220106	898940	56537	11343	283
13	45520707	4139647	871519	54311	10565	283
14	46233710	4126184	860141	49647	8516	106
15	47561943	4099541	847067	48905	8763	35
16	65128799	24463004	7821378	81943	9258	247
17	100374099	55522438	20318799	165618	9859	71
18	140915654	93146184	42942367	385265	14841	71
19	132232968	83796431	35175124	284841	11943	0
20	134757880	85843498	36186890	286926	13110	0
21	135284382	86121449	36178622	288693	10777	0
22	134156996	84732580	34979223	268763	10919	0
23	133109823	83459717	33889611	255548	10636	35
24	132042898	82238445	33063463	247138	9788	0
25	130181519	80316007	31678551	227951	9505	0
26	128797633	78779541	30596608	206325	8763	35
27	127122968	77057597	29538975	198834	8410	35
28	125578516	75204912	28159505	177951	7880	0
29	122322191	72380848	26594028	174205	7668	0
30	119788021	69981060	25265088	155866	6926	0
31	118198057	68260954	24243781	145512	6466	35
32	116498375	66555583	23240671	137880	6007	0
33	114539329	64770071	22245300	130353	6184	0
34	113421555	63681979	21629788	127102	5936	71
35	112664664	62748975	21059081	115654	4770	0
36	109924311	60387420	19884028	106890	4841	0
37	106679859	57532403	18613392	103887	4770	35

38	105112473	56087880	17840283	97420	4982	0
39	103141731	54353710	17044735	88092	4240	0
40	100986466	52559046	16214912	84064	4876	106
41	99039788	50828799	15488304	75618	3534	0
42	97252014	49411661	14868445	70141	2827	0
43	95521590	47955654	14246396	68127	3110	0
44	93517739	46401201	13638975	65830	3640	0
45	91596608	44833286	12947456	59081	2615	0
46	89575901	43254205	12345512	56148	2862	0
47	87831025	41949258	11895760	54240	2792	0
48	86181413	40691590	11404982	52155	2615	0
49	84393640	39383392	10908127	48057	2756	0
50	82670283	38131166	10463781	45866	2438	0
51	80820742	36757739	9976784	42756	2120	0
52	79358763	35707173	9602085	40459	1413	0
53	77357173	34336466	9116678	37102	1837	0
54	75613604	33189541	8743887	34912	1696	0
55	73836996	31981378	8351272	35230	1731	0
56	72175689	30853781	7999152	34064	1979	0
57	70406961	29705159	7611060	31449	1661	0
58	68814028	28665901	7297915	27032	1731	106
59	67224770	27691307	6993392	27739	1131	0
60	65621237	26705689	6681837	27067	1201	0
61	63964488	25750035	6395088	23746	954	0
62	62369894	24783286	6090318	22226	1237	0
63	61163746	24040000	5879293	22261	954	0
64	59145830	22784982	5513074	22438	1908	71
65	56936396	21546678	5194382	20035	1378	35
66	55742580	20869859	4966855	19541	1731	0
67	53966148	19776078	4674205	19470	2509	35
68	52433816	19000777	4467845	16219	1060	0
69	51090035	18248975	4282898	18587	1025	0
70	49578057	17471661	4056219	16961	1378	0
71	48184488	16699329	3846042	14876	1025	0
72	46931166	16039152	3660989	14629	1060	35
73	46067845	15414028	3472898	13074	989	0
74	44767032	14788693	3306325	12721	813	0
75	43196042	14066749	3133004	12827	671	0
76	41876678	13463922	2993180	11696	989	0
77	40643357	13100883	2911519	12014	1060	0
Průměr	78668668,7	37376448,1	12383035,2	85965,3	5564,7	49,1
Maximum	140915654	93146184	42942367	385265	14841	389
Minimum	33942686	3969293	847067	11696	671	0
Směrodatná odchylka	33703605,3	26973385,2	11269526,0	82270,7	4176,6	90,1

Příloha III:

Výsledky měření s čističkou vzduchu Ionic-CARE Triton X6

Čas [min]	0,3 µm [počet částic.m^{-3}]	0,5 µm [počet částic.m^{-3}]	1,0 µm [počet částic.m^{-3}]	3,0 µm [počet částic.m^{-3}]	5,0 µm [počet částic.m^{-3}]	10,0 µm [počet částic.m^{-3}]
1	64962120	6051873	1163534	313746	98763	2544
2	64962014	6051131	1159647	309753	95477	2297
3	64961908	5938657	1131979	300707	94947	1661
4	64430283	5885654	1066184	229541	68163	2650
5	63982792	5709611	889187	87244	37314	1661
6	64056820	5709576	865618	72650	29258	1272
7	63707456	5647208	867880	70919	26537	989
8	63397244	5557703	836042	61943	21343	707
9	63587456	5710601	862191	63074	22615	565
10	65027385	5906608	869682	62049	22049	601
11	68006360	7100883	992686	59682	20212	389
12	71175124	8094735	1085866	62968	23463	777
13	73634629	8067915	1082120	59965	20883	777
14	79636890	8750283	1141060	62085	22049	777
15	78829929	8589293	1115866	59647	20141	459
16	79855760	8472261	1093428	61343	21025	530
17	80130742	8431131	1103746	69823	25230	989
18	80567597	8329329	1074488	64382	24700	883
19	81233675	8313781	1145548	108622	46714	2827
20	82095901	8304417	1138269	91343	36254	1449
21	103420883	45508304	18255795	198905	36113	1131
22	134655548	85701519	38089011	416890	27915	141
23	132276502	82831943	35671943	365548	24170	71
24	131592650	81930565	34786855	349470	24064	106
25	131156431	81323922	34241307	333216	20601	106
26	130376608	80257880	33327597	321343	25371	318
27	130260601	80079293	33130601	312120	21555	141
28	129974170	79664700	32781696	299647	21166	141
29	128467067	77848622	31406290	281378	24417	389
30	127535194	76563110	30338905	247774	15159	35
31	126989894	75830954	29755512	235689	14382	35
32	127633887	76711802	30387633	248269	16572	106
33	126438975	75161767	29232473	227527	13180	0

34	126074700	74656502	28863322	216360	13604	35
35	125630283	74127562	28492721	216502	11519	35
36	125175724	73619223	28134841	210141	14311	106
37	124338304	72580848	27426961	194806	11519	35
38	124273251	72529505	27366890	195548	10777	35
39	124205936	72431767	27169611	187420	11413	0
40	124205406	72330742	27165548	187527	10989	35
41	124313640	72521343	27233392	185512	11272	0
42	123756431	71751979	26718869	177880	10283	35
43	123665442	71555300	26507456	166855	8728	0
44	123527562	71225018	26309894	169081	9117	0
45	123711590	71684664	26704841	176042	9117	0
46	123177739	70918516	26119929	171555	9823	0
47	123133322	70894876	26084523	161908	9258	0
48	123723569	71615866	26588339	169576	8905	0
49	122733286	70421590	25758940	154912	8127	0
50	122902120	70582827	25867668	160318	7951	0
51	122540707	70076148	25506996	158375	7562	0
52	122329611	69820777	25315901	150777	8021	0
53	122113357	69590424	25201025	149435	8622	0
54	122155088	69457739	25040177	148693	7668	0
55	121205406	68379364	24269223	132226	5936	0
56	121616890	68573498	24409505	134700	6784	0
57	120785654	67682226	23798481	130813	6290	0
58	120788127	67769859	23914452	131060	6855	0
59	120632473	67461025	23669965	129187	7279	0
60	120124134	66715194	23176254	120212	6855	0
61	118955477	65476572	22433993	114947	5088	0
62	119216325	65668622	22516431	116608	4276	0
63	118916396	65347491	22315901	112120	5442	71
64	118393604	64586820	21794841	105265	4770	0
65	118133922	64311343	21654028	104488	4205	0
66	117968269	63963392	21475760	102898	4346	0
67	118194346	64337314	21705548	105477	5371	0
68	117845265	63863110	21419046	100424	3781	0
69	117218092	63090601	20949541	95689	3852	0
70	116838339	62563710	20642085	96572	4099	0
71	116809505	62499223	20508869	89011	3392	0
72	116537491	62222473	20407880	93145	4594	0

73	116516572	61978657	20177880	88057	4134	0
74	116007915	61494594	19986608	87314	4170	0
75	115704841	61260848	19826325	85088	3640	0
76	115556714	61036926	19703640	85442	3534	0
77	115181378	60388339	19256961	80106	3392	0
78	114489046	59773145	18971696	78657	3463	0
79	114444664	59749011	18904028	76890	3534	35
80	114717845	59922261	19009894	79717	3110	0
81	114162085	59325477	18689258	78869	3216	35
82	113593322	58540389	18206290	70883	3110	0
83	113180106	58145477	17969859	68551	3180	0
84	113254134	58164700	17907880	69187	2933	0
85	113065618	57875760	17845124	69435	3180	0
86	113127173	57980989	17919011	69117	3286	0
87	112464311	57187527	17487527	67138	2473	0
88	112442191	57220495	17484276	64099	2509	0
89	112642792	57448763	17613110	65159	2862	0
90	111795336	56256820	16927562	61731	2615	0
91	111374452	55940106	16798799	56608	2403	0
92	111260000	55830141	16699717	59682	2332	0
93	111127385	55579788	16565406	58445	1979	0
94	110571590	54993145	16265053	57350	2085	0
95	110376184	54702898	16131555	56078	2509	0
96	110189187	54610742	16108551	56360	2438	0
97	109867915	54300954	15914982	53180	1943	0
98	109772085	54002226	15763463	54134	2332	0
99	109779046	54005265	15746466	53039	1943	0
100	109201731	53293392	15369011	51979	1943	0
101	108956325	52999647	15189929	45830	1979	0
102	108857385	53010283	15226714	50495	1908	0
103	108553958	52634629	15063852	46784	1837	0
104	108205265	52311307	14893922	44770	1908	0
105	107996396	51981201	14740601	44134	1484	0
106	107461095	51665795	14609965	44346	1908	0
107	107374876	51341908	14384841	43887	1731	0
108	107243887	51136643	14313816	43534	1625	0
109	107123145	51050141	14304099	44311	1625	0
110	107028445	50840353	14154806	41943	1837	0
111	106426219	50283357	13883180	41378	1837	0

112	106149364	49756078	13643816	41025	1343	0
113	105870919	49636148	13595760	37668	1696	0
114	106536643	50327173	13916926	40919	1237	0
115	105838163	49626678	13590389	38092	1307	0
116	105216961	48822650	13206537	38410	1166	0
117	105059682	48696855	13176678	36608	1095	0
118	104876184	48423463	12985300	36431	1413	0
119	104427915	48091519	12865159	37668	1484	0
120	104120247	47770141	12718163	34240	1307	0
121	103969081	47483392	12566290	33039	1272	0
122	103793710	47260141	12473074	31201	1131	0
123	103445830	47039329	12374735	32721	1131	0
124	103149293	46773322	12254064	31484	1025	0
125	102948975	46489823	12147420	32438	1131	0
126	102810919	46343710	12036466	31307	1095	35
127	102534912	46015618	11905265	30883	636	0
128	102244912	45662721	11755760	28445	954	0
129	101930848	45305442	11615972	28057	883	0
130	101711802	45097880	11507032	27314	954	0
131	101471060	44936078	11452862	27774	919	0
132	101273640	44561696	11255300	27032	1095	0
133	101258905	44594064	11321590	26007	883	0
134	100972367	44347880	11189788	27986	848	0
135	100823569	44158233	11112085	25336	777	0
136	100639611	43909187	11026219	25442	919	0
137	100125053	43496078	10837385	24382	459	0
138	99981166	43225053	10670919	23746	495	0
139	99671661	43005689	10610177	25265	848	0
140	99432615	42875371	10556643	25548	601	0
141	99412120	42606820	10466184	23604	742	0
142	99181979	42354700	10363604	23357	601	0
143	98850212	42206431	10318021	21307	813	0
144	98644700	41947350	10219753	23216	707	0
145	98531519	41795336	10137739	22580	848	0
146	98212544	41540035	10020813	22756	530	0
147	97975901	41303392	9945583	20848	565	0
148	97829682	40978905	9812827	21413	742	0
149	97689505	40838587	9755406	21590	601	0
150	97233357	40462615	9610424	21131	742	0

151	97034841	40287244	9542721	21237	671	0
152	96901095	40084488	9443604	19576	565	0
153	96663357	39910671	9405936	20106	671	0
154	96507774	39645230	9298799	19470	353	0
155	96413039	39658339	9289329	18551	601	0
156	96041272	39284700	9147208	17986	353	0
157	95723110	38843852	8946678	18127	742	0
158	95556078	38713993	8886466	17491	601	0
159	95442509	38554806	8870177	19117	919	71
160	95265866	38466996	8821484	17244	424	0
161	95105724	38335760	8820495	17420	353	0
162	94896961	38021095	8654382	17279	459	0
163	94690742	37822438	8589823	17173	495	0
164	94400601	37474099	8463675	15689	353	0
165	94234700	37360848	8419399	17102	919	0
166	94292862	37368057	8412686	17562	530	0
167	93817986	36980141	8247138	15795	636	0
168	93732756	36920813	8235406	15018	424	0
169	93388799	36650318	8145936	14982	424	0
170	93213251	36309435	7997562	15018	671	0
171	92959717	36100035	7929894	14876	601	0
172	92934770	36010318	7894205	14558	459	0
173	92543640	35831943	7891555	17703	1590	0
174	92335760	35612367	7804558	16890	1095	71
175	92037173	35480459	7772085	20106	2827	247
176	91913004	35339505	7692155	17491	1449	71
177	91688410	35027668	7600883	17562	1767	35
178	91421519	34756784	7504770	17138	1767	0
179	90946466	34373675	7370777	19152	2261	71
180	90591943	34069364	7300813	19611	2473	71
181	90238375	33884488	7290318	29435	7350	636
Průměr	105175478,0	49238407,2	15245607,6	87910,3	8482,5	161,8
Maximum	134655548	85701519	38089011	416890	98763	2827
Minimum	63397244	5557703	836042	14558	353	0
Směrodatná odchylka	16518912,1	19690956,5	8748016,5	84737,3	15120,5	470,1