

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

VYUŽITÍ ČISTIČEK VZDUCHU

DIPLOMOVÁ PRÁCE



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Cízl Jméno: Jakub Osobní číslo: 483142
 Fakulta/ústav: Fakulta strojní
 Zadávací katedra/ústav: Ústav techniky prostředí
 Studijní program: Technika prostředí
 Specializace: Bez specializace

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Využití čističek vzduchu

Název diplomové práce anglicky:

Use of Air Purifiers

Pokyny pro vypracování:

Popište principy odlučování suspendovaných částic. Zhodnoťte využití přenosných čističek vzduchu pro zlepšení kvality vnitřního ovzduší. V experimentální části s použitím optického počítáče částic změřte a vyhodnoťte účinnost čističek vzduchu Daikin MC707VM, Ionic Care Triton X6 a Haier KJF800KCAA z hlediska snižování koncentrace suspendovaných znečišťujících částic.

Seznam doporučené literatury:

- 1) Hemerka J.: Odlučování tuhých částic, ČVUT, Praha, 2000.
- 2) Aerosol Dust Monitors & Counters, Grimm Aerosol Technik Manual
- 3) Air Cleaners and Air Filters in the Home, U.S. Environmental Protection Agency
- 4) Air purification device, Eurovent Certita Certification
- 5) publikace v odborných časopisech z oblasti čistoty vnitřního prostředí, využití a hodnocení čističek vzduchu
- 6) firemní literatura

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Pavel Vybíral, Ph.D. ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 20.03.2023

Termín odevzdání diplomové práce: 14.06.2023

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Pavel Vybíral, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Vladimír Zmrhal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

SOUHRN

Tato diplomová práce se zabývá principem a využitím přenosných čističek vzduchu. Cílem teoretické části je zorientovat čtenáře v problematice obecné teorie znečišťujících částic, principech odlučování suspendovaných částic a hodnocení využití přenosných čističek vzduchu z hlediska zlepšení kvality vnitřního ovzduší. V praktické části se práce věnuje měření čističek vzduchu Ionic CARE Triton X6, Daikin MC 707 VM a Haier KJF600KCAA v laboratorním prostředí. První část měření probíhá v těsné zkušební komoře, kdy je porovnávána účinnost čističek při výrobci doporučených režimech. Další část měření porovnává účinnost čističek se simulovaným větráním, které je zajištěno pomocí odtahu vzduchu ventilátorem. Poslední část se zaměřuje na porovnání účinnosti čističek z hlediska rozdílného zakrytí, simulující například jejich nevhodné umístění. Zdrojem znečištění jsou vonné tyčinky a koncentrace tuhých částic je po celou dobu experimentu zaznamenávána analyzátozem GRIMM 1.109. Výsledky jsou vyjádřeny jako procentuální pokles koncentrace částic v závislosti na čase.

SUMMARY

This diploma thesis deals with the principle and use of portable air purifiers. The aim of the theoretical part is to orient the reader in the general theory of polluting particles, principles of separation of suspended particles and evaluation of the use of portable air purifiers, from the point of view, of improving indoor air quality. The practical part is devoted to the measurement of air purifiers Ionic CARE Triton X6, Daikin MC 707 VM and Haier KJF600KCAA in a laboratory environment. The first part of the measurement takes place in a tight test chamber, when the efficiency of the purifiers is compared in the modes recommended by the manufacturers. The next part of the measurement compares the efficiency of the purifiers with simulated ventilation, which is ensured by means of air extraction by fan. The last part focuses on comparing the efficiency of the purifiers in terms of different coverage, simulating, for example, their inappropriate placement. The source of pollution are incense sticks, and the concentration of solid particles is recorded with a GRIMM 1.109 analyzer throughout the experiment. The results are expressed as a percentage decrease in particle concentration as a function of time.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Využití čističek vzduchu“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Vybírala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne:

Bc. Jakub Cízl:

.....

.....

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Pavlu Vybíralovi, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost, ochotnou pomoc při měření, cenné připomínky a rady při zpracování této diplomové práce.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	9
ÚVOD.....	13
1 TEORIE ČÁSTIC.....	14
1.1 Znečišťující látky	14
1.1.1 Tuhé znečišťující látky (tuhé částice)	14
1.1.2 Kapalné a plynné částice.....	15
1.2 Tvar a velikost částic	15
1.3 Zrnitost částic.....	16
1.3.1 Rozdělení velikostí částic dle počtu.....	17
1.4 Suspendované částice PM _x	20
1.4.1 Vliv částic PM _x na zdraví.....	21
2 ODLUČOVÁNÍ TUHÝCH ČÁSTIC	23
2.1 Odlučovací principy	24
2.1.1 Gravitační princip	24
2.1.2 Setrvačný princip	25
2.1.3 Odstředivý princip	26
2.1.4 Difúzní princip.....	27
2.1.5 Intercepční princip	29
2.1.6 Elektrický princip.....	30
2.2 Třídění odlučovačů	30
2.2.1 Suché mechanické odlučovače.....	31
2.2.2 Mokrý mechanické odlučovače.....	31
2.2.3 Elektrické odlučovače	32
2.2.4 Filtry.....	32
3 FILTRACE VZDUCHU.....	33
3.1 Třídění filtrů atmosférického vzduchu.....	33
3.1.1 Filtry pro všeobecné větrání.....	33
3.1.2 Filtry pro vysoce účinnou filtraci.....	37
4 STAV VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ.....	40
4.1 Kvalita vnitřního ovzduší.....	40
4.1.1 Tepelně-vlhkostní mikroklima	41
4.1.2 Oděrové mikroklima	41
4.1.3 Toxické mikroklima.....	41
4.1.4 Aerosolové mikroklima	42
4.1.5 Mikrobiální mikroklima.....	42

4.1.6 PEL a NPK.....	42
4.1.7 Legislativa v oblasti kvality vnitřního prostředí	43
5 ČISTIČKY VZDUCHU	45
5.1 Druhy čističek.....	45
5.1.1 Čističky vzduchu s HEPA filtrem.....	45
5.1.2 Čističky vzduchu s aktivním uhlím.....	46
5.1.3 Čističky vzduchu s elektrostatickým filtrem.....	47
5.1.4 Čističky vzduchu s ionizátorem	48
5.1.5 Čističky vzduchu s UV filtrem.....	48
5.1.6 Čističky vzduchu s fotokatalytickým principem.....	49
5.1.7 Vícetupňové čističky vzduchu.....	51
5.2 Hodnotící standardy pro přenosné čističky vzduchu	52
5.2.1 ANSI/AHAM AC-1 standard (USA).....	52
5.2.2 JEM 1467 standard (Japonsko).....	54
5.2.3 GB/T18801 standard (Čína).....	54
5.2.4 XP B44-200 standard (Francie)	56
5.3 Hodnocení přenosných čističek vzduchu	58
5.4 Současná situace na trhu v ČR.....	72
5.4.1 Čističky vzduchu do 5 000 Kč	72
5.4.2 Čističky vzduchu od 5 000 do 10 000 Kč	73
5.4.3 Čističky vzduchu od 10 000 Kč	74
6 PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTÁLNÍM MĚŘENÍ.....	75
6.1 Optický analyzátor částic GRIMM 1.109	75
6.2 Ventilátor Systemair K315 L EC.....	79
6.3 Čistička vzduchu Ionic CARE Triton X6	79
6.4 Čistička vzduchu Daikin MC 707 VM	81
6.5 Čistička vzduchu Haier KJF600KCAA	84
7 EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ ČISTIČEK VZDUCHU S VĚTRÁNÍM.....	87
7.1 Měřicí komora.....	87
7.2 Postup měření.....	90
7.3 Složení velikostních frakcí.....	91
7.4 Vyhodnocení účinností čističek vzduchu.....	91
7.4.1 Bez použití čističky.....	92
7.4.2 Použití čističek vzduchu	93
7.5 Vyhodnocení účinnosti při přívodu a odvodu vzduchu	94
7.6 Celkové vyhodnocení.....	96
8 POSOUZENÍ ÚČINNOSTI ČISTIČEK VZDUCHU PŘI ROZDÍLNÉM ZAKRYTÍ.....	100

8.1 Experimentální zákryt.....	100
8.2 Postup měření.....	104
8.3 Vyhodnocení účinností čističek vzduchu.....	104
8.3.1 Čistička Ionic CARE Triton X6.....	104
8.3.2 Čistička Daikin MC 707 VM.....	106
8.3.3 Čistička Haier KJF600KCAA.....	107
8.3.4 Celkové vyhodnocení.....	109
ZÁVĚR	111
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	113
PŘÍLOHY	119

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

Symbol	Jednotka	Veličina
a	μm	velikost částice
a_A	μm	ekvivalentní velikost částice dle průmětu
$\overline{a_{N,2}}$	μm	střední kvadratická velikost dle počtu
$\overline{a_{N,3}}$	μm	střední kubická velikost dle počtu
a_S	μm	ekvivalentní velikost částice dle povrchu
a_V	μm	ekvivalentní velikost částice dle objemu
a_1	μm	aerodynamická velikost částice
A	m^2	celkový průmět
A_m	%	střední odlučivost
B	s/kg	pohyblivost částice
C	$\mu g/m^3$	koncentrace plynné látky
C_{vstup}	$\mu g/m^3$	koncentrace na vstupu do čističky
$C_{výstup}$	$\mu g/m^3$	koncentrace na výstupu z čističky
C_0	$\mu g/m^3$	počáteční koncentrace plynné látky
d	m	průměr
D_B	m^2/s	součinitel Brownovské difúze
$E_{A,i}$	%	účinnost odlučování elektricky neutrálního filtru
$E_{D,i}$	%	střední aritmetická účinnost odlučování filtru
E_m	%	střední účinnost filtrace
g	m/s^2	gravitační zrychlení
H	m	hloubka
j	-	pořadové číslo

k	J/K	Boltzmannova konstanta
M	kg	celková hmotnost částice
\dot{M}_p	kg/s	hmotnostní tok částic na vstupu do odlučovače
\dot{M}_v	kg/s	hmotnostní tok částic na výstupu z odlučovače
\dot{M}_z	kg/s	hmotnostní tok zachycených částic
N	-	celkový počet částic
O_c	-	celková odlučivost
O_f	-	frakční odlučivost
$p_{N,j}$	$1/\mu m$	četnost částic dle počtu
P	-	propad
P_{odl}	-	množství odloučených částic
Pe	-	Pecletovo číslo
Q	m^3/h	průtok vzduchu čističkou
Re_d	-	Reynoldsovo číslo proudu
S	m^2	celkový povrch
S_e	m^2	plocha usazovacích elektrod
Stk	-	Stokesovo kritérium
\check{S}	m	šířka
t	s	čas
T	K	absolutní teplota
u_k	m/s	konečná odlučovací rychlost
u_p	m/s	pádová rychlost částice
u_t	m/s	tangenciální rychlost částice
u_ρ	m/s	radiální rychlost částice
v_d	m/s	střední rychlost plynu v komoře

v_t	m/s	tangenciální rychlost plynu
v_0	m/s	rychlost natékajícího plynu
v_1	m/s	rychlost plynu na vstupu
V	m^3	celkový objem
V	m	výška
\dot{V}	m^3/s	objemový průtok
\bar{x}	$[m]$	tloušťka mezní vrstvy
Z	-	zbytek
Z_p	-	zbytek částic na vstupu do odlučovače
Z_z	-	zbytek částic v záchytu
$(\Delta a)_j$	μm	velikost částic ve frakci
$(\Delta A)_j$	m^2	průmět částic ve frakci
$(\Delta M)_j$	kg	hmotnost částic ve frakci
$(\Delta N)_j$	-	počet částic ve frakci
Δp	Pa	tlakový rozdíl
$(\Delta P_N)_j$	-	poměrný počet částic
α	-	parametr intercepce
ε	-	poréznost vláknité vrstvy
μ	$Pa \cdot s$	dynamická viskozita
η	%	účinnost odlučování
Λ_{ON}	-	celkové množství částic změřené za chodu čističky
Λ_{OFF}	-	celkové množství částic změřené při vypnuté čističce
ξ	-	součinitel odporu
ρ	kg/m^3	hustota prostředí
$\rho_{\check{c}}$	kg/m^3	hustota částice

τ_{ξ}

s

doba relaxace částice

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá kvalitou ovzduší ve vnitřních prostorech budov (práce, domov, škola, atd.), kde v současné době tráví většina lidí největší část svého dne. Kvalitní ovzduší má výrazný vliv na naše fyzické a psychické zdraví. Jedním z možných opatření ke zlepšení kvality ovzduší v budovách je použití vhodné čističky vzduchu. Existuje velké množství různých druhů čističek, od jednoduchých po složité s více stupni čištění. Obecně lze říci, že čím více filtrů daná čistička vzduchu obsahuje, tím lepší účinnosti odlučování dosahuje.

Úvodní část je zaměřena na základní teorii částic, přičemž jsou zde podrobněji probrány suspendované částice PM a jejich vliv na zdraví. V další kapitole jsou popsány jednotlivé principy odlučování tuhých znečišťujících částic a také čtyři základní skupiny odlučovačů. Následně se práce zabývá problematikou třídění filtrů atmosférického vzduchu, kde se paralelně využívá více norem pro třídění jak filtrů pro všeobecné větrání, tak filtrů pro vysoce účinnou filtraci. Dále se krátce zaměřuje na kvalitu vnitřního ovzduší z hlediska vnitřního mikroklimatu. V závěrečné kapitole teoretické části se již diplomová práce věnuje samotným čističkám vzduchu, kdy je nejprve proveden popis jednotlivých způsobů čištění a druhů filtrace v čističkách, následně se zaměřuje na různé světové hodnotící standardy, dále následuje krátká rešerše zaměřená na hodnocení přenosných čističek vzduchu a nakonec jsou uvedeny konkrétní typy čističek ve třech cenových kategoriích.

Cílem praktické části diplomové práce je zhodnotit účinnosti čističek vzduchu Ionic CARE Triton X6, Daikin MC 707 VM a Haier KJF600KCAA při zvolených režimech, z hlediska snižování tuhých znečišťujících částic v laboratorním prostředí. V první fázi je experimentálně porovnána účinnost čističek s větráním simulovaným přívodem čistého vzduchu z laboratoře a odtahem znečištěného vzduchu ventilátorem z měřicí komory. Druhá fáze experimentální části práce se věnuje porovnání účinnosti čističek vzduchu při rozdílném zakrytí, čímž je simulováno například nevhodné umístění čističky.

1 TEORIE ČÁSTIC

1.1 Znečišťující látky

Znečišťující látkou (zkráceně ZL) se rozumí jakákoliv látka vnesená do ovzduší nebo v něm druhotně vznikající, která má přímo nebo po fyzikální či chemické přeměně v ovzduší škodlivý vliv na život a zdraví lidí a zvířat, na životní prostředí nebo na hmotný majetek. [1]

V některých publikacích se látky znečišťující ovzduší označují jako polutanty (z anglického pollution – znečištění). ZL lze obecně rozdělit na primární a sekundární. Skupinu primárních ZL tvoří látky vypouštěné přímo do atmosféry, jejichž původcem jsou buď antropogenní zdroje způsobené lidskou činností (automobilová doprava, průmyslová činnost, atd.), nebo zdroje přírodní (sopečná aktivita, přenos písku z pouští, atd.). Sekundární polutanty vznikají až v atmosféře chemickou reakcí prekurzorů. [2]

1.1.1 Tuhé znečišťující látky (tuhé částice)

Pojmem tuhé znečišťující látky (zkráceně TZL) jsou obecně označovány všechny formy výskytu těchto částic. TZL jsou pro své negativní účinky na lidi a různé organismy odlučovány pomocí systémů čištění vzduchu. V technické praxi se tyto částice označují různě [3]:

- **Prach** – tuhé částice vznikající erozí hornin, sopečnou činností nebo při mechanických operacích
- **Popílek** – částice vznikající spalováním tuhých paliv
- **Dým** – jemné tuhé i kapalné částice v ovzduší vznikající kondenzací a tuhnutím par látek
- **Kouř** – částice vznikající při spalování organických látek s obsahem uhlíku
- **Aerosol** – jemné tuhé i kapalné částice v ovzduší, které setrvávají ve stavu vznosu

1.1.2 Kapalné a plynné částice

Kapalné částice rozptýlené v ovzduší vznikají buď kondenzací plynné fáze, nebo rozptylem většího objemu tekutiny. Aerodisperzní směs, která při daných procesech vzniká, se označuje jako mlha a její částice mají velikost 0,1 až 30 μm . [4]

Pokud plyny a páry chemicky nereagují se vzduchem, tvoří směsi. Do ovzduší jsou vnášeny lidskou činností nebo pomocí přírodních zdrojů. Mezi hlavní plynné látky znečišťující ovzduší patří oxidy síry (SO_x), dusíku (NO_x) a uhlíku (CO_x), metan (CH_4) či ozon (O_3). [4]

1.2 Tvar a velikost částic

Tvar, velikost, zrnitost a hustota částic jsou veličiny, které zásadně ovlivňují odlučování souboru tuhých částic z plynného prostředí. Většina zrnitých materiálů obsahuje částice nepravidelných tvarů. Tvar částice obecně závisí na způsobu jejího vzniku. Například částice vznikající kondenzací a tuhnutím par mají tvar koule, který je považován za ideální. Částice složitějších tvarů vznikají při různých mechanických operacích (mletí, drcení). [5]

Sledováním tvaru částic se zabývá obor zvaný morfologie, který rozlišuje tři typy částic: **izometrické** (mají všechny tři rozměry vzájemně srovnatelné), **lamelární** (dva rozměry jsou větší než třetí) a **fibrilární** (jeden rozměr je větší než dva zbývající). [5]

K popisu velikosti částice je zapotřebí volit buď charakteristický, nebo ekvivalentní rozměr, který vyjadřuje porovnání skutečné částice s ideální kulovou částicí. Podle vlastnosti, kterou má být myšlená kulová částice ekvivalentní skutečné (nepravidelného nekulového tvaru), lze definovat různé způsoby vyjádření ekvivalentní velikosti částic [5]:

- **dle průmětu** – skutečná částice o průmětu A se nahrazuje částicí kulového tvaru o průměru a_A , která má stejný průmět jako ekvivalentní kulová částice
- **dle povrchu** – skutečná částice o povrchu S se nahrazuje částicí kulového tvaru o průměru a_S , která má stejný povrch jako ekvivalentní kulová částice
- **dle objemu** – skutečná částice o objemu V se nahrazuje částicí kulového tvaru o průměru a_V , která má stejný objem jako ekvivalentní kulová částice

- **dle pádové rychlosti** – uvažuje se rovnost pádových rychlostí skutečné a ekvivalentní částice. Pádová rychlost u_p je definována jako mezní rychlost, kterou by hmotná částice padala za ustáleného stavu působením tíhového pole Země. Kvůli vzájemnému srovnání pohybových vlastností částic se zavádí jednotná hustota částice $\rho_\zeta = 1000 \text{ kg/m}^3$. Ekvivalentní velikost částice s hustotou ρ_ζ se nazývá **aerodynamická velikost částice a_1** .

1.3 Zrnitost částic

Zrnitý materiál je tvořen velkým množstvím částic, které se vzájemně liší velikostí a tvarem. Uskupení stejně velkých částic se označuje jako **monodisperzní soubor** (setkáme se s ním jen zřídka) a soubor, který tvoří částice různých velikostí, jako **polydisperzní**. Základní charakteristikou polydisperzního souboru je informace o rozdělení velikostí částic (zrnitosti, disperzité). Podle sledované veličiny se rozlišuje rozdělení [3]:

- dle počtu** – označuje se indexem N
- dle průmětu** – označuje se indexem A
- dle hmotnosti** – označuje se indexem M

Sledování jednotlivých velikostí by bylo velmi pracné a finančně nákladné, proto se celkový soubor částic dělí do velikostních intervalů (frakcí) $(\Delta a)_j$. Počet frakcí je konečné číslo, které může být dáno například počtem kanálů měřicích přístrojů, tedy $j = 1, 2, \dots, k$. Celkový počet, průmět a hmotnost částic lze poté vyjádřit pomocí vztahů níže. [5]

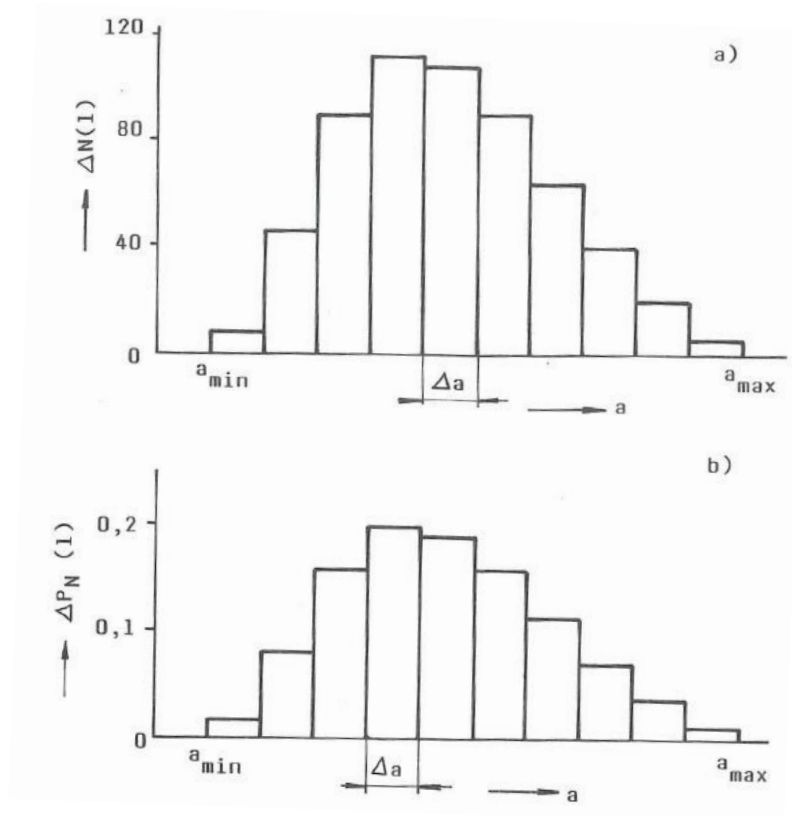
$$N = \sum_{j=1}^k (\Delta N)_j \quad (1)$$

$$A = \sum_{j=1}^k (\Delta A)_j \quad (2)$$

$$M = \sum_{j=1}^k (\Delta M)_j \quad (3)$$

1.3.1 Rozdělení velikostí částic dle počtu

Nejjednodušším vyjádřením rozdělení velikostí částic dle počtu je pomocí sloupcových diagramů (histogramů), ve kterých se pro jednotlivé velikostní frakce $(\Delta a)_j$ vynášejí počty částic $(\Delta N)_j$ (viz obr. 1a) nebo poměrné počty částic ve frakci $(\Delta P_N)_j$ (viz obr. 1b). [3]

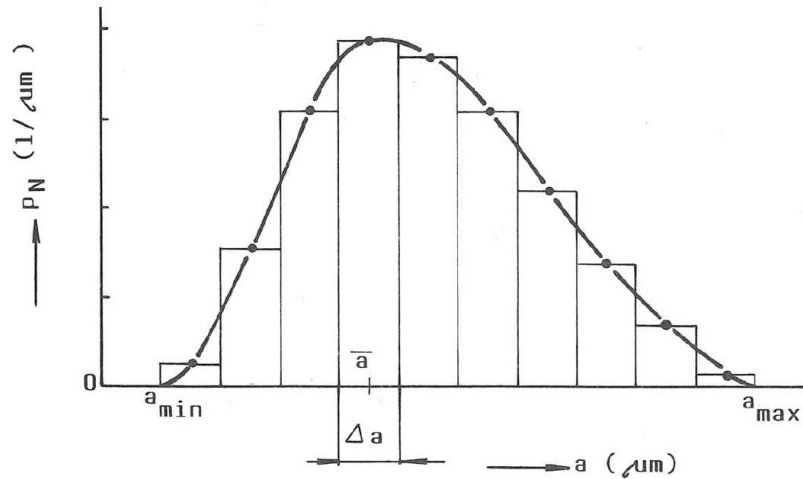


Obr. 1: Sloupcové diagramy rozdělení velikosti částic dle počtu [3]

Vztah pro měrný poměrný počet $p_{N,j}$ vzniká podělením poměrného počtu částic ve frakci velikostí frakce. Pro tuto veličinu se v české literatuře také používá označení četnost dle počtu. [5]

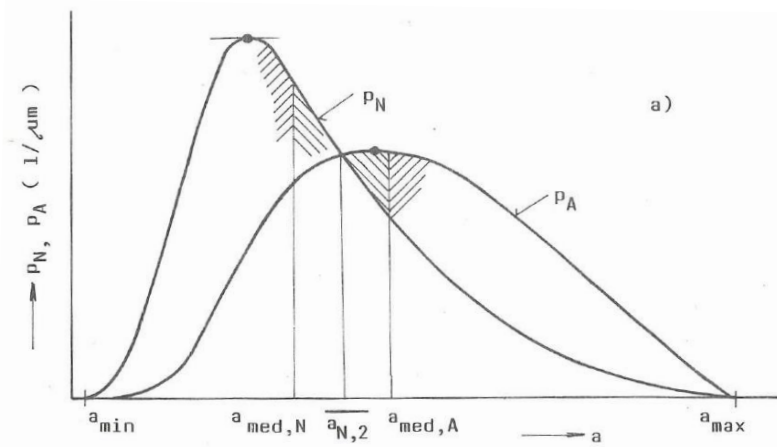
$$p_{N,j} = \frac{(\Delta P_N)_j}{(\Delta a)_j} \quad (4)$$

Při vynesení závislosti četnosti dle počtu na střední velikosti \bar{a}_j příslušné frakce vzniká **křivka četnosti dle počtu** $p_N(a)$ (viz obr. 2). Počet frakcí přímo ovlivňuje hladkost průběhu křivky, pokud je tedy počet frakcí (intervalů) malý, zhoršuje se přesnost vynesení křivky. [3]



Obr. 2: Křivka četnosti dle počtu [3]

Křivky četnosti dle počtu (N), průmětu (A) a hmotnosti (M) mají odlišný průběh (viz obr. 3). Průsečíkem křivek četnosti dle počtu a průmětu je bod, ve kterém lze odečíst tzv. **střední kvadratickou velikost částice dle počtu** $\overline{a_{N,2}}$, matematicky vyjádřenou vztahem (5). Tato velikost je charakteristická pro soubory částic o stejném celkovém počtu N a průmětu A . Průsečíkem křivek četnosti dle počtu a hmotnosti je opět bod, ve kterém lze tentokrát odečíst tzv. **střední kubickou velikost částice dle počtu** $\overline{a_{N,3}}$, matematicky vyjádřenou vztahem (6). Tato velikost je charakteristická pro soubory částic o stejném celkovém počtu N a objemu V . [1]

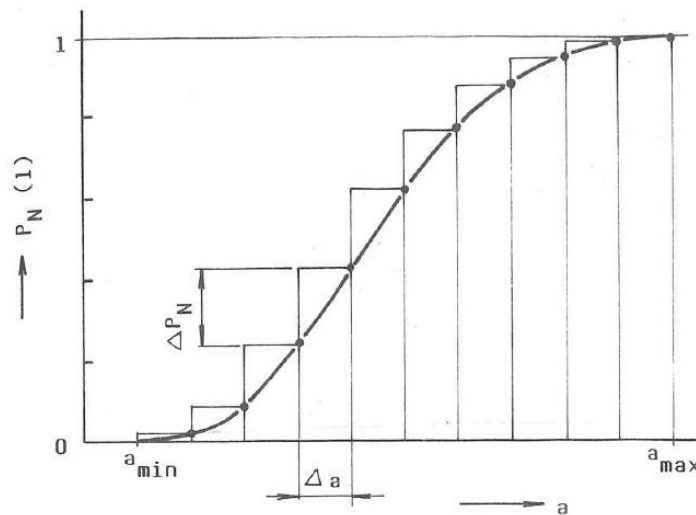


Obr. 3: Rozdělení velikostí částic dle počtu a dle průmětu [3]

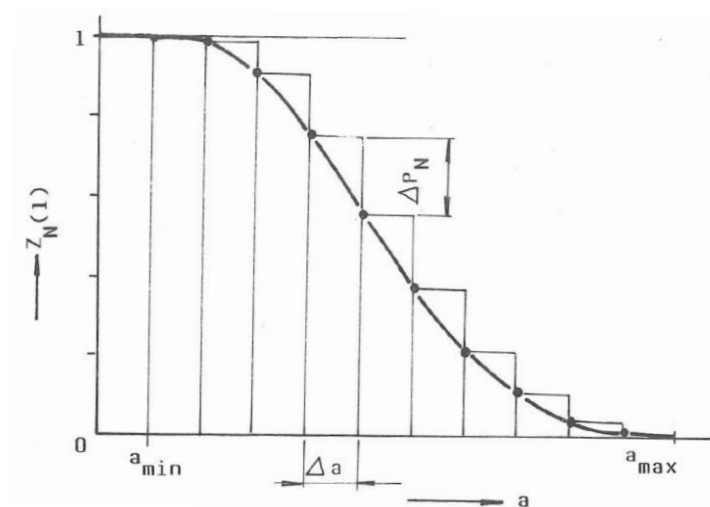
$$\overline{a_{N,2}} = \left[\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^2 \cdot p_N(a) da \right]^{1/2} \quad (5)$$

$$\overline{a}_{N,3} = \left[\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} a^3 \cdot p_N(a) da \right]^{1/3} \quad (6)$$

Do skupiny kumulativních křivek zrnitosti patří **křivka propadů** $P_N(a)$ (viz obr. 4) a **křivka zbytků** $Z_N(a)$ (viz obr. 5). Křivka propadů vzniká postupným načítáním hodnot $(\Delta P_N)_j$ a $(\Delta a)_j$ od minimální do maximální velikosti částice, kdežto křivka zbytků vzniká postupným načítáním stejných hodnot, tentokrát však od maximální do minimální velikosti částice. Křivka propadů rovněž zobrazuje závislost poměrného počtu částic menších než daná velikost, kdežto křivka zbytků zobrazuje závislost poměrného počtu částic větších než daná velikost. [5]



Obr. 4: Křivka propadů [3]

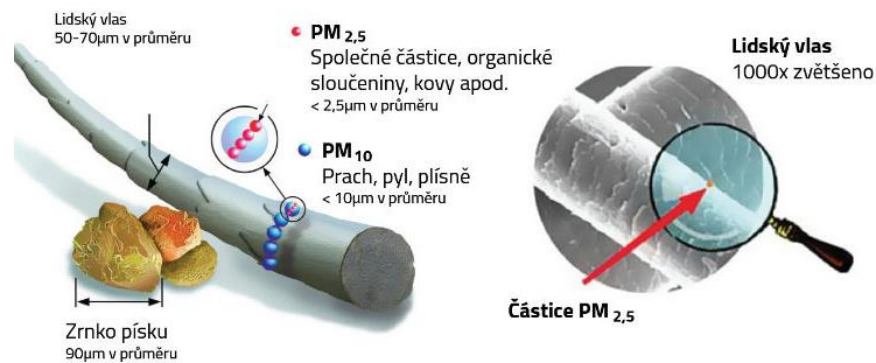


Obr. 5: Křivka zbytků [3]

1.4 Suspendované částice PM_x

Suspendované částice se také označují výrazy jako prachové částice, prašný aerosol nebo jednoduše prach. Zkratka PM je odvozena z anglického výrazu particulate matter, což v doslovném překladu znamená částicová hmota. V češtině se pro tuto zkratku ustálil již zmíněný výraz suspendované (aerosolové) částice. Dolní index za zkratkou PM označuje velikost částice. Konkrétně se jedná o maximální hodnotu aerodynamického průměru v mikrometrech, který je definován jako průměr koule o hustotě 1000 kg/m^3 se stejnou aerodynamickou charakteristikou jako sledovaná částice. [6]

Suspendované částice jsou podle velikosti frakce rozděleny do čtyř kategorií. Do frakce $PM_{0,1}$ se řadí částice, jejichž aerodynamická velikost je menší než $0,1 \mu\text{m}$ (ultrajemné částice). Jako PM_1 se označují částice, jejichž aerodynamická velikost je menší než $1 \mu\text{m}$ (submikronové částice). Do frakce $PM_{2,5}$ se řadí částice, jejichž aerodynamická velikost je menší než $2,5 \mu\text{m}$ (jemné částice). A konečně jako PM_{10} se označují částice, jejichž aerodynamická velikost je menší než $10 \mu\text{m}$ (hrubé částice). Průměr lidského vlasu se pro představu pohybuje kolem $70 \mu\text{m}$ (viz obr. 6). [6]



Obr. 6: Grafické porovnání velikosti částic $PM_{2,5}$ a PM_{10} [7]

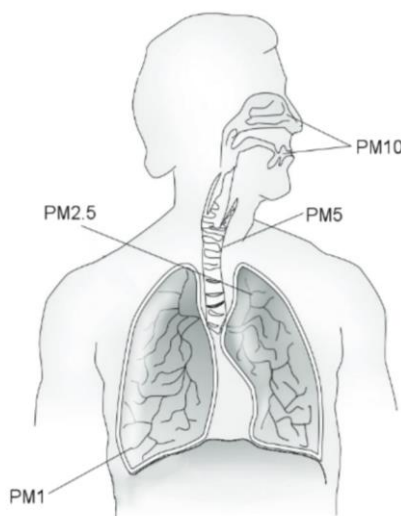
Prachové částice jsou produkovány jak z přírodních zdrojů, tak lidskou činností. Mezi nejvýznamnější přírodní zdroje patří sopečná činnost a lesní požáry. Mezi antropogenní zdroje se řadí spalování fosilních paliv (biomasa, uhlí, benzín) v dopravě a průmyslu, těžba, stavebnictví, zemědělství a mnoho dalších. [6]

1.4.1 Vliv částic PM_x na zdraví

Z průzkumů Světové zdravotnické organizace (WHO) vyplývá, že v Evropě je znečištěné ovzduší (i přes různá omezení) stále nejčastější environmentální příčinou předčasného úmrtí. Podle WHO zemře předčasně na nemoci spojené se znečištěním ovzduší každoročně kolem sedmi milionů lidí, v Evropě je to kolem půl milionu a v České republice kolem osmi tisíc lidí ročně (asi sedm procent z celkového počtu ročních úmrtí). [8]

Pevné suspendované částice se do lidského těla dostávají vdechováním a působí negativně na kardiovaskulární a plicní systém. Toxicitu částic PM způsobují především chemické látky obsažené v aerosolu (amonné ionty, sulfáty a některé těžké kovy jako vanad, měď či nikl). Zdravotní rizika závisí na chemickém složení, koncentraci a velikosti prachových částic. Obecně lze říci, že čím menší částice je, tím je škodlivější pro lidské zdraví, protože proniká hlouběji do plicního systému. [9]

S většími částicemi (nad 10 μm) si lidské tělo většinou dokáže poradit. Buď jsou zachyceny pomocí chloupků v nose, nebo je člověk jednoduše vykašle. Částice PM₁₀ pronikají do horních cest dýchacích a usazují se na průduškách, kde mohou podráždit sliznici. Částice PM_{2,5} se usazují hlouběji v dolních cestách dýchacích, kde vyvolávají nebo zhoršují chronická onemocnění (astma, bronchitida). Částice PM₁ pronikají do plicních sklípků a ultrajemné částice (do 0,1 μm) mohou skrz plicní sklípky prostupovat dokonce až do krevního řečiště (viz obr. 7). Z tohoto důvodu mívají ultrajemné částic vliv jak na dýchací soustavu, tak na krevní oběh. [10]



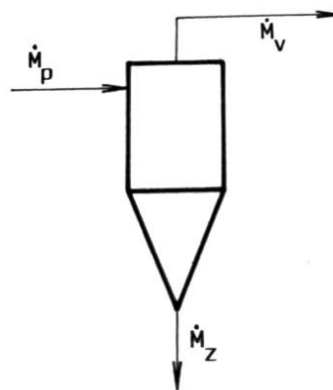
Obr. 7: Dýchací ústrojí člověka a průnik částic PM [11]

Vdechování částic PM má obecně za následek zvýšení kojenecké úmrtnosti, snížení délky dožití, chronické plicní choroby a zánět průdušek (bronchitida). Vzhledem k tomu, že na sebe prachové částice často vážou různé organické látky s karcinogenními a mutagenními účinky, mohou způsobit také rakovinu plic. [6]

2 ODLUČOVÁNÍ TUHÝCH ČÁSTIC

Všechny principy odlučování tuhých i kapalných částic z plynů jsou založeny na separaci částic z proudu plynu na odlučovacích plochách separátorů. Odlučovací plochy mohou být různého druhu. Pro nejjednodušší odlučovače jsou plochami buď stěna odlučovače, nebo jeho vestavba. U filtrů jsou odlučovacími plochami vlákna filtračních vložek, případně povrch již odloučených částic, které tvoří filtrační koláč. Odlučovací plochu u mokrých odlučovačů tvoří kapalně částice v proudu plynu nebo vodní pěna. [3]

Základní veličinou, podle které se hodnotí míra odloučení příměsi z proudu plynu, je **celková odlučivost** O_c . Tato veličina se v některých publikacích rovněž označuje jako celková účinnost odlučování. Celková odlučivost je závislá na zrnitosti vstupujícího prachu a na odlučovacích schopnostech odlučovače, proto není vlastností daného odlučovače. [3]



Obr. 8: Hmotnostní toky částic na odlučovači [1]

Pro výpočet celkové odlučivosti lze použít některý ze vztahů mezi jednotlivými hmotnostními toky (viz obr. 8) na vstupu (index p), výstupu (index v) a na záchytu (index z). [1]

$$O_c = \frac{\dot{M}_z}{\dot{M}_p} = \frac{\dot{M}_p - \dot{M}_v}{\dot{M}_p} = 1 - \frac{\dot{M}_v}{\dot{M}_p} \quad (7)$$

Základní vlastností každého odlučovače je závislost frakční odlučivosti na velikosti částice $O_f(a)$. Frakční odlučivost lze vypočítat pomocí vztahu (8) jako poměr frakčních hmotnostních toků v záchytu a na přívodu. [1]

$$O_f = \frac{\dot{M}_z \cdot dZ_z}{\dot{M}_p \cdot dZ_p} = O_c \cdot \frac{dZ_z}{dZ_p} \quad (8)$$

2.1 Odlučovací principy

Odlučovací princip obecně určuje charakter síly, která se podílí na separaci částic. Rozlišují se síly gravitační, setrvačné, odstředivé, elektrické a difúzní. Od těchto sil jsou poté odvozeny jednotlivé názvy odlučovacích principů (gravitační, setrvačný, odstředivý, elektrický a difúzní). Mimo tyto základní principy existují ještě dva speciální případy, intercepční a síťový, u kterých se částice odlučují vlivem své konečné velikosti. [3]

2.1.1 Gravitační princip

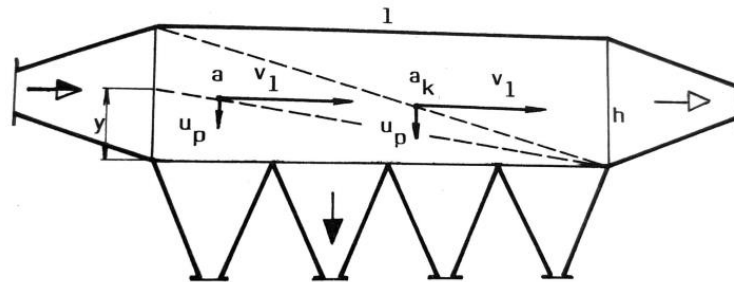
Gravitační princip je považován za nejjednodušší princip odlučování částic. Vychází z působení gravitační síly na částici pohybující se v proudovém poli. Hlavní veličinou u gravitačního principu je **pádová rychlost částice u_p** . Vztah (9) pro výpočet výsledné pádové rychlosti je odvozen z rovnováhy gravitační síly, aerodynamického odporu a vztlakové síly. [1]

$$u_p = \sqrt{\frac{4 \cdot a \cdot (\rho_\xi - \rho) \cdot g}{3 \cdot \xi \cdot \rho}} \quad (9)$$

Kritériem podobnosti při určování frakční odlučivosti je v případě gravitačního principu poměr pádové rychlosti a rychlosti plynu na vstupu.

$$O_f = f\left(\frac{u_p}{v_1}\right) \quad (10)$$

Odlučovače pracující na základě gravitačního principu se nazývají usazovací komory nebo obecně gravitační odlučovače (viz obr. 9).

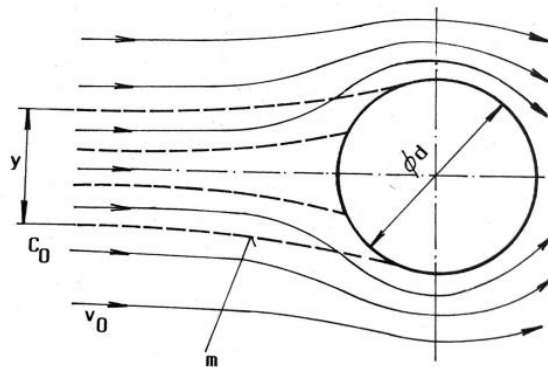


Obr. 9: Schéma usazovací komory [3]

2.1.2 Setrvačný princip

Setrvačný princip je využíván v aplikacích, kde v blízkosti odlučovací plochy dochází k zakřivení rychlostního pole a trajektorie částice se vlivem její setrvačnosti odchyluje od proudnice. [1]

Názorné vysvětlení setrvačného principu odlučování lze provést na případu obtékání válce, který může reprezentovat například vlákno ve filtraci (viz obr. 10). Výsledkem pohybové rovnice v okolí válce je mezní trajektorie částice m , která z proudu plynu vymezuje oblast o šířce y , ze které se všechny částice určité velikosti odloučí. [3]



Obr. 10: Setrvačný princip při obtékání válce [3]

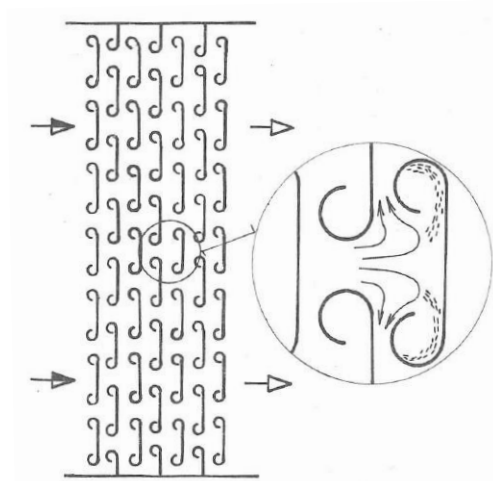
Hlavní bezrozměrná kritéria, která charakterizují setrvačný princip, jsou Stokesovo číslo Stk a Reynoldsovo číslo proudu Re_d . [4]

$$Stk = \frac{\tau_c \cdot v_0}{d} \quad (11)$$

$$Re_d = \frac{v_0 \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad (12)$$

$$O_f = f(Stk, Re_d) \quad (13)$$

Odlučovače, u kterých se využívá setrvačného principu, jsou vybaveny překážkami různých tvarů, které jsou vloženy do proudu plynu. Příkladem je lamelový setrvačný odlučovač, u kterého plyn protéká několika řadami lamel, v jejichž okrajových částech se soustřeďují odloučené částice (viz obr. 11). [3]

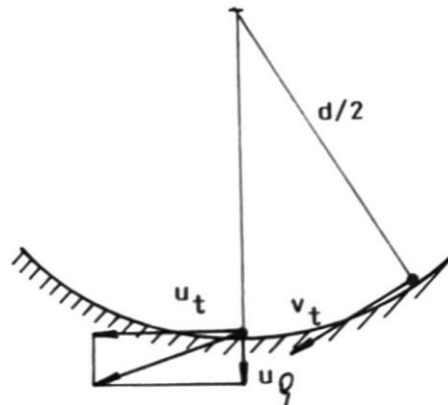


Obr. 11: Lamelový odlučovač [3]

2.1.3 Odstředivý princip

Odstředivý princip je zvláštním případem setrvačného principu. Dochází k němu při rotaci plynu v kuželových a válcových komorách vírových odlučovačů (cyklónů). Pohyb částice směrem k odlučovací ploše je dán působením odstředivé síly. [12]

Na obrázku č. 12 je zobrazena oblast v blízkosti odlučovací plochy s poloměrem $d/2$, kde je částice unášena pouze obvodovou (tangenciální) složkou rychlosti rotujícího plynu v_t . Pro rychlost samotné částice v tangenciálním směru lze poté psát $u_t = v_t$, v radiálním směru (index ρ) se částice pohybuje konečnou odlučovací rychlostí $u_k = u_\rho$. [3]



Obr. 12: Pohyb částice u odstředivého principu v blízkosti stěny [3]

Frakční odlučivost v tomto případě závisí na poměru povrchu komory S vůči jejímu průřezu A , poměru druhých mocnin tangenciální složky rychlosti v_t a střední rychlosti plynu v komoře v_d a na Stokesově kritériu Stk . [4]

$$O_f = f\left(\frac{S}{A}, \frac{v_t^2}{v_d^2}, Stk\right) \quad (14)$$

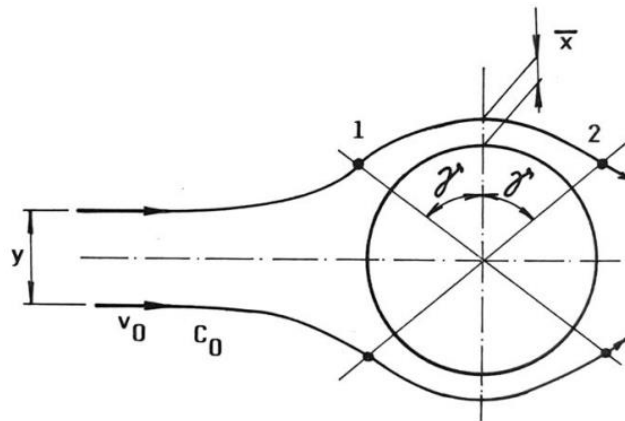
2.1.4 Difúzní princip

Difúzní princip je založen na difúzi částic z proudu plynu při obtékání těles malou rychlostí. Uplatňuje se především u malých částic, jejichž velikost a je menší než $1 \mu\text{m}$. Tento odlučovací princip má velký význam ve filtraci při odlučování částic na povrchu vláken, které tvoří filtrační vrstvu. [12]

Na obrázku č. 13 je zobrazeno filtrační vlákno obtékané proudem plynu a mezní vrstva, jejíž tloušťka \bar{x} určuje oblast, ze které se odloučí částice dané velikosti. Vztah (16) pro tloušťku mezní vrstvy je ovlivněn součinitelem Brownovské difúze D_B a dobou zdržení plynu v okolí vlákna při jeho obtékání t . [3]

$$D_B = k \cdot T \cdot B \quad (15)$$

$$\bar{x} = \sqrt{\frac{4 \cdot D_B \cdot t}{\pi}} \quad (16)$$



Obr. 13: Obtékání vlákna plynem s difúzní mezní vrstvou [3]

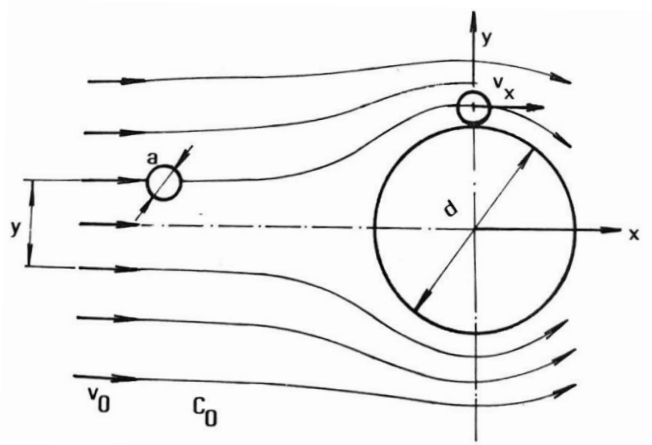
Hlavní kritéria, která charakterizují difúzní princip, jsou Pecletovo číslo Pe , Reynoldsovo číslo proudu Re_d a poréznost vláknité vrstvy ε . [4]

$$Pe = \frac{v_0 \cdot d}{D_B} \quad (17)$$

$$O_f = f(Pe, Re_d, \varepsilon) \quad (18)$$

2.1.5 Intercepční princip

Intercepční princip je založen na odloučení částic v plynu pohybujících se v blízkosti odlučovací plochy vlivem své konečné velikosti (viz obr. 14). Tento odlučovací princip, který se také označuje jako „přímé zachycení částic“, se užívá ve filtraci při průchodu plynu vláknitou či zrnitou vrstvou. [3]



Obr. 14: Obtékání vlákna – intercepční princip [3]

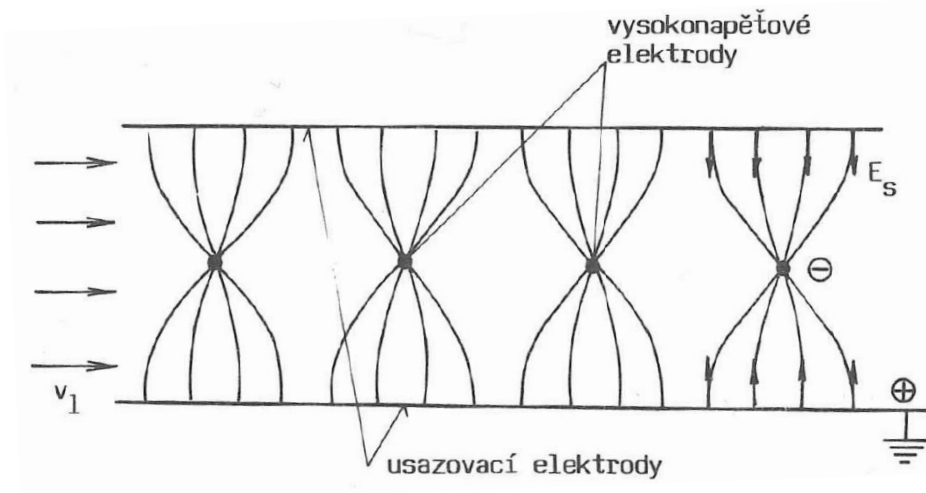
Frakční odlučivost v případě intercepčního principu závisí na parametru intercepce α , Reynoldsově čísle proudu Re_d a poréznosti vrstvy ε . [4]

$$\alpha = \frac{a}{d} \quad (19)$$

$$O_f = f(\alpha, Re_d, \varepsilon) \quad (20)$$

2.1.6 Elektrický princip

Elektrický princip je založen na působení elektrické (Coulombovy) síly na nabitě částice v elektrickém poli. Tato síla způsobuje pohyb nabitých částic směrem k odlučovací plochám. Na obrázku č. 15 je zobrazeno elektrické pole nejběžnějšího typu elektrického odlučovače, kterým je odlučovač komorový. Elektrické odlučovače se nejčastěji využívají při odlučování částic z plynů o velkých objemových průtocích (zejména v energetice). [3]



Obr. 15: Komorový typ elektrického odlučovače [3]

Frakční odlučivost lze v případě elektrického principu určit pomocí Deuschova vztahu (21). Z něj vyplývá, že frakční odlučivost závisí na konečné odlučovací rychlosti u usazovací elektrody u_k a poměru plochy usazovacích elektrod S_e vůči objemovému průtoku plynu \dot{V} . [4]

$$O_f = 1 - \exp\left(-\frac{u_k \cdot S_e}{\dot{V}}\right) \quad (21)$$

$$O_f = f\left(u_k, \frac{S_e}{\dot{V}}\right) \quad (22)$$

2.2 Třídění odlučovačů

Volba odlučovacího zařízení obecně závisí na mnoha parametrech, mezi které patří například velikost částic, tvar a rozdělení částic či hodnota emisního limitu. Ve světě i v České republice se ustálilo rozdělení odlučovačů do čtyř základních skupin (suché

a mokré mechanické odlučovače, elektrické odlučovače a filtry) podle jejich hlavního funkčního principu. [13]

2.2.1 Suché mechanické odlučovače

Suché mechanické odlučovače se řadí mezi nejstarší typy odlučovačů. Princip odlučování je založen na hmotnostní síle (gravitační, setrvačná, odstředivá), která působí na tuhou částici o rozdílné měrné hmotnosti, než má plyn. Mezi hlavní výhody suchých mechanických odlučovačů patří jejich nízká pořizovací cena, nízké provozní náklady, spolehlivost a nenáročnost na obsluhu. Nevýhodou je především nízká odlučivost pro jemné frakce. [13]

Samostatně použité suché mechanické odlučovače v dnešní době většinou nespĺňují požadavky na emisní limity. Z tohoto důvodu se nejčastěji používají jako první stupeň u vícestupňových odlučovacích systémů. Mezi suché mechanické odlučovače patří například usazovací komory (gravitační odlučovače) nebo cyklóny (vírové odlučovače). [3]

2.2.2 Mokr  mechanické odlučovače

Mokr  mechanické odlučovače fungují na principu smáčení částic kapalinou (nejčastěji vodou) pomocí nástřiku kapaliny nebo nárazem částic na hladinu. Pro svou funkci využívají gravitačních a odstředivých sil. V porovnání se suchými odlučovači mají mokré vyšší odlučivost. Mezi další výhody patří například možnost jejich použití i pro abrazivní a lepidlivé prachy či možnost současného odlučování kapalných i plyných znečišťujících látek. Hlavními nevýhodami jsou vysoká spotřeba vody a nutnost kalového hospodářství. [14]

Mezi mokré mechanické odlučovače patří například vírový, mokrý pěnový, hladinový či proudový odlučovač, který se také někdy označuje jako tzv. Venturiho pračka. [14]

2.2.3 Elektrické odlučovače

Elektrické odlučovače (zkráceně EO) využívají elektrického pole, které působí na částice rozptýlené v plynu. Jak již bylo zmíněno v kapitole „2.1.6 Elektrický princip“, v odlučovačích jsou umístěny vysokonapěťové a usazovací elektrody, mezi kterými se vytváří elektrické pole, kde ionty (nabitě částice) narážejí do odlučovaných částic, které nabíjejí. Tyto nabitě částice jsou poté přitahovány k usazovacím elektrodám, čímž dochází k jejich odloučení. Hlavní výhodou EO je vyšší odlučivost i pro jemné submikronové částice. Mezi nevýhody patří například vysoká pořizovací cena či vysoké nároky na půdorysný a obestavěný prostor. [13]

Podle uspořádání elektrod se EO dělí na trubkové a komorové. Dále je lze rozdělit podle směru průtoku plynu na horizontální a vertikální, podle způsobu odvodu částic z usazovacích elektrod na suché a mokré, a podle oddělení ionizační a odlučovací zóny na jednozónové a dvouzónové. [3]

2.2.4 Filtry

Pro splnění přísnějších emisních limitů se v současné době stále častěji přistupuje k použití filtrů, mezi které patří filtrační tkaniny či zrnité a porézní vrstvy. Tento druh odlučovačů je založen na průchodu plynu filtračním materiálem, v němž dochází k zachycení částic. [12]

Rozlišují se dvě základní skupiny filtrů: **průmyslové filtry** a **filtry atmosférického vzduchu**. Hlavní rozdíl mezi oběma skupinami je v tom, že u filtrů atmosférického vzduchu se částice odlučují až ve vláknité vrstvě filtračního materiálu (tzv. hloubková filtrace) a filtrační materiály se s výjimkou hrubých filtrů neregenerují. Naopak u filtrů průmyslových probíhá tzv. povrchová filtrace (částice se zachycují na povrchu filtru), dochází k tvorbě filtračního koláče a filtrační materiál proto musí být regenerován. [12]

3 FILTRACE VZDUCHU

V současné době tráví většina lidí každý den více než 20 hodin svého času ve vnitřních prostorech (práce, domov, škola, atd.). Proto je důležité vytvořit uvnitř nejen tepelnou pohodu, ale také zdravotně nezávadné prostředí z hlediska čistoty ovzduší. Toho se dosáhne právě pomocí filtrace. Jak bylo uvedeno v kapitole „2.2.4 Filtry“, rozlišují se dvě základní skupiny filtrů, a to filtry atmosférického vzduchu a filtry průmyslové.

3.1 Třídění filtrů atmosférického vzduchu

Filtry atmosférického vzduchu jsou aplikovány v pracovních, obytných či čistých prostorech. Dělí se na filtry pro **všeobecné větrání** (prachové) a filtry pro **vysoce účinnou filtraci** (aerosolové), které se využívají v prostorech s přísnějšími požadavky na čistotu ovzduší.

3.1.1 Filtry pro všeobecné větrání

Od prosince roku 2016 je v platnosti norma ČSN EN ISO 16890 (dále jen „nová norma“) pro třídění filtrů pro všeobecné větrání, která nahradila normu ČSN EN 779:2012 (dále jen „stará norma“). **Stará norma** dělila filtry do tří skupin (hrubé, střední a jemné) podle střední účinnosti filtrace E_m pro částice o velikosti 0,4 μm (viz tab. 1). Jednotlivé skupiny lze dále rozdělit na třídy, kde je skupina hrubých filtrů (G) rozdělena podle střední odlučivosti A_m na syntetický prach, skupina středních filtrů (M) podle již zmíněné střední účinnosti filtrace E_m a skupina jemných filtrů (F) podle minimální účinnosti filtrace E_{min} a střední účinnosti filtrace E_m . [15]

Tab. 1: Třídy filtrů dle ČSN EN 779:2012 [15]

Skupina	Třída	Střední odlučivost A_m na syntetický prach [%]	Střední účinnost filtrace E_m pro částice 0,4 μm [%]	Minimální účinnost filtrace ¹⁾ E_{min} pro částice 0,4 μm [%]
Hrubé	G1	$50 \leq A_m < 65$	-	-
	G2	$65 \leq A_m < 80$	-	-
	G3	$80 \leq A_m < 90$	-	-
	G4	$90 \leq A_m$	-	-
Střední	M5	-	$40 \leq E_m \leq 60$	-
	M6	-	$60 \leq E_m \leq 80$	-
Jemné	F7	-	$80 \leq E_m \leq 90$	35
	F8	-	$90 \leq E_m \leq 95$	55
	F9	-	$95 \leq E_m$	70

Poznámka:
¹⁾ Minimální účinnost filtrace je nejnižší hodnota účinnosti filtrace mezi počáteční účinností filtrace, účinností filtrace po vybití filtračního materiálu a nejnižší hodnotou účinnosti filtrace během zátěžového postupu zkoušení filtru.

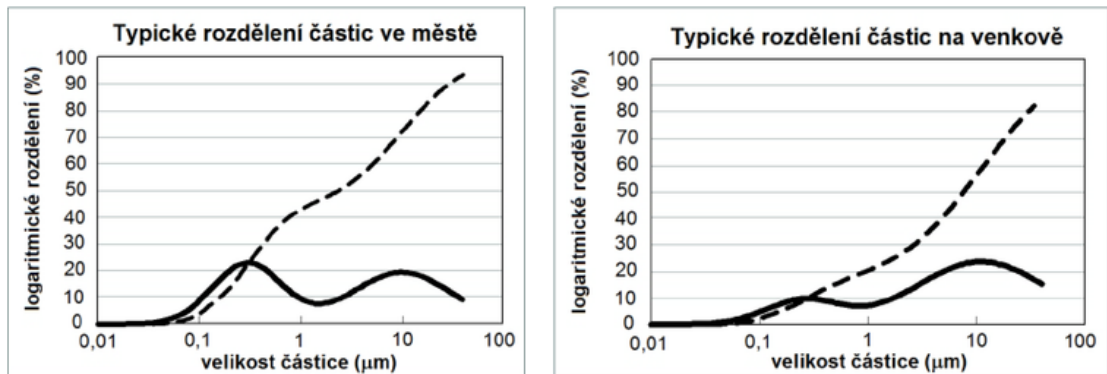
Třídění podle staré normy umožňovalo jednoduché porovnání filtrů, avšak příliš nevyhovovalo o jejich odlučovacích schopnostech a vlivu na čistotu ovzduší. **Nová norma** zavedla nové identifikátory pro třídění filtrů atmosférického vzduchu, kterými jsou frakce atmosférického prachu PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ a PM_1 . [16]

Předpis nové normy pracuje s účinností $e\text{PM}_x$ vyjadřující hmotnostní účinnost odlučování daného filtru. Tato účinnost se určuje pro částice atmosférického prachu v rozsahu opticky stanovené velikosti částic 0,3 až $x \mu\text{m}$ (viz tab. 2). [16]

Tab. 2: Rozsah velikostí částic při stanovení účinnosti odlučování [16]

Účinnost odlučování	Rozsah opticky stanovených velikostí částic [μm]
$e\text{PM}_{10}$	$0,3 \leq x \leq 10$
$e\text{PM}_{2,5}$	$0,3 \leq x \leq 2,5$
$e\text{PM}_1$	$0,3 \leq x \leq 1$

Nová norma také doporučuje zařítovat filtry používané zejména k odlučování částic frakcí $PM_{2,5}$ a PM_1 podle zrnitosti prachu v městských oblastech a filtry určené převážně k odlučování částic frakce PM_{10} podle zrnitosti prachu ve venkovských oblastech. Kvůli tomuto doporučení vycházejí vypočtené hodnoty ePM_1 a $ePM_{2,5}$ z distribuční křivky pro městský aerosol a hodnota ePM_{10} z křivky pro venkovský aerosol. Na obrázku č. 16 jsou zobrazeny křivky četností a propadů v městských (vlevo) a venkovských (vpravo) oblastech. [17]



Obr. 16: Průměrné složení atmosférického prachu v městských a venkovských oblastech [17]

Pro výpočet hodnot ePM_x se používají střední aritmetické hodnoty účinnosti odlučování $E_{A,i}$ zjištěné při zkouškách filtrů ve dvanácti velikostních intervalech v rozsahu velikostí částic 0,3 až 10 μm . Výsledek je doplněn o stanovení minimálních hodnot $ePM_{1, \min}$ a $ePM_{2,5, \min}$. Tyto hodnoty se určí podle odlučovacích schopností elektricky neutrálního filtru, považovaných za minimální odlučivosti $E_{D,i}$ u jednotlivých velikostních frakcí. [17]

Filtry jsou zatříděny do čtyř základních skupin podle splnění požadavků pro hodnoty $ePM_{1, \min}$, $ePM_{2,5, \min}$ a ePM_{10} (viz tab. 3).

Tab. 3: Zatřídění filtrů dle ČSN EN ISO 16890 [16]

Základní třída filtrů	Požadavek na třídu filtrů			Uváděná hodnota u filtrů
	$ePM_{1, \min}$	$ePM_{2,5, \min}$	ePM_{10}	
ISO hrubý	-	-	< 50 %	Počáteční hodnota odlučivosti na syntetický prach
ISO ePM_{10}	-	-	> 50 %	ePM_{10}
ISO $ePM_{2,5}$	-	> 50 %	-	$ePM_{2,5}$
ISO ePM_1	> 50 %	-	-	ePM_1

U každého filtru se kromě základního rozdělení do jednotlivých tříd uvedeného v tabulce č. 3, udává také zjištěná procentuální hodnota ePM_x zaokrouhlená na násobek pěti procent směrem dolů. Jedinou výjimku tvoří třída ISO hrubý, u které se uvádí počáteční hodnota odlučivosti na syntetický prach. V tabulce č. 4 jsou uvedeny jednotlivé třídy a skupiny filtrů dle nové normy. [16]

Tab. 4: Klasifikační tabulka filtrů dle ČSN EN ISO 16890 [16]

ePM ₁ klasifikace	ePM _{2,5} klasifikace	ePM ₁₀ klasifikace	ISO hrubý
ePM ₁ (95)	ePM _{2,5} (95)	ePM ₁₀ (95)	Odlučivost na prach po hodnotách 5 %
ePM ₁ (90)	ePM _{2,5} (90)	ePM ₁₀ (90)	
ePM ₁ (85)	ePM _{2,5} (85)	ePM ₁₀ (85)	
ePM ₁ (80)	ePM _{2,5} (80)	ePM ₁₀ (80)	
ePM ₁ (75)	ePM _{2,5} (75)	ePM ₁₀ (75)	
ePM ₁ (70)	ePM _{2,5} (70)	ePM ₁₀ (70)	
ePM ₁ (65)	ePM _{2,5} (65)	ePM ₁₀ (65)	
ePM ₁ (60)	ePM _{2,5} (60)	ePM ₁₀ (60)	
ePM ₁ (55)	ePM _{2,5} (55)	ePM ₁₀ (55)	
ePM ₁ (50)	ePM _{2,5} (50)	ePM ₁₀ (50)	
Požadavky: > 50 % počát. odluč. > 50 % odluč. po vybití	Požadavky: > 50 % počát. odluč. > 50 % odluč. po vybití	Požadavky: > 50 % počát. odluč. > 50 % odluč. po vybití	Žádné požadavky na vybití náboje

Rozdělení filtrů podle nové normy více vypovídá o odlučovacích schopnostech vybraných filtrů. Souběh staré a nové normy měl skončit v polovině roku 2018 a v Evropě tak měl existovat pouze jeden systém třídění filtrů pro všeobecné větrání, a to ČSN EN ISO 16890. Současný systém třídění filtrů podle staré normy ČSN EN 779:2012 je však dobře zavedený a část výrobců i distributorů jej stále používá.

3.1.2 Filtry pro vysoce účinnou filtraci

Třídění vysoce účinných filtrů popisuje norma EN 1822, která byla v letech 1999 a 2001 převzata Českou republikou v původní anglické verzi a v dubnu roku 2010 zařazena do soustavy ČSN. Ve srovnání s ČSN EN 779:2012 pro oblast všeobecného větrání je tato norma náročnější na přístrojové a experimentální vybavení. Zkoušení a třídění vysoce účinných filtrů vychází ze zjištění odlučivosti pro částice MPPS (Most Penetrating Particle Size), což jsou částice, které nejvíce pronikají filtračním materiálem i vlastním filtrem. [18]

V roce 2010 proběhla novelizace normy ČSN EN 1822, která mimo kategorie **H - HEPA** (High Efficiency Particulate Air Filter - vysoce účinný filtr vzduchových částic) a **U - ULPA** (Ultra Low Penetrating Air Filter - vzduchový filtr s ultra nízkou penetrací) zavedla novou kategorii **E - EPA** (Efficient Particulate Air Filter - účinný filtr vzduchových částic). [12]

V roce 2011 byla publikována norma ISO 29463 „Vysoce účinné filtry a filtrační materiály pro odlučování částic ve vzduchu“, která se stejně jako novela této normy z roku 2017 skládala z pěti dílů. Norma zachovala základní třídy filtrů EPA, HEPA a ULPA, ale rozšířila je dle tabulky č. 5. Jednotlivé třídy jsou u obou norem určeny minimální hodnotou celkové odlučivosti a přípustné místní netěsnosti filtru pro MPPS při jmenovitém průtoku. [18]

Tab. 5: Jednotlivé třídy filtrů dle EN 1822-1:2009 a ISO 29463-1:2017 [18]

Norma	EN 1822-1:2009	ISO 29463-1:2017
Třídy filtrů	E10 až E12	ISO 15 E až ISO 30 E
	H13 až H14	ISO 35 H až ISO 45 H
	U15 až U17	ISO 50 U až ISO 75 U

ISO normy nejsou v Evropě závazné, proto se předpokládala paralelní existence obou systémů třídění filtrů. Kromě rozdílu ve třídění existuje mezi normami také rozdíl v metodách zkoušení propustnosti filtrů (tzv. leakage test). ISO norma uvádí celkem pět metod, zatímco v EN normě existují pouze tři. [18]

V roce 2019 proběhla revize normy EN 1822, zároveň došlo také k podpisu smlouvy mezi Evropským výborem pro normalizaci (CEN) a Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO), v rámci které se obě instituce dohodly na vzniku určitého hybridního stavu, při kterém EN norma zachová svůj původní třídící systém podle základní části číslo jedna (EN 1822-1:2021), ale vlastní zkoušky filtrů budou prováděny podle druhé až páté části normy ISO (ISO 29463-2 až 5:2017). Tento hybridní stav trvá dodnes. [18]

V tabulce č. 6 jsou uvedeny oba paralelně fungující třídící systémy s hraničními minimálními hodnotami pro celkovou odlučivost a minimální odlučivost u zkoušky místní netěsnosti.

Tab. 6: Třídící systémy vysoce účinných filtrů dle EN 1822-1:2021 a ISO 29463:2017 [18]

Třída filtru podle EN 1822-1:2021	Třída filtru podle ISO 29463-1:2017	Celková hodnota		Přípustná místní netěsnost	
		Odlučivost (%)	Průnik (%)	Odlučivost (%)	Průnik (%)
E10		≥ 85	≤ 15	-	-
E11	ISO 15 E	≥ 95	≤ 5	-	-
	ISO 20 E	≥ 99	≤ 1	-	-
E12	ISO 25 E	$\geq 99,5$	$\leq 0,5$	-	-
	ISO 30 E	$\geq 99,9$	$\leq 0,01$	-	-
H13	ISO 35 H	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,75$	$\leq 0,25$
	ISO 40 H	$\geq 99,99$	$\leq 0,01$	$\geq 99,85$	$\leq 0,05$
H14	ISO 45 H	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
	ISO 50 U	$\geq 99,999$	$\leq 0,001$	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$
U15	ISO 55 U	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
	ISO 60 U	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$
U16	ISO 65 U	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
	ISO 70 U	$\geq 99,99999$	$\leq 0,00001$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$
U17	ISO 75 U	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$

Větší potenciál má spíše zařazení filtrů podle normy ISO, které umožňuje přesnější (jemnější) výběr filtrů pro konkrétní aplikace. Zároveň lze předpokládat, že při další revizi normy EN dojde k opravdovému souběhu obou norem v Evropě i ve světě. V budoucnu by tak měl existovat jednotný systém třídění vysoce účinných filtrů.

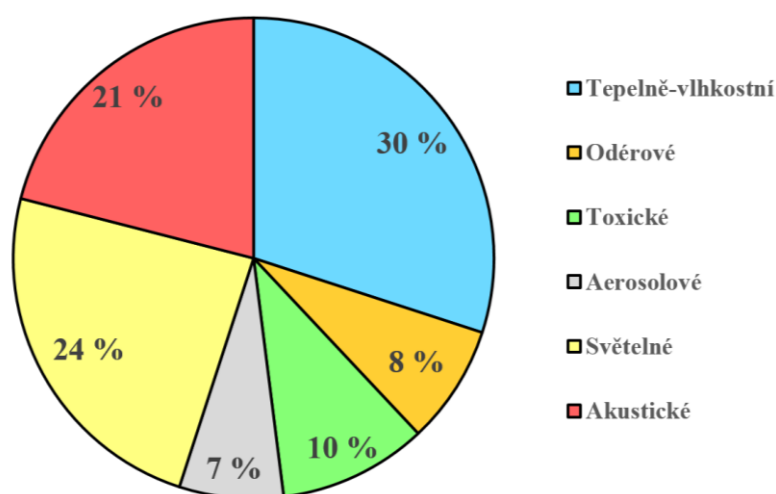
4 STAV VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

Škodliviny se do vnitřních prostorů mohou dostat dvěma základními způsoby, a to z venkovního prostředí či produkcí vnitřních zdrojů (lidé, zvířata, různé textilie, stavební materiály či lepidla).

4.1 Kvalita vnitřního ovzduší

Kvalita vnitřního ovzduší závisí na mnoha faktorech, jako: množství škodlivin ve vzduchu, větrací systém, objem větracího vzduchu a kvalita vnějšího ovzduší. Vnitřní ovzduší je největší mírou ovlivněno ovzduším vnějším, protože vzduch, který je přiváděn do interiéru větráním, pochází právě z prostředí venkovního. Přívod venkovního vzduchu má nejen pozitivní účinek ve formě ředění škodlivin vznikajících v budovách, ale také účinek negativní související s přiváděním škodlivých látek z venkovního prostředí. Tento fakt se projevuje především v městských oblastech, kde je úroveň kvality ovzduší nižší než na venkově. Přívod škodlivých látek z venkovního prostředí může být redukován kvalitní filtrací přiváděného vzduchu. [19]

Každé vnitřní prostředí se skládá z několika složek, které lze popsat pomocí řady fyzikálních veličin. Mezi složky interního mikroklimatu patří tepelně-vlhkostní, odérové, toxické, aerosolové, světelné a akustické mikroklima. Hodnoty průměrných podílů jednotlivých složek interního klimatu uvedených na obrázku č. 17 jsou převzaty z publikace [20].



Obr. 17: Průměrné podíly složek na stavu interního mikroklimatu [20]

Důležité je, aby všechny složky interního mikroklimatu společně vytvářely optimální podmínky pro pobyt a činnost lidí využívající daný prostor. Cílem tedy je dosáhnout pohody prostředí, tj. subjektivního stavu, kdy se člověk v daném prostoru cítí nejlépe. Podle toho, které podmínky jsou optimální, rozlišujeme pohodu celkovou nebo jen tepelnou, akustickou, apod. [22]

4.1.1 Tepelně-vlhkostní mikroklima

Jedná se o složku prostředí tvořenou tepelnými a vlhkostními toky, které společně působí na člověka. Teplota a vlhkost vnitřního vzduchu se navzájem ovlivňují. Tepelně-vlhkostní mikroklima je nejdůležitější složkou ve vnitřním prostředí budov, nejen z hlediska zajištění zdraví a pohody lidí, ale také ve vztahu k životnosti stavebních materiálů. O tepelně-vlhkostní pohodě prostředí rozhodují teplota vzduchu, střední radiální teplota, rychlost proudění vzduchu, vlhkost vzduchu, tepelně izolační vlastnosti oblečení a fyzická aktivita člověka. [19]

4.1.2 Odérové mikroklima

Odérové mikroklima tvoří odéry (odérové látky), tj. plynné složky v ovzduší vnímané lidmi jako nepříjemné (zápachy) či příjemné (vůně) pachy. Odérové látky jsou často produkovány člověkem samotným nebo jeho činností (kouření, příprava jídel), do budovy se však mohou dostat také z prostředí venkovního. [22]

Kriteriální a přesně měřitelnou hodnotou udávající limitní hodnotu koncentrace oxidu uhličitého (CO_2) ve vnitřním prostředí je Pettenkoferovo kritérium, rovné 0,1 % (1000 ppm) CO_2 . Z této hodnoty dále vyplývá doporučená dávka čerstvého vzduchu na osobu $25 \text{ m}^3/\text{h}\cdot\text{os}$. Lze tedy říci, že kvalitu odérového mikroklimatu v budovách ovlivňuje zásadním způsobem pouze dostatečný přívod čerstvého vzduchu. [19]

4.1.3 Toxické mikroklima

Jedná se o složku prostředí tvořenou plynnými toxickými látkami, které mají škodlivé účinky na lidský organismus. Typickými příklady toxických látek jsou oxidy síry (SO_x), oxidy dusíku (NO_x), ozon (O_3), formaldehyd (CH_2O) či oxid uhelnatý (CO), který je

v interiéru budov považován za zdravotně nejzávažnější plyn. Jedním ze zdrojů těchto plynných látek bývá stejně jako v případě oděrů člověk samotný a jeho činnost. Dále se látky mohou uvolňovat ze stavebních materiálů (laky, barviva) nebo při používání spotřebičů (plynový sporák, karma). Do interiéru se mohou rovněž dostat z vnějšího prostředí. [22]

4.1.4 Aerosolové mikroklima

Aerosolové mikroklima je tvořeno z pevných (prach) a kapalných (mlhy) aerosolů rozptýlených v ovzduší. Zdrojem aerosolů v interiéru budov může být systém vytápění, chov domácích zvířat či samotní lidé, kteří produkují tzv. domácí prach ve formě částecek kůže, vlasů, apod. Kromě vnitřních zdrojů jsou aerosoly přiváděny do interiéru, stejně jako v případě toxických a odérových látek, z venkovního prostředí. [19]

4.1.5 Mikrobiální mikroklima

Jedná se o složku prostředí tvořenou mikroby neboli mikroorganismy (též bioaerosoly) nacházejícími se v ovzduší. Mezi tyto mikroorganismy patří kromě různých bakterií, virů, plísní a jejich výtrusů (spor) také látky organického původu jako například pyl. Hodnocení kvality mikrobiálního klimatu se provádí podle únosné koncentrace mikrobů, jejíž hodnota pro obytná prostředí činí maximálně 200 až 500 mikrobů na m³. Mikroorganismy se do interiéru budov nejčastěji dostávají transportem z venkovního prostředí nebo jsou uvnitř produkovány samotnými lidmi. Potřebného mikrobiálního klimatu je v dnešní době dosaženo především kvalitní filtrací přiváděného vzduchu. [19]

4.1.6 PEL a NPK

Limitní hodnoty znečištění vnitřního pracovního ovzduší udávají přípustné expoziční limity (PEL) a nejvyšší přípustné koncentrace (NPK). Hodnoty těchto kritérií jsou dány hygienickým předpisem (Nařízení vlády č. 93/2012 Sb., kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci). V tabulce č. 7 na následující stráně je uveden příklad seznamu chemických látek a prachů, který je k dohledání ve zmíněném hygienickém předpisu. [23]

Přípustný expoziční limit (PEL) je definován jako časově vážený průměr koncentrace plynů, par nebo aerosolů (za celou dobu směny) v pracovním ovzduší, kterému

mohou být zaměstnanci vystaveni při nejvýše osmihodinové směně, aniž by u nich došlo k poškození zdraví, či ke snížení jejich výkonnosti. [24]

Nejvyšší přípustná koncentrace (NPK-P) je definována jako nejvyšší přípustná koncentrace chemické látky ve vnitřním prostředí, které nesmí být zaměstnanec vystaven v žádném časovém úseku pracovní směny. [24]

Tab. 7: Hygienické limity pro vybrané látky dle Nařízení vlády č. 93/2012 Sb. [24]

Chemická látka	PEL [mg/m ³]	NPK-P [mg/m ³]
Aceton	800	1500
Formaldehyd	0,5	1
Oxid uhelnatý	30	150
Oxid uhličitý	9 000	45 000
Rtuť	0,05	0,15

Prach	PEL [mg/m ³]	NPK-P [mg/m ³]
Cement	10	-
Bavlna	2	-

4.1.7 Legislativa v oblasti kvality vnitřního prostředí

V České republice upravují kvalitu vnitřního prostředí v budovách obecně zákony a navazující právní předpisy. Technické normy, se kterými se v praxi pracuje nejvíce, obsahují pouhá doporučení. [25]

- **Zákon č. 283/2021 Sb.**, stavební zákon (od 1. července roku 2023 nahrazuje zákon č. 183/2006 Sb.) [26]
- **Zákon č. 372/2011 Sb.**, zákon o zdravotních službách (nahrazuje zákon č. 20/1966 Sb.) [27]
- **Zákon č. 258/2000 Sb.**, zákon o ochraně veřejného zdraví v platném znění [28]
- **Zákon č. 262/2006 Sb.**, zákoník práce (nahrazuje zákon č. 155/2000 Sb.) [29]

- **Zákon č. 306/2006 Sb.**, zákon, kterým se upravují další požadavky bezpečnosti a ochrany při práci v pracovněprávních vztazích a o zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při činnosti nebo poskytování služeb mimo pracovněprávní vztahy [30]
- **Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.**, o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací
- **Nařízení vlády č. 93/2012 Sb.**, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci
- **Nařízení vlády č. 291/2015 Sb.**, o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- **Vyhláška Ministerstva pro místní rozvoj č. 268/2009 Sb.**, o obecných technických požadavcích na stavby
- **Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 410/2005 Sb.**, o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení pro výchovu a vzdělání dětí a mladistvých
- **Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 6/2003 Sb.**, kterou se stanoví hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí pobytových místností některých staveb
- **Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 137/2004 Sb.**, o hygienických požadavcích na stravovací služby a o zásadách osobní a provozní hygieny při činnostech epidemiologicky závažných
- **Vyhláška Ministerstva zdravotnictví č. 238/2011 Sb.**, kterou se stanoví hygienické požadavky na koupaliště, sauny a hygienické limity písku v pískovištích venkovních hracích ploch

5 ČISTIČKY VZDUCHU

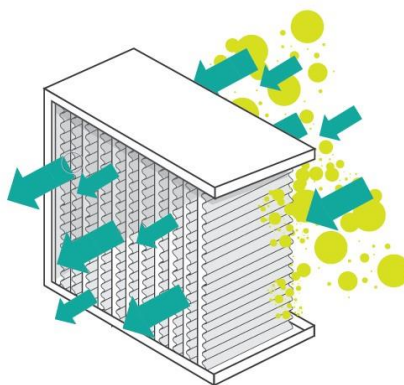
Čistička vzduchu je speciální zařízení sloužící k odstraňování nečistot ze vzduchu ve vnitřních prostorech. Websterův naučný slovník [31] definuje čističku vzduchu jako „zařízení, které odstraňuje kontaminující částice ze vzduchu“. Zmíněnými nečistotami jsou nejčastěji různé bakterie, viry, pyly, aerosoly či tabákový kouř. Čističky vzduchu se vyrábějí buď jako malé samostatné jednotky (pro rodinné domy a byty) nebo jako větší zařízení, které lze připojit přímo ke vzduchotechnickým jednotkám (pro nemocnice, kanceláře, obchody a průmysl).

5.1 Druhy čističek

V současné době se na trhu vyskytuje velké množství různých druhů čističek vzduchu, které bývají často vybaveny i několika filtry. Obecně lze říci, že čím více filtrů daná čistička obsahuje, tím lepší účinnosti odlučování dosahuje.

5.1.1 Čističky vzduchu s HEPA filtrem

Filtr HEPA (High Efficiency Particulate Air Filter - vysoce účinný filtr vzduchových částic) je řazen do skupiny mechanických filtrů. Jeho struktura je tvořena navrstvenými skelnými vlákny o průměrech mezi 0,5 a 2 μm , které tvoří výslednou filtrační vrstvu. Tato vrstva může být v rámečku složená ve tvaru harmonik (viz obr. 18) nebo patron. Účelem těchto tvarů je především vytvoření větší plochy pro zachycení částic, které jí protékají při nižších filtračních rychlostech. [32]



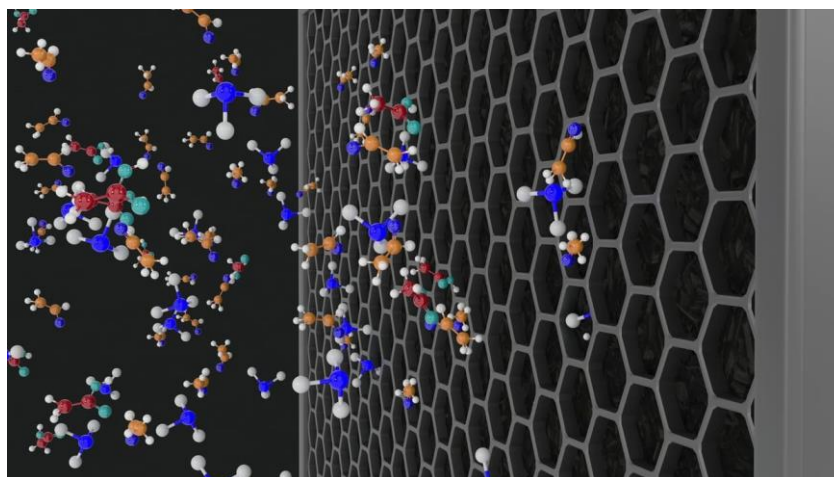
Obr. 18: Vnitřní struktura HEPA filtru [33]

Podmínkou pro klasifikaci filtru jako HEPA je splnění určité úrovně účinnosti. Evropský standard EN 1822 vyžaduje, aby byla hodnota celkové odlučivosti filtru v laboratorních podmínkách alespoň 99,95 % (viz kapitola „3.1.2 Filtry pro vysoce účinnou filtraci“). Podle amerického standardu, který vytvořila Americká společnost strojních inženýrů (ASME) společně s Ministerstvem energetiky Spojených států (U. S. DOE), musí být hodnota odlučivosti filtru minimálně 99,97 %. [34]

Hlavní výhodou HEPA filtru je jeho vysoká účinnost odlučování pro nejjemnější částice. Nevýhodou je vyšší tlaková ztráta vlivem hustoty vláken ve filtrační vrstvě, kterou je nutné překonat. Nejčastěji je za tímto účelem použit výkonnější ventilátor. Kromě čističek vzduchu a vzduchotechnických jednotek se HEPA filtry v dnešní době objevují například ve vysavačích či některých moderních automobilech. [32]

5.1.2 Čističky vzduchu s aktivním uhlím

Filtry s aktivním uhlím (uhlíkové filtry), dříve označované jako HEGA (High Efficiency Gas Adsorber - vysoce účinný adsorbér plynu), byly poprvé použity v plynových maskách na ochranu vojáků během první světové války. Výroba uhlíkových filtrů spočívá v aktivaci uhlíku za vysokých teplot (kolem 900 °C), čímž dochází k vytvoření porézní hmoty s velkou adsorpční schopností (viz obr. 19). [32]



Obr. 19: Detail porézní hmoty v uhlíkovém filtru [35]

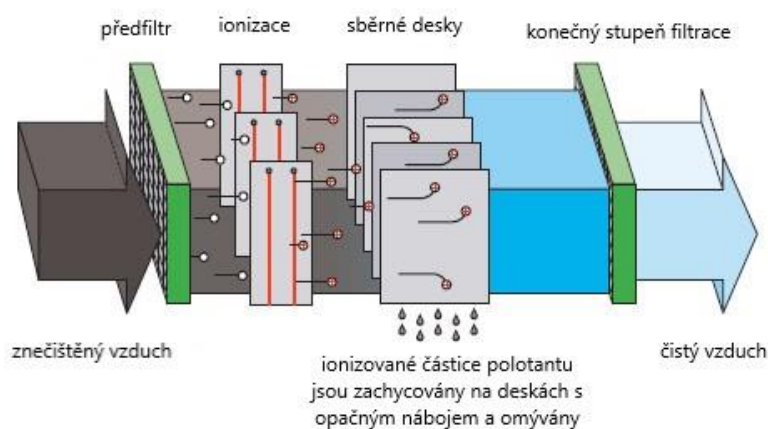
Čističky vzduchu s uhlíkovými filtry pracují nejčastěji v kombinaci s filtry HEPA. Filtry s aktivním uhlím umístěné za HEPA filtry zachytávají plynné znečišťující látky, pronikající skrz mechanické HEPA filtry. Tyto znečišťující látky se nejčastěji vyskytují ve

formě plynných ZL z tabákového kouře, těkavých organických látek (VOC) či různých pachů (například z kuchyně). Mezi VOC patří například formaldehyd, toluen či aceton. Tyto látky se do vnitřního prostředí dostávají uvolňováním ze stavebních materiálů, nábytku, čisticích prostředků či tkanin. [35]

Užití čističek vzduchu s uhlíkovými filtry je zvláště přínosné pro lidi, kteří jsou citliví na chemické látky obsažené v ovzduší, astmatiky, kojence a seniory. Hlavní nevýhodou těchto filtrů je stejně jako v případě HEPA filtrů zvýšení tlakové ztráty a tedy nutnost použití výkonnějších ventilátorů.

5.1.3 Čističky vzduchu s elektrostatickým filtrem

Tento druh čističek nasává pomocí ventilátoru nebo soustavy elektrod (tzv. elektronový vítr) znečištěný vzduch, který často nejprve prochází přes kovový omyvatelný předfiltr, na kterém jsou zachyceny hrubé částice prachu a oleje. Vzduch dále postupuje do samotného elektrostatického filtru, který funguje na principu elektrostatického pole. V první fázi dochází k ionizaci částic většinou kladně nabitými elektrodami. Kladně nabitá částice poté prochází skrz opačně nabitou oblast, kde jsou silně přitahovány sběrnými deskami a ulpívají na jejich povrchu. Princip čističky vzduchu s elektrostatickým filtrem lze názorně vidět na obrázku č. 20. [36]



Obr. 20: Princip funkce čističky vzduchu s elektrostatickým filtrem [37]

Hlavní výhodou čističek vzduchu s elektrostatickým filtrem jsou nízké provozní náklady související s nulovými investicemi na nákup nových filtrů. Zachycené částice lze z povrchu sběrných destiček odstranit prostým omytím. Pro správnou funkci čističek se

doporučuje omývání filtrů každý čtvrtý až pátý týden. Elektrostatický filtr není (stejně jako HEPA filtr) schopen zachytit látky VOC a různé pachy, což patří mezi jednu z jeho hlavních nevýhod. [38]

5.1.4 Čističky vzduchu s ionizátorem

Ionizátor nebo také iontový generátor je zařízení fungující na principu produkce záporných iontů do okolního ovzduší. Nabité částice předávají svůj náboj okolním znečišťujícím látkám a prachovým částicím, které se nejprve vzájemně shlukují a následně usazují na nejbližších plochách v místnosti. Zjednodušeně lze říci, že ionizátory odstraňují znečišťující látky z ovzduší a umísťují je na stěny, koberce a nábytek. [32]

Mezi velkou výhodou čističek vzduchu s ionizátorem patří, stejně jako v případě elektrostatických filtrů, nízké provozní náklady. Jednou z hlavních nevýhod je fakt, že tato zařízení znečišťující látky nijak nezachycují, proto může po určité době dojít k uvolnění některých částic z povrchů okolních předmětů a jejich opětovné cirkulaci. Další nevýhodou je produkce ozonu, který je zdraví škodlivý. [39]

5.1.5 Čističky vzduchu s UV filtrem

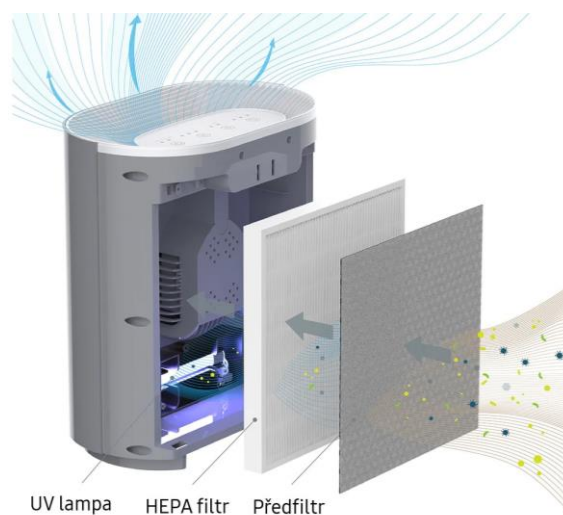
UV záření je vysokoenergetická forma elektromagnetického záření, která je lidským okem neviditelná. Vyskytuje se přirozeně ve slunečním světle a lze ho rozdělit podle vlnové délky na tři základní typy. Záření označované jako UV-A (vlnová délka 400 až 315 nm) tvoří asi 95 % UV záření ve slunečním světle. Zbýlých 5 % je tvořeno zářením UV-B (315 až 280 nm). Posledním typem je záření UV-C (280 až 100 nm), které způsobuje vážné popáleniny a rakovinu kůže, ve slunečním světle se naštěstí nevyskytuje. [32]

Čistička vzduchu užívající technologii UV záření obsahuje tzv. UV lampu, která emituje UV-C záření. Choroboplodné zárodky (bakterie a viry) obsažené ve vzduchu jsou při průchodu čističkou tomuto záření vystaveny. Dochází k poškození jejich DNA, následně ztrátě infekčnosti a konečnému úmrtí. Aby však k poškození mikroorganismů došlo, musí být UV záření vystaveny po delší dobu, nikoli jen zlomek sekundy, kdy vzduch cestuje skrze čističku vzduchu. Firma IQAir vyrábějící čističky vzduchu zveřejňuje na svých webových

stránkách článku [40], ve kterém uvádí, jak dlouho by měl být jeden cm^2 běžných mikroorganismů vystaven UV záření, aby došlo k jeho úplné likvidaci.

- **Virus chřipky** – asi 6,6 sekund
- **Bakterie escherichia coli** (střevní onemocnění) – asi 6,6 sekund
- **Bakterie staphylococcus aureus** (kožní problémy, zápal plic) – asi 6,6 sekund
- **Spory plísní** (aspergillus) – 8,8 až 33 sekund
- **SARS-CoV-2** (COVID-19 coronavirus) – až 60 sekund

Čističky vzduchu s UV technologií se nejčastěji používají v kombinaci s HEPA či uhlíkovými filtry, které jsou umístěny před UV lampou (viz obr. 21). Zmíněné pomocné filtry slouží primárně k zachycení tuhých částic, zároveň však poskytují UV záření dostatečný čas ke zničení zachycených bakterií a virů. [41]



Obr. 21: Složení čističky vzduchu s UV filtrem [42]

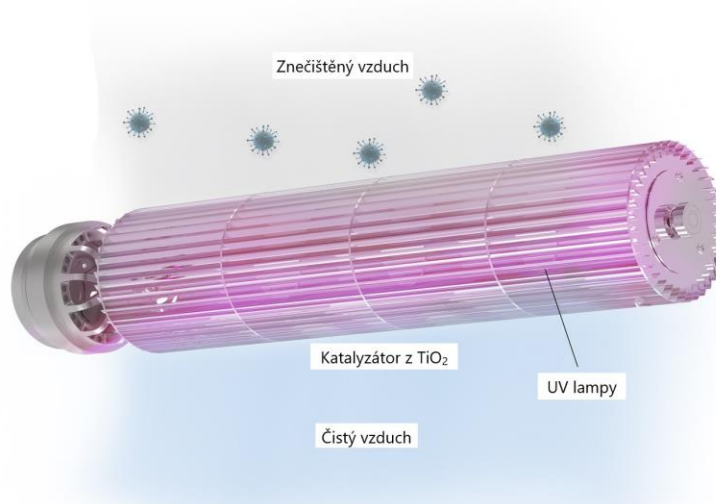
5.1.6 Čističky vzduchu s fotokatalytickým principem

Nejdůležitějším komponentem čističky založené na fotokatalytickém principu je katalyzátor. Jedná se o látku, která jednoduše řečeno zvyšuje pravděpodobnost chemické reakce tím, že sníží energii potřebnou k jejímu nastartování (tzv. aktivační energie). U fotokatalýzy je zmíněnou aktivační energií světlo (z řeckého phōtos - světlo). [43]

Ve fotokatalytických čističkách vzduchu je katalyzátorem nejčastěji oxid titaničitý (TiO_2), který je vystavován ultrafialovému (UV) záření. Celý princip rozkladu znečišťujících látek probíhající v čističce lze popsat v následujících třech krocích [44]:

- 1) UV záření dopadá na katalyzátor, na jehož povrchu se uvolňují záporně nabitě elektrony.
- 2) Uvolněné elektrony reagují s molekulami vody (H_2O) ve vzduchu a rozkládají je na hydroxylové radikály (OH^\bullet), což jsou vysoce reaktivní, nenabitě formy hydroxidových iontů (OH^-).
- 3) Tyto hydroxylové radikály poté napadají větší organické (uhlíkové) molekuly znečišťujících látek, rozbíjí jejich chemické vazby a přeměňují je na nezávadné látky jako oxid uhličitý (CO_2) a vodu (H_2O).

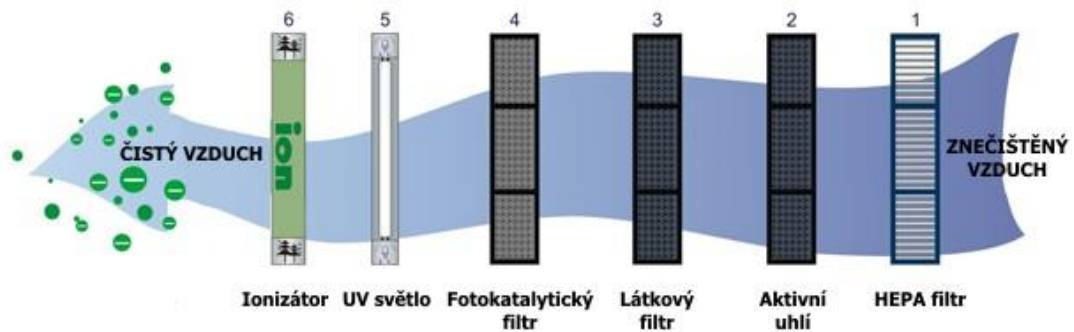
Velkou výhodou čističek vzduchu užívajících fotokatalytický princip oproti čističkám s mechanickými filtry je právě schopnost kvalitnějšího odstraňování škodlivých látek (toxiny, viry a bakterie). Při procesu fotokatalýzy dochází k produkci ozonu, jehož množství je sice pod limitní koncentrací (0,05 ppm O_3), avšak vzhledem k jeho negativním účinkům na lidské zdraví by měl být stále kontrolován. Dalším problémem je omezená životnost katalyzátoru, která výrazně zhoršuje celkové provozní náklady. [44]



Obr. 22: Princip fotokatalytické čističky vzduchu [45]

5.1.7 Vícestupňové čističky vzduchu

Vícestupňové čističky vzduchu se skládají z kombinace filtrů popsaných v předchozích kapitolách. Na obrázku č. 23 je zobrazen proces čištění vzduchu v čističce se šestistupňovým filtračním systémem. Konkrétně se jedná o čističku vzduchu Airbi Fresh. [46]



Obr. 23: Vícestupňového čištění vzduchu [46]

- **Předfiltr** zabráňuje znečišťujícím částicím větších rozměrů (zvířecí srst, vlasy, hmyz, pyly, atd.) ve vstupu do filtračního systému přístroje, čímž chrání další filtry a prodlužuje jejich životnost. Ve většině případů jej není třeba pravidelně měnit, protože je tvořen z omyvatelných nebo čistitelných materiálů.
- **HEPA filtr** zachycuje částice o průměru 0,3 μm s účinností více jak 99,95 %. Těmito částicemi jsou různé zvířecí alergeny, pyly, prach, kouř a spory plísní.
- **Filtr s aktivním uhlím** účinkuje proti různým pachům a plyným znečišťujícím látkám jako je například formaldehyd.
- **Látkový filtr s uhlíkovými vlákny** pomáhá zachytávat další nebezpečné chemické látky jako je například benzen.
- **Fotokatalytický filtr** rozkládá nebezpečné plynné látky.
- **UV světlo** produkuje ultrafialové záření, které ničí mikroorganismy (viry, bakterie) obsažené ve vzduchu.
- **Ionizátor** je zařízení generující velké množství záporně nabitých iontů. Napomáhá k rychlejšímu shlukování a sedimentaci částic, čímž zlepšuje výslednou kvalitu ovzduší.

5.2 Hodnotící standardy pro přenosné čističky vzduchu

Na světovém trhu se v současné době vyskytuje velké množství různých druhů čističek vzduchu. Porovnání jednotlivých produktů bývá pro běžné spotřebitele vzhledem k absenci jednotného systému náročné. Příkladem mohou být stejné typy filtrů, jejichž kvalita je v některých případech značně odlišná. Samotní výrobci nejsou povinni čističky vzduchu testovat. Za účelem jednoduššího porovnání vzniklo po celém světě několik hodnotících standardů.

5.2.1 ANSI/AHAM AC-1 standard (USA)

Hlavními parametry při hodnocení přenosných čističek vzduchu jsou obecně objemový průtok vzduchu procházející zařízením, příkon, účinnost zařízení, hladina akustického tlaku a parametr **CADR** (Clean Air Delivery Rate), který udává, jak rychle a efektivně vyčistí daná čistička vzduch v místnosti. Měří se v metrech krychlových za hodinu (m^3/h) nebo krychlových stopách za minutu (ft^3/min). Obecně platí, že čím vyšší hodnota CADR je, tím rychlejší je čištění vzduchu v místnosti. [47], [48]

Hodnocení podle parametru CADR bylo vyvinuto v 80. letech minulého století americkými organizacemi AHAM (Association of Home Appliances Manufactures - Asociace výrobců domácích spotřebičů) a ANSI (American National Standards Institute - Americký národní normalizační institut). [49]

Měření jednotlivých čističek probíhá v souladu s testem ANSI/AHAM AC-1 ve standardizované zkušební komoře o objemu 1008 ft^3 (asi $28,5 \text{ m}^3$), což odpovídá místnosti s rozměry $12 \times 12 \times 7 \text{ ft}$ (asi $3,65 \times 3,65 \times 2,1 \text{ m}$). Jednotlivé čističky vzduchu se v této komoře postupně testují na odstraňování prachových částic, tabákového kouře a pylů o různých velikostech (viz tab. 8). Výsledkem měření je parametr CADR, který lze definovat pomocí rovnice:

$$CADR = V \cdot (\Lambda_{ON} - \Lambda_{OFF}) \quad (23)$$

kde V je objem komory, Λ_{ON} vyjadřuje celkové množství částic změřené za chodu čističky a Λ_{OFF} je celkové množství částic změřené při vypnuté čističce. [50]

Tab. 8: Testované rozsahy velikostí částic dle normy ANSI/AHAM [49]

Znečišťující látka	Testované rozsahy velikosti částic [μm]
Prachové částice	0,09 až 1
Tabákový kouř	0,5 až 3
Pyl	5 až 11

Čističky vzduchu ověřené testem ANSI/AHAM AC-1 jsou označeny štítkem, který je zobrazen na obrázku č. 24. Mnoho výrobců však tyto testy neprovádí. V jejich katalogovém listu specifikací tak najdeme jiný hodnotící parametr než CADR. Tím většinou bývá maximální průtok vzduchu měřený v kubických stopách za minutu (CFM – Cubic Feet per Minute).



Obr. 24: Standardní štítek CADR [51]

Pro přepočítání mezi parametry CFM a CADR zavedla organizace AHAM jednoduché pravidlo tzv. „dvou třetin“, kdy parametr CADR je roven přibližně 2/3 maximálního průtoku vzduchu (v CFM). Pokud bude například v technickém listu čističky uveden maximální průtok vzduchu 200 CFM (asi 340 m³/h), lze podle zmíněného pravidla odhadnout, že průměrná hodnota parametru CADR bude 2/3 z 200 CFM, tedy přibližně 133 ft³/min (asi 226 m³/h). Toto pravidlo slouží také k rychlému hodnocení filtračních schopností čističky. Pokud je parametr CADR rovný nebo větší, než 2/3 maximálního průtoku vzduchu, je zřejmé, že daná čistička vzduchu má kvalitní filtrační systém, a naopak. [52]

5.2.2 JEM 1467 standard (Japonsko)

Zkušební metoda JEM 1467 byla na konci 20. století vyvinuta japonskou organizací JEMA (Japan Electrical Manufacturers' Association - Asociace japonských výrobců elektrické energie). Testování čističek vzduchu v rámci japonského standardu probíhá v laboratorní komoře o objemu 20 až 30 m³, jejíž vzduch je znečištěn tabákovým kouřem. Koncentrace znečišťujících částic se pohybuje mezi hodnotami 1 až 5 mg/m³. Po zapnutí čističky dochází k měření koncentrace částic (optickou metodou), dokud tato hodnota není rovná jedné třetině počáteční koncentrace. Výsledné množství odloučených částic lze poté spočítat dle následující rovnice:

$$P_{odl} = -\frac{V}{t} \cdot \left(\ln \frac{C_2}{C_{02}} - \ln \frac{C_1}{C_{01}} \right) \quad (24)$$

kde V vyjadřuje objem laboratorní komory, t je čas, C_2 vyjadřuje koncentraci částic v čase t , C_{02} vyjadřuje počáteční koncentraci částic, C_1 je koncentrace částic v čase t bez užití čističky vzduchu v komoře (přirozený pokles) a C_{01} vyjadřuje počáteční koncentraci částic během testu bez čističky vzduchu. [53]

Výsledkem testu je účinnost čističky vzduchu η , kterou lze vypočítat pomocí rovnice (25), kde Q vyjadřuje průtok vzduchu čističkou a P_{odl} již zmíněné množství odloučených částic. [48]

$$\eta = 100 \cdot \frac{P_{odl}}{Q} \quad (25)$$

5.2.3 GB/T18801 standard (Čína)

Čínská národní norma GB/T18801 vešla v platnost v březnu roku 2016. Užívá čtyři ukazatele pro měření dlouhodobého výkonu čističek vzduchu: parametry CADR a CCM (Cumulative Clean Mass), energetickou účinnost odlučování a hladinu akustického tlaku. Parametr **CCM** je nejrelativnější hodnotící veličinou z hlediska dlouhodobého výkonu čističky vzduchu. [54]

CCM lze definovat jako ukazatel celkové hmotnosti znečišťující látky, kterou může čistička vzduchu za jmenovitých podmínek zachytit. Hmotnost polutantů je stanovena, když

hodnota parametru CADR dané čističky klesne na 50 % původní hodnoty. Celý experiment potřebný pro zjištění parametru CCM podle čínské normy GB/T18801-2015 lze popsat v následujících osmi krocích [54], [55]:

- 1) Změření parametru CADR dané čističky pro získání počáteční hodnoty.
- 2) Zapálení cigarety v testovací komoře o objemu 3 m³ a krátké rozfoukání kouře směšovací ventilátorem.
- 3) Vypnutí ventilátoru a změření znečištění ovzduší v komoře.
- 4) Vložení čističky vzduchu do komory a zapnutí na požadovaný režim.
- 5) Zapnutí směšovacího ventilátoru.
- 6) Zapálení 50 cigaret (jednu po druhé) a vyčkání, dokud čistička nedostane koncentraci částic pod hodnotu 0,035 mg/m³.
- 7) Vypnutí čističky vzduchu.
- 8) Opakování stejného postupu pro 100, 150, 200 a více cigaret, dokud parametr CADR nebude menší, než polovina původní hodnoty získaná v prvním kroku.

Hlavním účelem tohoto experimentu je simulovat, jaké množství suspendovaných částic PM, pachů a formaldehydu dokáže čistička vzduchu odloučit, než se její celková účinnost začne snižovat. Konečné hodnocení CCM tedy udává trvalou účinnost čističky při odlučování znečišťujících látek ve vnitřním ovzduší po dlouhém a intenzivním používání. [55]

Tabulka č. 9, převzatá z čínského standardu GB/T18801, uvádí rozdělení čističek vzduchu do jednotlivých kategorií podle hmotnosti odloučené znečišťující látky (CCM), kterou mohou být suspendované částice PM (kategorie P1 až P4) nebo formaldehyd (kategorie F1 až F4). Zjednodušeně lze říci, že čím vyšší je hodnota P a F, tím vyšší je dlouhodobý výkon dané čističky, přičemž nemůže být vyšší, než hodnoty P4 a F4. [56]

Tab. 9: Kategorie čističek vzduchu podle CCM pro částice PM a formaldehyd [56]

Kategorie	Hmotnost odloučených částic PM [mg]	Kategorie	Hmotnost odloučeného formaldehydu [mg]
P1	3 000 až 5 000	F1	300 až 600
P2	5 000 až 8 000	F2	600 až 1 000
P3	8 000 až 12 000	F3	1 000 až 1 500
P4	> 12 000	F4	> 1 500

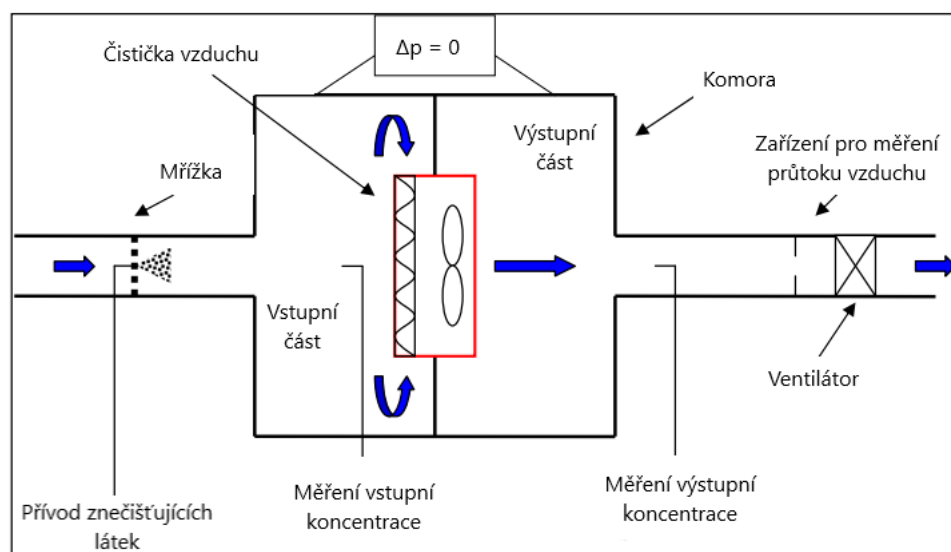
5.2.4 XP B44-200 standard (Francie)

Standard XP B44-200 byl zveřejněn v květnu roku 2011 francouzskou organizací AFNOR (Association Française de Normalisation - Francouzská asociace pro normalizaci). Hlavními cíli tohoto standardu jsou [53]:

- Přezkoumat čističky vzduchu dostupné na trhu.
- Přezkoumat stávající standardizované a nestandardizované metody.
- Navrhnout zkušební metodu pro stanovení účinnosti čističek vzduchu (v laboratorní komoře).
- Ověřit navrhovanou zkušební metodu a zahájit standardizaci ve Francii.

Vzhledem k rozsahu diplomové práce bude z hlavních cílů francouzského standardu podrobně probrán pouze třetí bod (zkušební metoda pro stanovení účinnosti).

Experimentální trať je dle francouzského standardu sestavená tak, aby umožnila měření účinnosti a průtoku vzduchu testovanou čističkou (viz obr. 25). Hlavním komponentem trati je komora (1,5 m × 1,5 m × 1,5 m) rozdělená do dvou částí, vstupní a výstupní. Do vstupní části je přiváděn znečištěný vzduch o konstantní teplotě (22 °C ± 2 °C) a relativní vlhkosti (50 % ± 5 %). Výstupní část slouží k měření průtoku vzduchu odsávaného ventilátorem mimo komoru. Obě tyto části jsou odděleny stěnou. Testovaná čistička vzduchu je umístěna uvnitř komory tak, že její vstup směřuje do vstupní části komory a výstup do části výstupní. Ventilátor kromě odsávání vyčištěného vzduchu slouží rovněž k zachování nulového rozdílu tlaků ($\Delta p = 0$) v obou částech komory. [48]



Obr. 25: Schéma experimentální trati podle XP B44-200 [48]

Účinnost čističky vzduchu je měřena pro jednotlivé znečišťující látky, které jsou do vstupní části přiváděny postupně, aby byla zachována přibližně konstantní koncentrace. Mezi znečišťující látky, na které je čistička vzduchu v rámci francouzského standardu testována, patří [57]:

- **Zkušební aerosoly** – DEHS (diethylhexyl sebacate)
- **Plyny** – těkavé organické látky VOC (směs acetonu, acetaldehydu, heptanu a toluenu)
- **Alergeny** – kočičí alergen (Felis domesticus)
- **Mikroorganismy** – bakterie (Staphylococcus epidermidis) a plísně (Aspergillus niger - černá plíseň)

Výpočet účinnosti měřené čističky vzduchu η je pro jednotlivé znečišťující látky stanoven pomocí rovnice:

$$\eta = 100 \cdot \frac{(C_{vstup} - C_{výstup})}{C_{vstup}} \quad (26)$$

kde C_{vstup} je koncentrace znečišťující látky měřená na vstupu do čističky vzduchu a $C_{výstup}$ je koncentrace znečišťující látky měřená na výstupu.

Parametr CADR lze pro danou znečišťující látku vypočítat jednoduchým součinem účinnosti čističky vzduchu η a průtoku vzduchu čističkou Q .

$$CADR = \eta \cdot Q \quad (27)$$

5.3 Hodnocení přenosných čističek vzduchu

Hodnocením přenosných čističek vzduchu se v průběhu několika let zabývalo mnoho výzkumníků, kteří své studie sepsali do článků a publikovali je v odborných časopisech. V této kapitole budou postupně shrnuty výsledky z některých publikací.

Odborný článek [58] vydaný organizací IOP (Institute of Physics) Publishing uvádí srovnání šesti domácích čističek vzduchu z hlediska parametru CADR a účinnosti odlučování těkavých organických látek (VOC). Testované čističky byly určeny pro použití ve středně velkých místnostech s objemem kolem 20 m³.

V tabulce č. 10 je uvedeno rozdělení jednotlivých čističek vzduchu. Skupinu A tvoří čističky užívající HEPA filtr a adsorpční technologii (filtr s aktivním uhlím) pro odstraňování znečišťujících částic a plynů. Čističky tvořící skupinu B užívají k odstraňování znečišťujících částic elektrostatický filtr (B1) a vláknitý filtr (B2). Pro odstraňování znečišťujících plynů využívají adsorbent společně s plasma-katalytickým filtrem (B1) a foto-elektrochemickou oxidaci (B2). [58]

Tab. 10: Hlavní vlastnosti testovaných čističek vzduchu [58]

Označení	Způsob odstraňování tuhých částic	Způsob odstraňování plynů
A1	HEPA filtr	Adsorbent + malý fotokatalytický filtr
A2	HEPA filtr	Adsorbent
A3	HEPA filtr	Adsorbent
A4	HEPA filtr	Adsorbent (včetně specifického materiálu pro formaldehyd)
B1	Elektrostatický filtr	Adsorbent + plasma-katalytický filtr
B2	Vláknitý filtr	Foto-elektrochemická oxidace

V tabulce č. 11 jsou uvedeny výsledky experimentu, ze kterých lze odvodit některé závěry. Zjištěné hodnoty parametru CADR (90 až 330 m³/h) odpovídají dle amerického standardu ANSI/AHAM AC-1 místnostem o ploše 8 až 25 m². Zmíněné hodnoty CADR jsou naprosto běžné pro čističky vzduchu do středně velkých místností. Nejlépe vyšla čistička B1 užívající elektrostatický filtr (CADR 330 m³/h), nejhůře pak čistička B2 obsahující vláknitý filtr (CADR 90 m³/h). [58]

Hodnoty účinnosti odlučování VOC vycházejí pro jednotlivé čističky vzduchu horší, než parametry CADR. Nejmenší účinnosti vykazovaly čističky při odlučování acetaldehydu, kdy hodnoty nepřesáhly více jak 10 %. Nejlépe pak vyšly hodnoty účinností pro toluen (až 100 %). Nejúčinnějším filtračním materiálem pro odstraňování plyných znečišťujících látek byl dle experimentu prostý adsorbent (aktivní uhlí), který využívaly čističky A2 a A3. Nejhůře vyšla z testu čistička B2 užívající systém foto-elektrochemické oxidace. [58]

Tab. 11: Výsledky experimentu pro jednotlivé čističky vzduchu [58]

Čistička vzduchu	CADR [m ³ /h]	Účinnost odlučování VOC (tříhodinové průměry)		
		Acetaldehyd	Aceton	Toluen
A1	230 ± 30	0 %	10 %	10 %
A2	120 ± 30	0 %	70 %	100 %
A3	300 ± 30	10 %	40 %	90 %
A4	300 ± 30	0 %	< 5 %	< 20 %
B1	330 ± 30	< 5 %	< 5 %	10 %
B2	90 ± 30	0 %	0 %	< 5 %

Poznámka:
Hodnoty označené jako „< 5 %“ znamenají, že byl zaznamenán nějaký účinek čističky vzduchu, ale nemohl být s jistotou kvantifikován.
V případě toluenu u čističky A4 bylo možné naměřit pouze horní mez účinnosti.

Odborný článek [59] z časopisu Journal of Allergy and Clinical Immunology se věnuje čističkám z hlediska zlepšení kvality ovzduší pro děti trpící astmatem, které jsou citlivé na zvířecí (psí a kočičí) alergeny. V experimentu byly použity dvě „aktivní čističky“ od firmy Philips (typ HR 4330 a HR 4320). Účinek čističek byl sledován v ložnicích a obývacích pokojích po dobu tří měsíců. Pro porovnání byly použity také „falešné čističky“, které obsahovaly pouze ventilátor a na rozdíl od „aktivních čističek“ neobsahovaly jakýkoliv filtrační systém.

Z výsledků experimentálního měření uvedených v tabulce č. 12 vyplývá v celku očekávaný výsledek. Při aplikaci čističek vzduchu dochází k zachycení několikanásobně většího množství zvířecích alergenů, než při použití „falešných čističek“ bez filtračního systému. V obývacích pokojích bylo obecně zachyceno více alergenů z důvodu delšího pobytu domácích zvířat. [59]

Tab. 12: Výsledky experimentálního měření [59]

Specifikace měření	Hmotnost zachycených zvířecích alergenů [μg]	
	Aktivní čističky	Falešné čističky
Obývací pokoj s kočkou	32,7	0,97
Obývací pokoj bez kočky	1,01	0,31
Ložnice s kočkou	5,9	0,51
Ložnice bez kočky	0,8	0,16
Obývací pokoj se psem	98,4	0,98
Obývací pokoj bez psa	0,45	0,05
Ložnice se psem	12,2	0,29
Ložnice bez psa	0,06	0,01

Časopis Indoor Air vydal v roce 1994 článek [60] zabývající se hodnocením komerčních přenosných čističek vzduchu. Při experimentu bylo použito dvanáct základních typů čističek (viz tab. 13), a to šest modelů užívajících HEPA či elektrostatický filtr, tři modely s tzv. „elektretovým filtrem“ (filtr s elektrostaticky nabitým filtračním materiálem) a tři modely s ionizátorem.

Tab. 13: Hlavní vlastnosti testovaných čističek vzduchu [60]

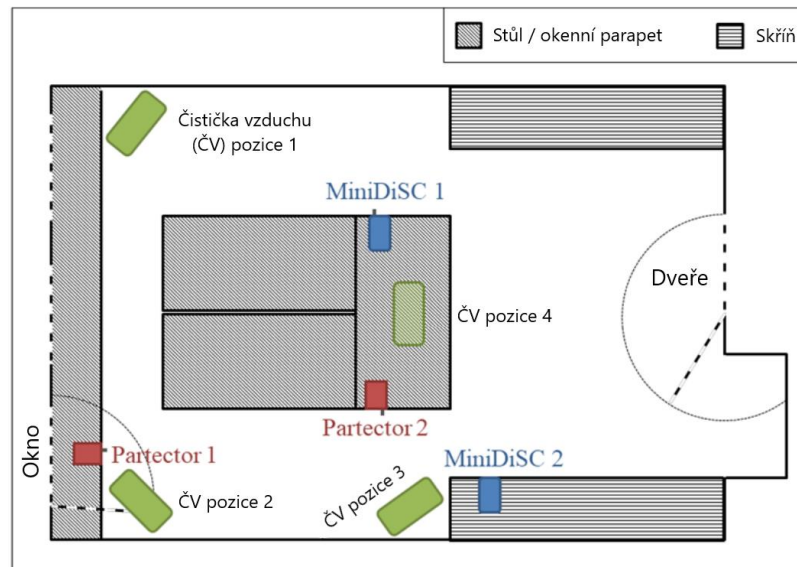
Označení	Maximální průtok vzduchu [m ³ /min]	Vlastnosti filtračního systému
HEPA1	8,2	Polyesterový předfiltr, HEPA filtr, jemný (114 g) uhlíkový filtr
HEPA2	5,1	Předfiltr, HEPA filtr, vrstva (5,9 kg) granulovaného uhlíku
HEPA3	5,7	Předfiltr ze skelných vláken, HEPA filtr, filtr (284 g) s granulovaným uhlíkem
EP1	9,9	Polypropylenový předfiltr, elektrostatický filtr, impregnovaný (56 g) uhlíkový filtr
EP2	9,1	Předfiltr, elektrostatický filtr, filtr (142 g) s granulovaným uhlíkem
EP3	9,3	Předfiltr, elektrostatický filtr, filtr (56 g) s granulovaným uhlíkem
OZ1	6,4	Předfiltr, filtr (0,45 kg) s granulovaným uhlíkem, ionizátor
OZ2	2,1	Předfiltr, ionizátor
EF1/ION1	7,5	Předfiltr, elektretový filtr, impregnovaný (170 g) uhlíkový filtr, ionizátor
ION2	0	Ionizátor
EF2	8,5	Předfiltr, polyesterový filtr, filtr z borosilikátových vláken, polypropylenový filtr
EF3	9,6	Elektretový filtr

Na základě výsledků měření uvedených v tabulce č. 14 lze konstatovat, že čističky vzduchu s elektrostatickými filtry a HEPA filtry vykazují nejlepší účinnost při odstraňování prachu, pylu a spor plísní. Hned za těmito dvěma typy se pohybují čističky vzduchu užívající elektretové filtry a nejhůře na tom jsou čističky s ionizátory. Obecně lze také říci, že čističky vzduchu byly účinnější při odstraňování pevných částic (prach, pyl, atd.), než při odstraňování plyných znečišťujících látek (formaldehyd a oxid dusičitý). [60]

Tab. 14: Výsledky experimentálního měření [60]

Označení	Prach		Pyl		Tabákový kouř		Spory plísní		Formaldehyd		Oxid dusičitý	
	CADR [m ³ /min]	η [%]	CADR [m ³ /min]	η [%]	CADR [m ³ /min]	η [%]	CADR [m ³ /min]	η [%]	CADR [m ³ /min]	η [%]	CADR [m ³ /min]	η [%]
HEPA1	6,57	80	7,08	86	0,17	2	6,88	84	-	-	0,79	10
HEPA2	3,99	78	3,96	78	0,42	8	3,82	75	1,53	30	2,49	49
HEPA3	4,3	76	4,08	72	-	-	4,05	72	-	-	0,51	9
EP1	9,14	92	9,4	95	0,28	3	9,37	95	-	-	-	-
EP2	7,73	85	7,5	83	0,28	3	6,71	74	0,031	0,3	0,17	1,9
EP3	5,63	60	3,65	39	-	-	5,35	57	0,048	0,5	0,057	0,6
OZ1	1,87	29	3,14	49	0,62	10	2,66	42	-	-	0,42	7
OZ2	-	-	-	-	0,18	8	-	-	-	-	0,17	8
EF1/ION1	4,08	63	4,73	73	0,17	3	5,29	81	-	-	0,85	13
ION2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EF2	5,35	63	7,75	91	0,25	4	5,72	67	1,56	24	2,72	43
EF3	2,58	52	4,7	49	-	-	5,46	57	-	-	-	-

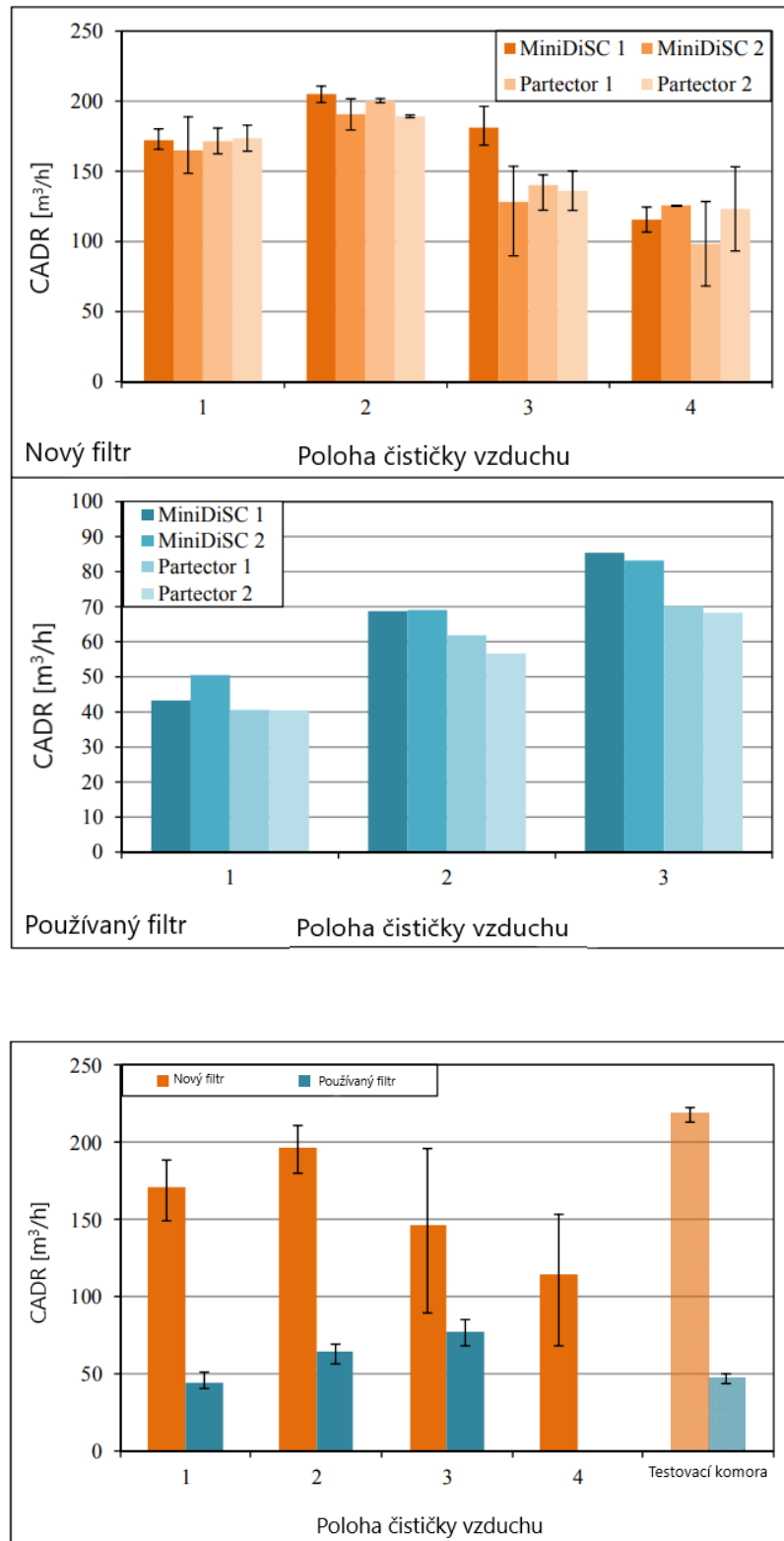
Německá studie [61] se zaměřila na užití přenosných čističek vzduchu v reálném kancelářském prostředí. Čistička vzduchu Philips AC4076 obsahující vysoce účinný vláknitý elektretový filtr byla testována na parametr CADR pro čtyři různé polohy v kanceláři (viz obr. 26). K měření částic byla užitá dvojice přístrojů, a to tzv. MiniDiSC (měření koncentrace a průměru nanočástic) a Partector od firmy Naneos (měření LDSA - Lung Deposited Surface Area, koncentrace a průměru nanočástic).



Obr. 26: Schéma kanceláře [61]

Měření probíhalo za běžného chodu kanceláře, která neobsahovala systém nuceného větrání, ani žádný jiný strojní systém přívodu čerstvého vzduchu. Všechna okna byla během měření zavřená. Experiment se kromě porovnání parametrů CADR pro různé polohy čističky zaměřuje také na rozdíl mezi novým a používaným (starším) filtrem. [61]

Výsledky německé studie jsou zobrazeny na obrázku č. 27. Nejnižší hodnoty parametru CADR (cca 114 m³/h) byly zjištěny při umístění čističky vzduchu pod stolem (pozice 4). Stůl působí jako překážka, která brání čističce vzduchu v nasávání a distribuci vzduchu v místnosti. Parametr CADR vyšel nejlépe pro umístění čističky pod oknem (poloha 2), kdy se jeho hodnota pohybovala kolem 195 m³/h, což je asi o 60 % více, než v případě pozice 4. Při testu s používaným (starým) filtrem v poloze 2 vyšla hodnota parametru CADR až o třetinu menší, než při použití nového filtru. [61]



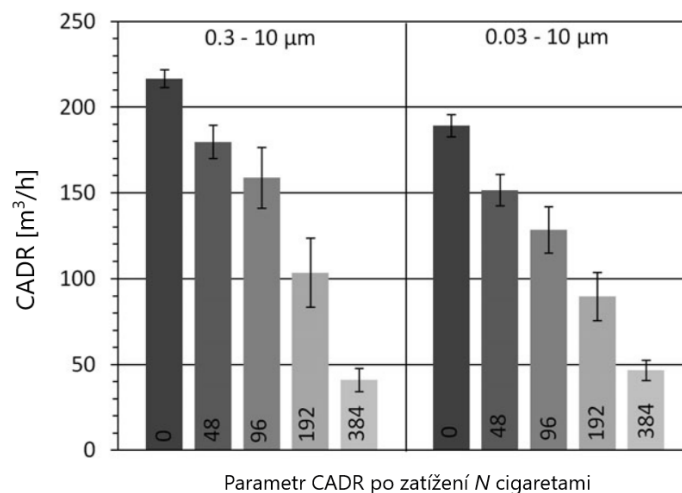
Obr. 27: Výsledky experimentálního měření [61]

Článek [62] publikovaný v časopise Chemical Engineering and Technology se zaměřuje na dlouhodobé vlastnosti čističky vzduchu (konkrétně parametru CADR), především z hlediska postupného stárnutí filtračního materiálu. Testovaná čistička vzduchu

byla vybavena vláknitým elektretovým filtrem. Celkem byly použity tři filtry stejného typu, jejichž výsledné hodnoty se na závěr zprůměrovaly. Měření probíhalo v laboratorní komoře o objemu 25 m³. Pro zatížení filtrů byly použity cigarety, jejichž zapalování probíhalo vždy v krocích po dvanácti. Pro každý filtr bylo použito celkem 384 cigaret.

Výsledkem experimentu je soubor grafů (viz obr. 28). Pro větší částice (0,3 až 10 μm) byla na počátku měření stanovena hodnota parametru CADR 217 m³/h, která se postupným zatěžováním (384 cigaret) filtru dostala až na hodnotu 41 m³/h. Obvyklým kritériem pro výměnu filtrů je moment, kdy parametr CADR klesne na polovinu své původní hodnoty. Tento okamžik nastal trochu překvapivě již po 192 cigaretách. [62]

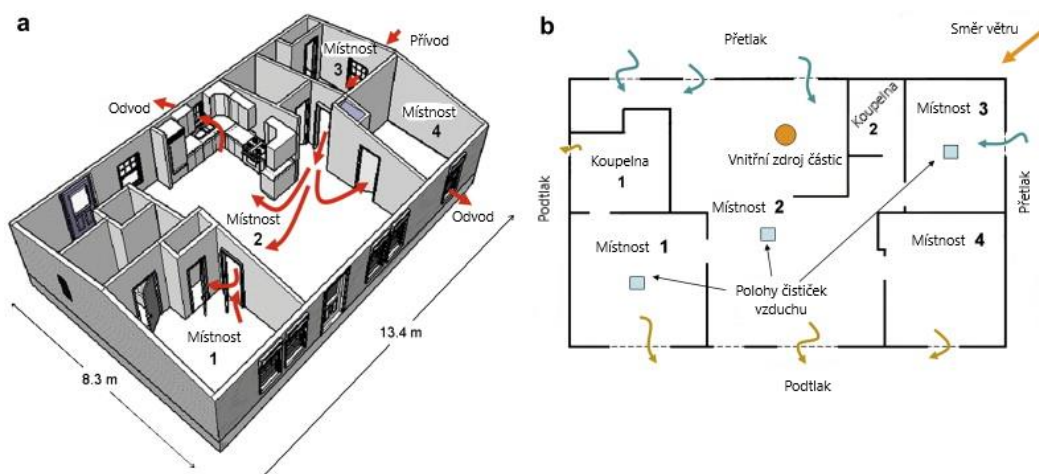
Graf v pravé části obrázku č. 28 bere v úvahu menší částice s velikostí od 0,03 do 10 μm. Na počátku je hodnota parametru CADR 180 m³/h, což je asi o 17 % méně, než hodnota pro částice větší (graf vlevo). Celkový průběh je obdobný, jako v případě s částicemi většími než 0,3 μm. [62]



Obr. 28: Výsledky experimentálního měření [62]

Odborný článek [63] z časopisu Building and Environment se zabývá posouzením rychlosti čištění vnitřního ovzduší pro různé polohy čističek. Pro experiment byly zvoleny dvě čističky vzduchu se značně odlišnými hodnotami CADR. Čistička vzduchu ACa obsahuje iontový generátor s vysokou účinností pro všechny velikosti částic, jeho nevýhodou je však nízký průtok a parametr CADR o hodnotě 50 m³/h. Čistička ACb obsahuje HEPA filtr s obdobně vysokou účinností, ale s mnohem vyšším průtokem a parametrem CADR o hodnotě 500 m³/h.

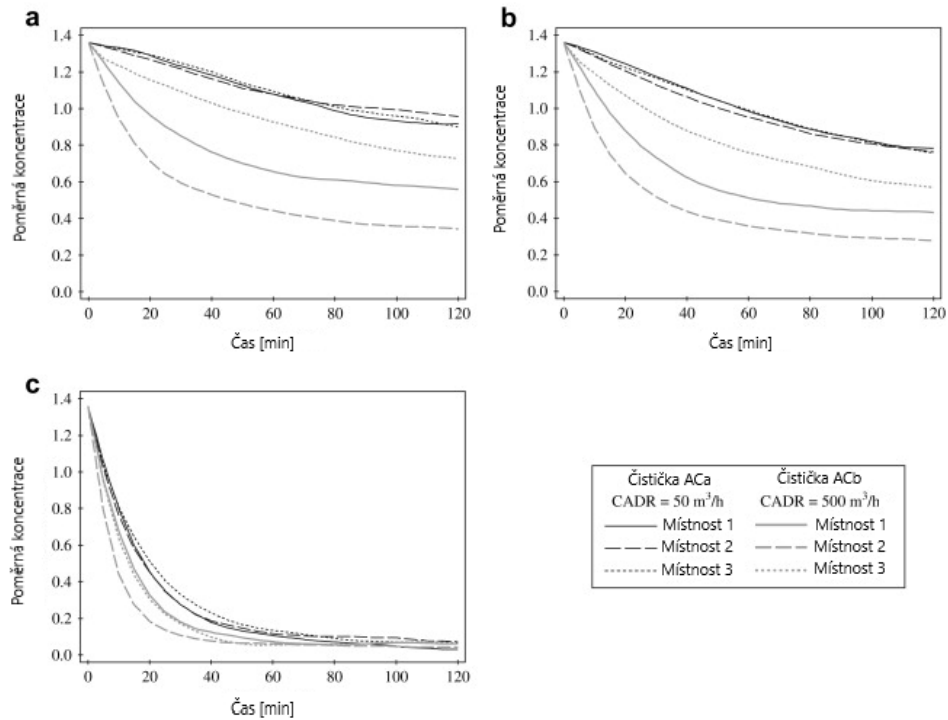
Provoz těchto dvou čističek byl v budově sledován ve třech různých místnostech (viz obr. 29). Při měření byly kvůli rozdílným vlastnostem uvažovány tři velikosti částic (0,74 μm , 3,2 μm a 10 μm). Celkem bylo tedy provedeno 21 měření pro dvě čističky vzduchu, tři pozice v místnosti, tři velikosti částic, plus tři základní měření bez čističky vzduchu. [63]



Obr. 29: Schéma experimentální budovy [63]

Výsledky experimentu, které jsou k vidění na obrázku č. 30, zobrazují průběhy koncentrací v čase (a – částice 0,74 μm , b – částice 3,2 μm , c – částice 10 μm). U čističky vzduchu ACa je parametr CADR příliš nízký (50 m^3/h) a její pozice tedy nehraje skoro žádnou roli při odlučování pro všechny měřené velikosti částic. Tento fakt lze názorně vidět na zobrazených grafech, kdy jsou mezi křivkami průběhu koncentrace pro čističku ACa v různých místnostech jen nepatrné rozdíly. [63]

Čistička ACb vykazuje díky vyšší hodnotě parametru CADR (500 m^3/h) velké rozdíly v rychlosti čištění ovzduší při umístění v různých místnostech. Výrazné rozdíly jsou vidět především u menších částic 0,74 a 3,2 μm . Pro částice o velikosti 10 μm (graf c) jsou malé rozdíly mezi křivkami průběhu koncentrace způsobeny především rychlejší depozicí částic. Z grafů zobrazených na obrázku č. 30 lze rovněž konstatovat, že rychlost snižování koncentrace znečišťujících látek čističkou ACb se zvyšuje s rostoucí plochou místnosti. [63]



Obr. 30: Výsledky experimentálního měření [63]

Odborný článek [64] vytvořený na Texaské univerzitě, vydaný v časopise *Atmospheric Environment* se zabývá experimentálním měřením parametru CADR pro pět vybraných čističek vzduchu: čistička vzduchu s elektrostatickým filtrem (ESP), dvě čističky s HEPA filtrem (HEPA1, HEPA2) a dvě čističky s ionizátorem (IG1, IG2). Kromě parametru CADR uvádí článek také účinnosti jednotlivých čističek vzduchu pro menší místnost (50 m^3) a obytný dům (392 m^3).

Princip měření parametru CADR spočíval v zapálení tří vonných tyčinek po dobu 15 minut. Během měření byly čističky vzduchu nastaveny vždy na maximální výkon. Koncentrace částic byla zaznamenávána pomocí přístroje TSI 3936 v rozsahu velikostí od 12,6 do 514 nm. Objemový průtok byl měřen pomocí přístroje Dust Bluster. [64]

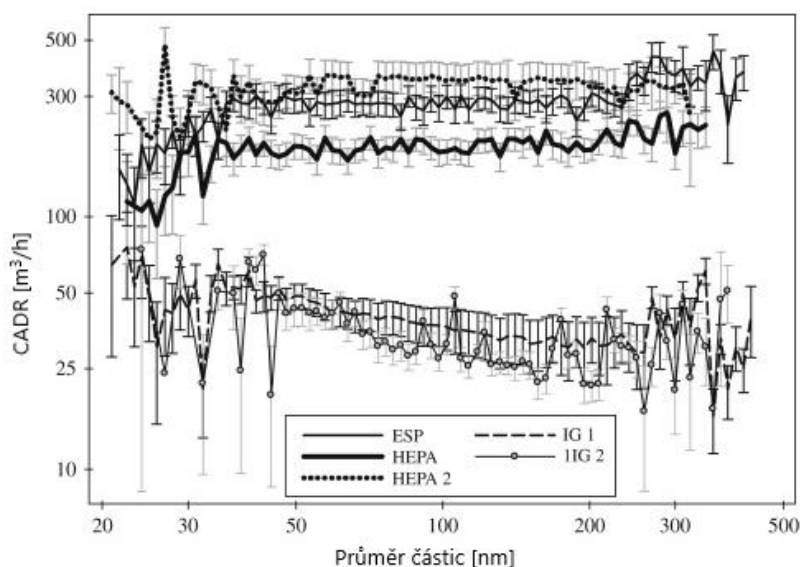
V tabulce č. 15 jsou uvedeny vlastnosti testovaných čističek, včetně experimentálně stanovených průtoků vzduchu a parametrů CADR. Největší naměřený průtok byl zaznamenán u čističek vzduchu ESP ($850 \text{ m}^3/\text{h}$) a HEPA2 ($571 \text{ m}^3/\text{h}$). Naopak nejnižší průtok vzduchu byl naměřen u čističky IG1 ($51 \text{ m}^3/\text{h}$). Čističky vzduchu ESP, HEPA1 a HEPA2 užívají ventilátor a proto jsou hodnoty jejich průtoků řádově vyšší, než u čističky IG1. K obdobným výsledkům se dospělo i při měření parametru CADR, ze kterého nejlépe vyšla čistička HEPA2 s hodnotou CADR $324 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tab. 15: Hlavní vlastnosti testovaných čističek vzduchu [64]

Označení	El. výkon [W]	Průtok vzduchu [m ³ /h]	Střední hodnota CADR [m ³ /h]
ESP	102,2	850	284
HEPA1	205,6	309	188
HEPA2	102,6	571	324
IG1	8,4	51	41
IG2	4,9	< 30	35

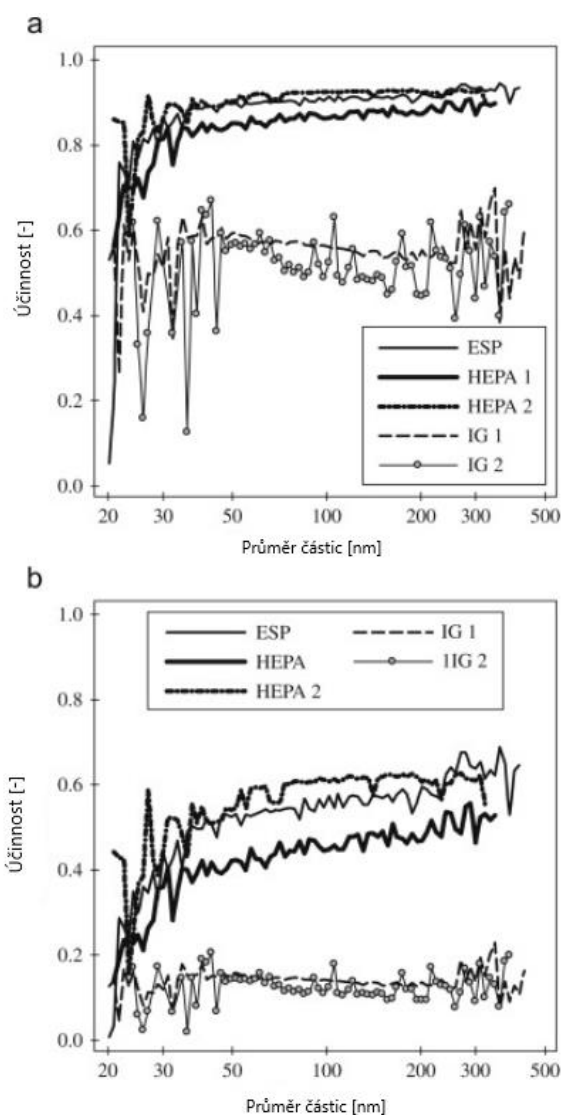
Poznámka:
Objemový průtok ionizační čističkou IG2 nemohl být zaznamenán, protože přístroj Dust Bluster byl kalibrován pouze do průtoku 30 m³/h.

Na obrázku č. 31 je k vidění graf zobrazující závislost parametru CADR na průměru (velikosti) částic v intervalu od 12,6 do 514 nm. Obě osy jsou zobrazeny v logaritmickém měřítku. Z grafu lze vyčíst podobné informace jako z tabulky č. 15. Čističky vzduchu s HEPA filtrem (HEPA1 a HEPA2) a elektrostatickým filtrem (ESP) vykazovaly nejlepší průměrné hodnoty parametru CADR. U čističek užívajících ionizátor (IG1 a IG2) se průměrná hodnota parametru pohybovala pod 50 m³/h. V oblasti menších (20 až 50 nm) a větších (250 až 500 nm) částic docházelo k větším rozptylům parametru CADR. [64]



Obr. 31: Výsledky experimentálního měření pro parametr CADR [64]

Na obrázku č. 32 jsou k vidění dva grafy zobrazující závislost účinnosti jednotlivých čističek vzduchu na průměru (velikosti) částic pro místnost o objemu 50 m³ (graf a) a obytný dům o objemu 392 m³ (graf b). Čističky vzduchu s HEPA a elektrostatickým filtrem jsou při odstraňování částic v měřeném rozsahu účinnější, než čističky s ionizátorem. V menší místnosti (graf a) odstraňují čističky HEPA1,2 a ESP přibližně 80 až 90 % částic s průměrem nad 50 nm. Čističky IG1 a IG2 odstraňují pouze 40 až 60 % částic stejné velikosti. V obytném domě (graf b) odstraňují čističky HEPA1,2 a ESP kolem 40 až 60 % částic s průměrem nad 50 nm. Čističky vzduchu IG1 a IG2 odstraňují pouze 10 až 20 % částic nad 50 nm, proto mají na koncentraci částic ve středně velkém domě malý vliv. [64]

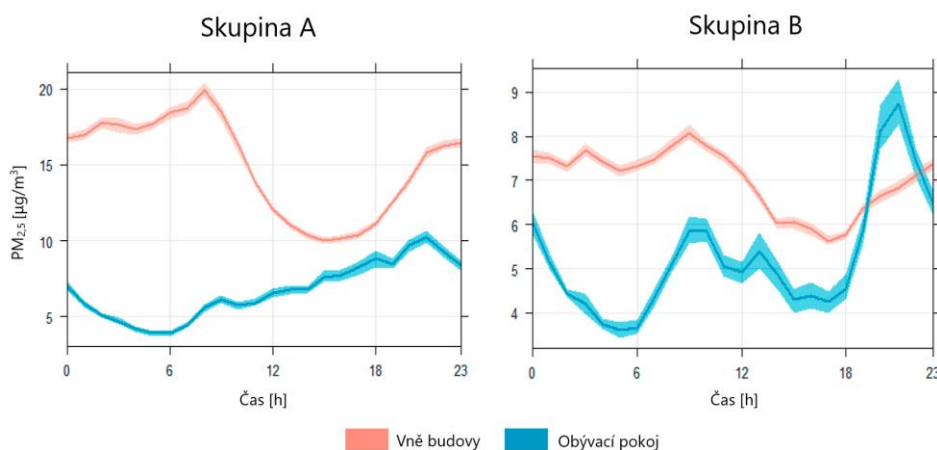


Obr. 32: Výsledky experimentálního měření pro účinnosti čističek [64]

Cílem článku z časopisu Building and Environment [65] je prozkoumat dopad komerčně dostupné čističky vzduchu používané ve skutečném obývacím pokoji na

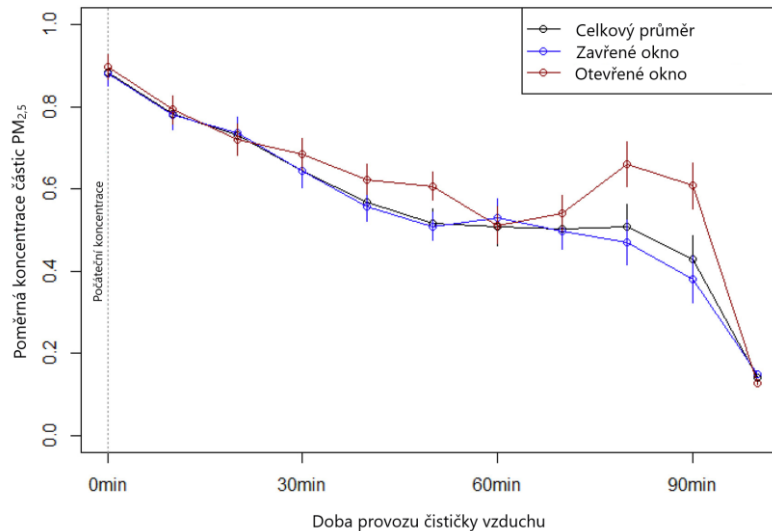
koncentraci částic $PM_{2,5}$ v ovzduší. Měření probíhalo v 18 obývacích pokojích (objem 26 až 31 m^3), které se nacházely ve třech starších budovách ve východním Londýně. V každém obývacím pokoji se nacházelo jedno otevíratelné okno o ploše 1,6 m^2 . Součástí čističek vzduchu užitých při tomto měření byl předfiltr, HEPA filtr a filtr s aktivním uhlím. Čističky byly dle výrobce vhodné do místností o objemu až 150 m^3 a jejich parametr CADR měl hodnotu 500 m^3/h . Koncentrace částic byla zaznamenávána pomocí přístroje Eltek AQ110.

Nejprve proběhlo měření koncentrací částic $PM_{2,5}$ ve vnitřním a vnějším ovzduší. Místnosti byly rozděleny do dvou skupin A (jedenáct pokojů) a B (sedm pokojů). Pokoje zařazené do skupiny A byly na rozdíl od skupiny B vybaveny nuceným větráním se zpětným získáváním tepla, které bylo k dispozici během otopné sezóny. Typický průběh koncentrací (viz obr. 33) ukazuje dynamiku mezi vnitřními a venkovními zdroji částic během dne. Hladiny venkovních koncentrací suspendovaných částic dosahují pro obě skupiny maxima kolem osmé hodiny ranní, což s největší pravděpodobností souvisí s dopravní špičkou. Vnitřní úroveň koncentrace skupiny B vykazuje podobný ranní nárůst jako venkovní koncentrace a velkou večerní špičku, která pravděpodobně souvisí s činností při vaření. Vnitřní koncentrace ve skupině A je po celý den relativně plochá s mírným večerním nárůstem. [65]



Obr. 33: Typické denní průběhy vnitřních a venkovních koncentrací $PM_{2,5}$ [65]

Graf na obrázku č. 34 zobrazuje průběh poměrné koncentrace částic $PM_{2,5}$ od zapnutí čističky vzduchu do sté minuty. Při chodu se zavřenými okny lze po 30 minutách pozorovat procentuální snížení koncentrace o 20 % z původní hodnoty. Snížení koncentrace lze pozorovat i v případě s otevřenými okny, navzdory doporučení výrobce, aby byla čistička provozována se zavřenými okny. Průměrně došlo po 90 minutách ke snížení koncentrace o přibližně 50 %. [65]



Obr. 34: Průběh poměrné koncentrace částic $PM_{2,5}$ [65]

5.4 Současná situace na trhu v ČR

Česká webová stránka [66] uvádí na základě recenzí renomovaných zahraničních zdrojů a názorů reálných uživatelů test nejlepších čističek vzduchu pro rok 2023. Čističky vzduchu jsou rozděleny do tří cenových kategorií, a to následovně:

5.4.1 Čističky vzduchu do 5 000 Kč

Tuto kategorii tvoří nejlevnější čističky na trhu. Jsou určeny do malých místností (garsoniéry) o maximálním objemu 70 m^3 . Disponují malým výkonem a jen část z nich obsahuje HEPA filtr, proto je jejich celková účinnost filtrace nižší. Hlavní předností čističek vzduchu v této kategorii je cena. [66]

V tabulce č. 16 jsou k nahlédnutí technické parametry tří nejlépe hodnocených čističek z kategorie do 5 000 Kč. Uvedené pořadí bylo sestaveno na základě zmíněných zahraničních recenzí a testů, které posuzují zejména filtrační účinnost, výkon, hlučnost a dostupné funkce jednotlivých čističek. Nejlépe vyšla v tomto testu čistička vzduchu od české firmy Tesla.

Tab. 16: Technické parametry čističek vzduchu v nejlevnější kategorii [66]

Označení	Vzduchový výkon [m ³ /h]	Filtrační systém	Hlučnost [dB]	Cena [Kč]
TESLA Smart Air Purifier Pro L	360	HEPA, fotokatalytický, uhlíkový	20 až 68	4 900
Xiaomi Mi Air Purifier Pro	500	HEPA	až 69	4 900
Ionic-CARE Triton X6	65	elektrostatický	až 8	3 700

5.4.2 Čističky vzduchu od 5 000 do 10 000 Kč

Tuto kategorii tvoří čističky, které splňují charakteristiku průměrné střední třídy a disponují dobrým poměrem ceny a kvality. Díky vyšším výkonům a lepší účinnosti filtrace jsou vhodné i do větších prostor (kolem 150 m³). Většina modelů ve střední kategorii obsahuje jak HEPA, tak uhlíkový filtr. [66]

V tabulce č. 17 jsou uvedeny technické parametry tří nejlépe hodnocených čističek z kategorie od 5 000 do 10 000 Kč. Uvedené pořadí bylo sestaveno na základě zmíněných zahraničních recenzí a testů, které posuzují zejména filtrační účinnost, výkon, hlučnost a dostupné funkce jednotlivých čističek. Nejlépe vyšla v tomto testu čistička vzduchu Concept Perfect Air Smart CA3000 se sedmistupňovou filtrací.

Tab. 17: Technické parametry čističek vzduchu ve střední kategorii [66]

Označení	Vzduchový výkon [m ³ /h]	Filtrační systém	Hlučnost [dB]	Cena [Kč]
Concept Perfect Air Smart CA3000	488	HEPA, katalytický, uhlíkový ...	až 60	9 000
Winix ZERO PRO	470	HEPA H13, uhlíkový	až 55	8 000
Rohnson R 9600	320	HEPA, antialergický, katalytický ...	až 48	5 100

5.4.3 Čističky vzduchu od 10 000 Kč

Tuto kategorii tvoří nejdražší čističky vzduchu na trhu. Vynikají obzvláště vysokou kvalitou filtrace a jsou často doplněny o přidružené funkce, jako zvlhčování a odvlhčování vzduchu. Jsou vhodné i do větších prostor s plochou kolem 70 m² (asi 175 m³).

V tabulce č. 18 jsou uvedeny technické parametry tří nejlépe hodnocených čističek z kategorie od 10 000 Kč. Nejlépe vyšla v tomto testu čistička od firmy Panasonic s průtokem vzduchu přes 400 m³/h.

Tab. 18: Technické parametry čističek vzduchu v nejdražší kategorii [66]

Označení	Vzduchový výkon [m ³ /h]	Filtrační systém	Hlučnost [dB]	Cena [Kč]
Panasonic F-VXR70G-K	402	HEPA, uhlíkový	až 54	15 000
Dyson Purifier Cool Formaldahyde TP09	290	HEPA, uhlíkový, katalytický	až 62	17 500
SHARP KC D60EUW	396	HEPA H13	až 55	13 000

Současný výběr čističek vzduchu je opravdu široký od nejlevnějších (kolem 2 000 Kč) po nejdražší, jejichž cena v některých případech přesahuje i 20 000 Kč. Levnější čističky většinou disponují jednoduchým filtračním systémem s HEPA či elektrostatickým filtrem a jejich použití je omezené na menší místnosti (kolem 70 m³). Kategorii nejdražších čističek tvoří produkty disponující více stupňovými filtračními systémy (šesti či sedmistupňové), využívají se v místnostech s velkou plochou kolem 70 m² (asi 175 m³) a bývají často doplněny o různé funkce, jako dálkové ovládání, senzory zanesení filtru, zvlhčení a odvlhčení vzduchu nebo noční režim.

6 PŘÍSTROJE POUŽITÉ PŘI EXPERIMENTÁLNÍM MĚŘENÍ

Experimentální část práce se v první fázi věnuje porovnání vybraných čističek vzduchu (Ionic CARE Triton X6, Daikin MC 707 VM a Haier KJF600KCAA) při různých režimech a dále pak větrání z hlediska snižování koncentrace znečišťujících částic v prostoru. Větrání bylo simulováno přívodem čistého vnějšího vzduchu z laboratoře a nuceným odtažením znečištěného vzduchu potrubím s clonkovou tratí a ventilátorem (Systemair K315 L EC) mimo laboratoř. Druhá fáze se zaměřuje na posouzení účinnosti uvedených čističek z hlediska jejich funkce při rozdílném zakrytí, čímž je simulováno například nevhodné umístění čističky. Množství částic bylo po celou dobu experimentů měřeno analyzátozem GRIMM 1.109. Podrobný popis použitých přístrojů je uveden níže.

6.1 Optický analyzátor částic GRIMM 1.109

Optický analyzátor částic GRIMM 1.109, jehož přední stranu s ovládacím panelem lze vidět na obrázku č. 35, slouží jako malý přenosný přístroj pro kontinuální měření koncentrace částic v ovzduší. Přístroj je schopen zaznamenávat koncentraci částic jako početní v jednotkách počtu částic na litr [N/l], nebo jako koncentraci hmotnostní v jednotkách mikrogramy na metr krychlový [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]. [67]



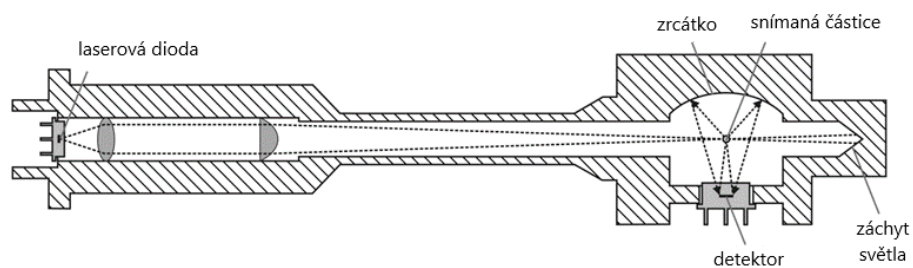
Obr. 35: Prvky na přední straně analyzátoru GRIMM 1.109 [67]

Technické parametry přístroje GRIMM 1.109 jsou zobrazeny v tabulce č. 19. Částice jsou rozděleny do 31 frakcí ve velikostním intervalu od 0,25 do 32 μm . Přívod vzorku do přístroje je zajištěn pomocí čerpadla, které udržuje průtok na hodnotě kolem 1,2 l/min. Vzorek nejprve prochází přes paprsek generovaný laserovou diodou a poté se usazuje na PTFE (polytetrafluorethylenové) membráně, odkud je možné ho odebrat pro případnou analýzu. [67]

Tab. 19: Technické parametry analyzátoru GRIMM 1.109 [67]

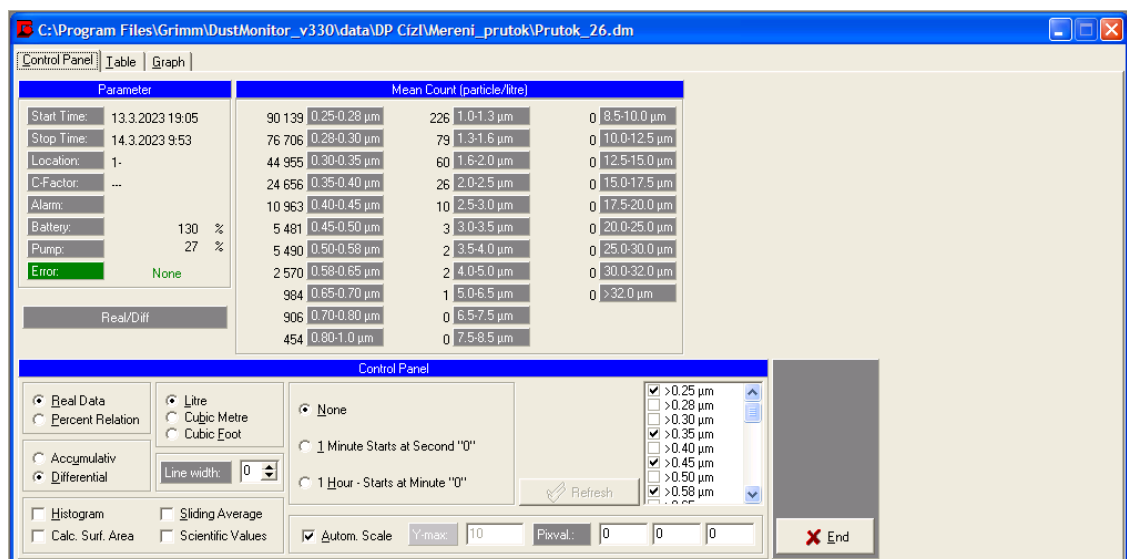
Rozměry (Š × V × H) [cm]	24 × 7 × 13
Rozsah měření	0,25 až 32 μm ve 31 frakcích
Velikostní intervaly částic [μm]	0,25/ 0,28/ 0,3/ 0,35/ 0,4/ 0,45/ 0,5/ 0,58/ 0,65/ 0,7/ 0,8/ 1,0/ 1,3/ 1,6/ 2/ 2,5/ 3/ 3,5/ 4/ 5/ 6,5/ 7,5/ 8,5/ 10/ 12,5/ 15/ 17,5/ 20/ 25/ 30/ 32
Rozsah počtu částic [N/l]	1 až 2 000 000
Citlivost [N/l]	1
Rozsah hmotnostní koncentrace [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0,1 až 100 000
Průtok vzduchu [l/min]	1,2 ± 5 %
Reprodukovatelnost	± 3 % v celém rozsahu měření
Provozní rozsah teplot [°C]	0 až 40
Maximální provozní relativní vlhkost [%]	95

Princip měření počtu částic analyzátozem GRIMM spočívá v technologii rozptylu světla. Polovodičová dioda vyzařuje laserový paprsek s vlnovou délkou 655 nm, který prochází skrz velmi úzký proud vzduchu (viz obr. 36). Částice v proudu vzduchu způsobuje rozptyl světla, které dopadá pod určitým úhlem na zrcátko, odkud se následně odráží do detektoru. Z detektoru je vyslán signál do multikanálového klasifikátoru velikosti, kde je nejprve určena velikost částice a poté je přiřčena k příslušné velikostní frakci. Naměřená data jsou uložena na paměťovou kartu nebo přenesena pomocí konektoru RS-232 do počítače. Analyzátor je schopen výsledná data zapisovat ve dvou režimech. V normálním režimu zapisuje data každých 60 sekund a v rychlém režimu každých 6 sekund. [67]



Obr. 36: Schéma laserové měřicí komory uvnitř analyzátoru GRIMM 1.109 [67]

K tabulkovému (viz obr. 38) či grafickému (viz obr. 39) zobrazení dat z analyzátoru částic GRIMM slouží software DustMonitor. Ovládací panel tohoto programu je k vidění na obrázku č. 37.



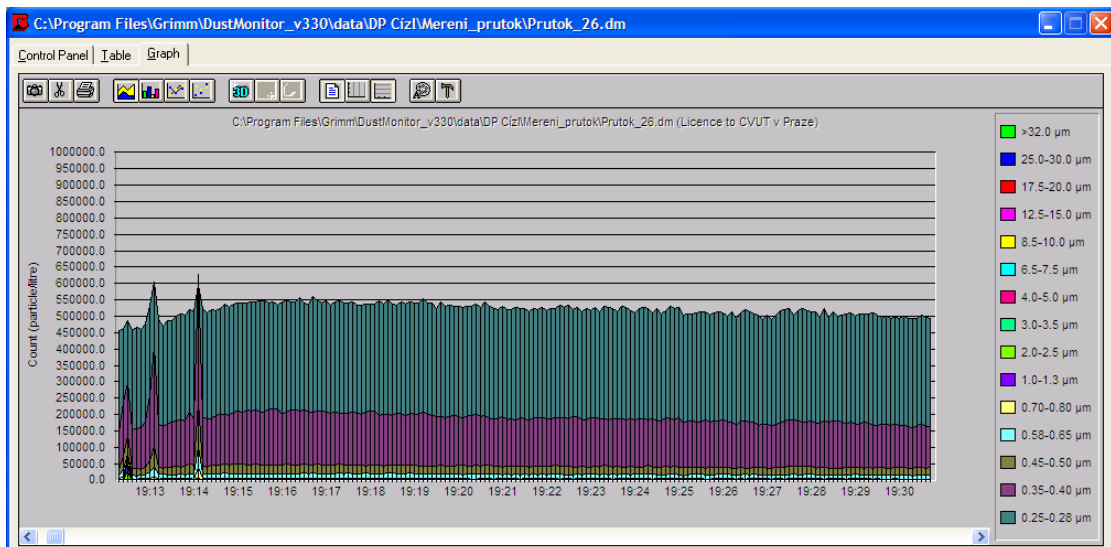
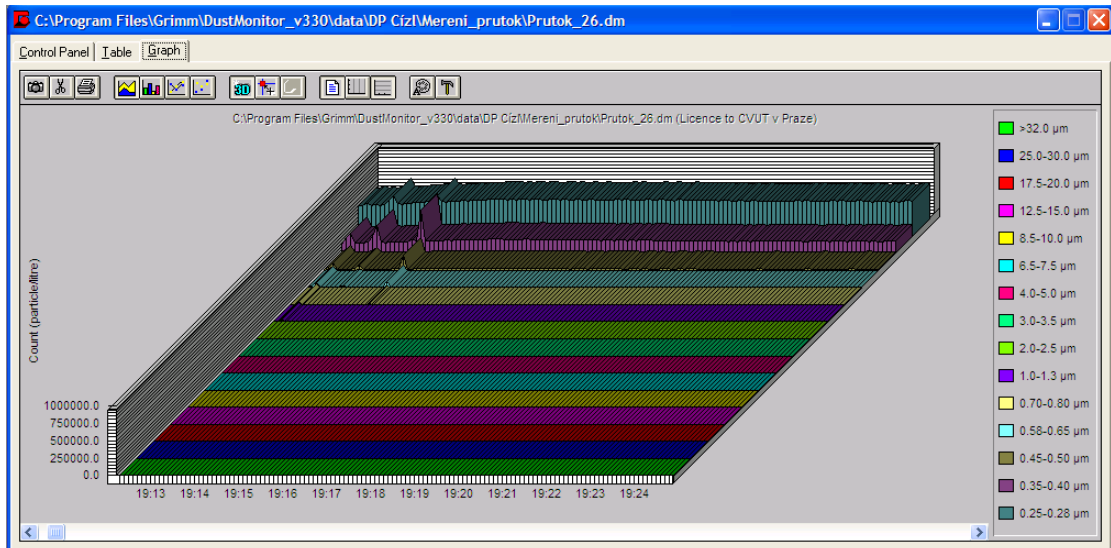
Obr. 37: Ukázka ovládacího panelu v programu DustMonitor

C:\Program Files\GrimmDustMonitor_v330\data\DP Cízl\Merení_prutok\Prutok_26.dm

Control Panel | Table | Graph

	0.25-0.28 µm	0.28-0.30 µm	0.30-0.35 µm	0.35-0.40 µm	0.40-0.45 µm	0.45-0.50 µm	0.50-0.58 µm	0.58-0.65 µm	0.65-0.70 µm	0.70-0.80 µm	0.80-1.0 µm	1.0-1.3 µm	1.3-1.6 µm
13.3.2023 19:05:06	18 300	10 300	7 900	4 500	1 750	700	850	600	200	150	100	100	0
13.3.2023 19:05:12	15 300	10 800	6 450	4 400	2 050	850	700	550	400	300	100	150	0
13.3.2023 19:05:18	15 050	11 550	7 600	3 800	2 100	850	1 200	1 000	200	400	100	150	50
13.3.2023 19:05:24	16 500	10 100	7 300	5 500	2 150	850	900	300	100	150	150	250	50
13.3.2023 19:05:30	16 850	11 550	7 700	4 550	2 000	850	950	650	250	250	400	150	0
13.3.2023 19:05:36	17 600	11 400	7 700	4 850	1 750	950	1 000	600	250	200	200	50	150
13.3.2023 19:05:42	17 050	11 500	8 450	5 300	1 450	1 100	1 100	600	200	150	50	50	50
13.3.2023 19:05:48	10 900	8 450	6 050	4 000	1 050	900	850	350	150	0	100	0	0
13.3.2023 19:05:54	15 750	10 800	7 850	4 850	2 100	600	950	250	250	250	150	50	0
13.3.2023 19:06:00	15 100	12 850	6 350	3 750	1 650	600	500	400	150	300	50	100	100
13.3.2023 19:06:06	262 010	287 690	238 450	204 590	126 290	86 750	96 720	60 750	28 250	33 800	19 850	14 700	6 500
13.3.2023 19:06:12	361 860	436 310	371 210	310 630	193 570	145 360	159 760	103 900	52 200	64 750	44 150	28 850	12 800
13.3.2023 19:06:18	135 000	116 890	69 250	43 950	24 850	13 150	15 900	8 600	5 050	5 050	3 400	1 900	850
13.3.2023 19:06:24	261 070	203 780	111 560	57 250	24 450	13 100	12 700	7 250	3 150	3 300	2 250	1 700	850
13.3.2023 19:06:30	146 610	110 020	60 700	36 200	17 550	10 150	11 350	5 500	3 200	2 800	1 400	900	500
13.3.2023 19:06:36	162 190	122 730	70 400	42 150	22 250	11 900	11 950	6 550	2 450	2 800	2 000	850	250
13.3.2023 19:06:42	143 710	107 420	61 450	37 100	17 350	10 600	9 450	6 450	2 500	2 800	1 650	750	350
13.3.2023 19:06:48	158 840	122 670	64 000	34 200	16 750	8 200	8 650	4 950	2 250	2 200	1 350	700	150
13.3.2023 19:06:54	115 040	87 550	48 350	27 450	12 100	6 250	7 350	4 900	1 700	1 900	1 000	400	50
13.3.2023 19:07:00	121 650	88 800	48 100	28 150	14 000	7 200	8 350	4 100	1 700	1 950	850	1 100	550
13.3.2023 19:07:06	105 630	78 100	44 350	26 500	14 100	6 000	7 800	4 500	1 600	1 450	950	550	200
13.3.2023 19:07:12	119 000	87 750	49 150	28 600	12 800	7 450	7 000	4 250	2 100	1 850	1 200	700	100
13.3.2023 19:07:18	119 650	87 400	50 600	27 800	12 700	6 550	7 650	4 000	1 750	1 900	1 500	400	0

Obr. 38: Tabulkové zobrazení dat v programu DustMonitor



Obr. 39: Grafické zobrazení dat v programu DustMonitor

6.2 Ventilátor Systemair K315 L EC

Radiální ventilátor Systemair K315 L EC (viz obr. 40) je vybaven stejnosměrným EC motorem. V první fázi experimentální části této práce byl využit k odvodu znečištěného vzduchu z laboratorní komory. Obecně ho však lze použít jak pro odvod, tak pro přívod vzduchu. Technické parametry ventilátoru jsou uvedeny v tabulce č. 20. [68]



Obr. 40: Ventilátor Systemair K315 L EC [68]

Tab. 20: Technické parametry ventilátoru Systemair K315 L EC [68]

Napětí [V]	230 (50 Hz)
Proud [A]	2,08
Příkon [W]	340
Otáčky [ot/min]	2 719
Průtok vzduchu [m ³ /h]	max. 1 732
Hmotnost [kg]	7,7
Průměr potrubí (sání a výtlač) [mm]	315

6.3 Čistička vzduchu Ionic CARE Triton X6

Čistička vzduchu Ionic CARE Triton X6, kterou lze vidět na obrázku č. 41, patří do kategorie nejlevnějších čističek a její cena se pohybuje kolem 3 500 Kč (viz kapitola „5.4 Současná situace na trhu“). Hlavními komponenty jsou elektrostatický filtr a integrovaný ionizátor. Oběh vzduchu je namísto hlučného ventilátoru zajištěn pomocí korónového výboje, který vzniká na hranách elektrod (ionizační drátek). Nabitě částice (nečistoty) jsou

postupně zachyceny a odloučeny na elektrostatickém filtru. Účinnost odlučování částic se snižuje s množstvím zachycených nečistot na elektrodách, které lze očistit za pomoci zabudovaného mechanismu. Údržba elektrostatického filtru se provádí prostým omytím. [69]



Obr. 41: Čistička vzduchu Ionic CARE Triton X6 [69]

Čistička vzduchu umožňuje provoz ve třech nastaveních v závislosti na objemu místnosti, ve které je užívána [69]:

- **Nastavení na nízký výkon (LOW)** je doporučeno používat v malých místnostech s plochou do 15 m². Vzduchový výkon je v tomto režimu roven 15 m³/h. Celý cyklus sestává z 20 sekund provozu (proces čištění s ionizací vzduchu) a 170 sekundové pauzy.
- **Nastavení na střední výkon (MED)** je doporučeno používat ve středně velkých místnostech s plochou do 50 m². Vzduchový výkon je v tomto režimu roven 38 m³/h. Celý cyklus se skládá z 20 sekund provozu a 20 sekundové pauzy.
- **Nastavení na plný výkon (HI)** je doporučeno používat ve velkých místnostech s plochou do 75 m². Vzduchový výkon je v tomto režimu roven 65 m³/h. Celý cyklus sestává pouze z procesu čištění a ionizace vzduchu (bez pauzy).

Tab. 21: Technické parametry čističky vzduchu Ionic CARE Triton X6 [69]

Rozměry (Š × V × H) [cm]	21 × 70 × 24
Hmotnost [kg]	3,1
Napájení [V]	220 až 240 (50 Hz)
Příkon [W]	max. 12
Vzduchový výkon [m ³ /h]	max. 65
Hlučnost [dB]	max. 8
Plocha místnosti při standardní výšce stropu (cca 250 cm) [m ²]	max. 75
Koncentrace lehkých záporně nabitých iontů v cm ³ ve vzdálenosti 50 cm [1/cm ³]	4,2 · 10 ⁵
Koncentrace lehkých záporně nabitých iontů v cm ³ ve vzdálenosti 250 cm [1/cm ³]	2,7 · 10 ²
Protiprašná účinnost [%]	96
Produkce ozonu [ppm]	< 0,025

6.4 Čistička vzduchu Daikin MC 707 VM

Tento typ čističky vzduchu se v dnešní době již nevyrobí. Kolem roku 2010 však patřil k nejlepším na trhu, čemuž odpovídala i cena 13 000 Kč. Jejím nástupcem se stal typ Daikin MC 70 L, který lze zařadit do podobné cenové i výkonnostní kategorie. [70]

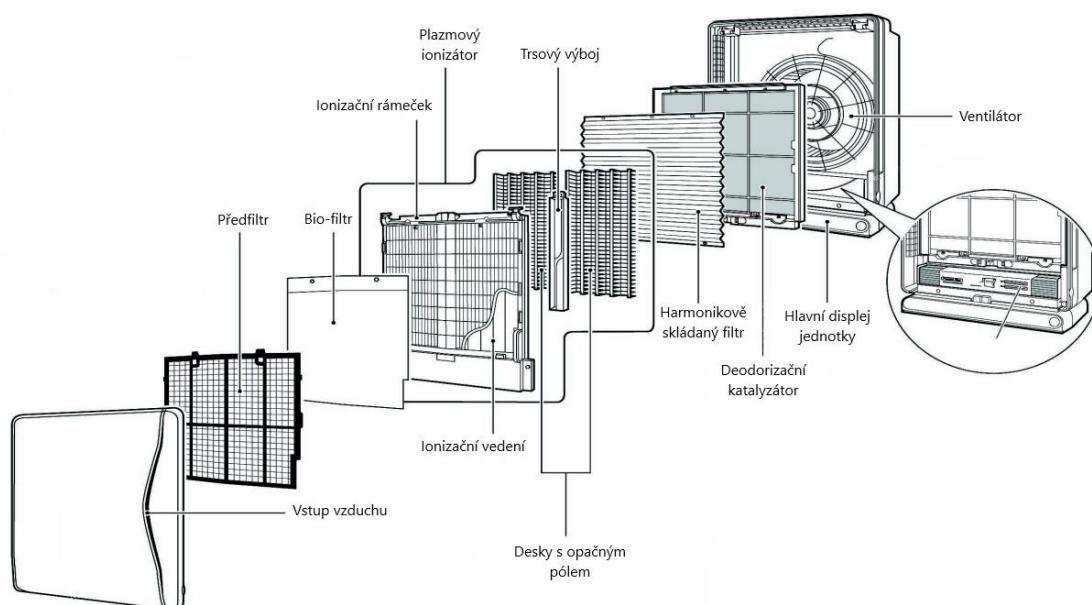
Čistička vzduchu Daikin MC 707 VM, kterou lze vidět na obrázku č. 42, disponuje sedmistupňovým filtračním systémem. Plazmový ionizátor zajišťuje v kombinaci s elektrostatickým filtrem odstraňování prachových a pylových částic. Pro účinné odstraňování bakterií slouží filtr s biologickými protilátkami, unikátní technologie Flash Streamer a fotokatalytický filtr. Posledním stupněm je deodorizační katalyzátor, který slouží k odbourávání pachů. [71]



Obr. 42: Čistička vzduchu Daikin MC 707 VM [71]

Jednotlivé stupně filtrace (viz obr. 43) v čističce Daikin jsou [70]:

- **Předfiltr** – slouží k zachycení velkých prachových částic a zvířecích chlupů. Údržbu lze provést prostým omytím.
- **Aktivní bio-antibody filtr** (bio-filtr) – odstraňuje vzdušné viry a bakterie. Výměnu filtru je doporučeno provést vždy po jednom roce.
- **Plazmový ionizátor** – pozitivně nabíjí prachové a pylové částice. Výhodou je jeho snadná omyvatelnost.
- **Elektrostatický prachový filtr** – slouží k zachycení kladně nabitých prachových a pylových částic na negativně nabitý filtr. Doporučená výměna filtru je vždy po jednom roce.
- **Jednotka Flash Streamer** – podporuje fotokatalytickou reakci na povrchu fotokatalytického filtru a odstraňuje většinu obvyklých alergenů (pyl, prach, roztoči, formaldehyd, atd.)
- **Titanový apatitový fotokatalytický filtr** – odstraňuje bakterie a viry pomocí fotokatalytické reakce
- **Deodorizační filtr** – slouží k odbourávání pachů



Obr. 43: Filtrační systém čističky vzduchu Daikin MC 707 VM [72]

Čistička vzduchu umožňuje nastavení chodu v pěti úrovních. Disponuje také automatickým režimem, při kterém je výkon regulován dle aktuálního znečištění v místnosti. [72]

- **Tiché nejnižší otáčky (LL)** – 60 m³/h
- **Nízké otáčky (L)** – 120 m³/h
- **Střední otáčky (M)** – 180 m³/h
- **Vysoké otáčky (H)** – 285 m³/h
- **Turbo (HH)** – 420 m³/h

Tab. 22: Technické parametry čističky vzduchu Daikin MC 707 VM [71]

Rozměry (Š × V × H) [cm]	42,5 × 53,3 × 21,3
Hmotnost [kg]	8,7
Napájení [V]	220 až 240 (50 Hz)
Příkon [W]	max. 55
Vzduchový výkon [m ³ /h]	max. 420
Hlučnost [dB]	max. 47
Plocha místnosti při standardní výšce stropu (cca 250 cm) [m ²]	max. 48

6.5 Čistička vzduchu Haier KJF600KCAA

Čistička vzduchu Haier KJF600KCAA zobrazená na obrázku č. 44 se vyznačuje velmi vysokou hodnotou parametru CADR 500 m³/h. Disponuje ukazateli koncentrace částic frakce PM_{2,5} a těkavých organických látek (viz tab. 23), ze zobrazeného čísla však není jasné, jaká je reálná koncentrace VOC, a obě hodnoty na displeji jsou tedy spíše orientační. Její cena se pohybuje kolem 13 000 Kč. Čistička užívá tzv. „filtr 3v1“, který dle výrobce zajišťuje účinné odstranění vlasů, chlupů, prachu a také jedovatých látek (formaldehyd, benzen, čpavek a nikotin) ze vzduchu. Tento filtr se skládá ze tří vrstev: vstupního filtru, HEPA filtru a filtru s aktivním uhlím. [73]

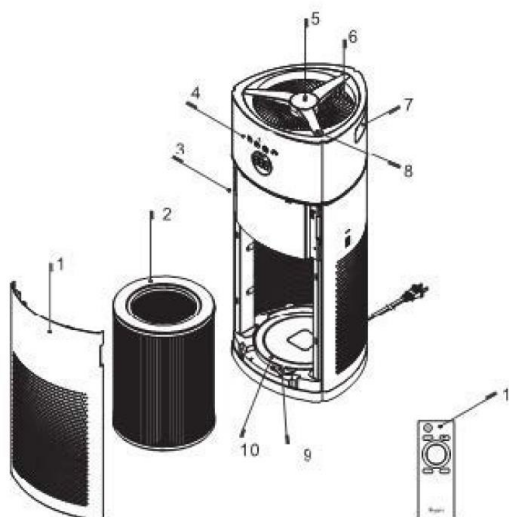


Obr. 44: Čistička vzduchu Haier KJF600KCAA [73]

Tab. 23: Jednotlivé stavy na displeji čističky Haier KJF600KCAA [74]

Rozsah PM _{2,5} [μg/m ³]	Rozsah VOC [-]	Stav	Barva
0 až 75	0 až 0,6	Výborný	Zelená
76 až 150	0,61 až 1	Dobrý	Žlutá
> 150	> 1	Špatný	Červená

Čistička vzduchu od firmy Haier umožňuje nastavení rychlosti ventilátoru v pěti režimech (automatický, jedna, dva, tři a turbo režim), které firma nijak dále nespecifikuje. Obrázek č. 45 je převzat z technického listu výrobce a zobrazuje jednotlivé části čističky vzduchu Haier KJF600KCAA.



Obr. 45: Části čističky Haier KJF600KCAA [74]

- 1) Přední kryt
- 2) Integrovaný filtr (3v1)
- 3) Senzor prachu
- 4) Funkční displej
- 5) Tlačítko napájení a resetování filtru
- 6) Odvod vzduchu
- 7) Držadlo
- 8) Tlačítko rychlosti ventilátoru, dětské pojistky a resetování filtru
- 9) Posuvný držák filtru
- 10) Držák filtru

11) Dálkový ovladač

Tab. 24: Technické parametry čističky vzduchu Haier KJF600KCAA [74]

Rozměry (Š × V × H) [cm]	30,6 × 72,4 × 30,6
Hmotnost [kg]	9
Napájení [V]	230 (50 Hz)
Příkon [W]	55
CADR (PM) [m ³ /h]	500
CADR (VOC) [m ³ /h]	200
CCM (PM)	P4
CCM (VOC)	F4
Hlučnost [dB]	23 až 54
Plocha místnosti při standardní výšce stropu (cca 250 cm) [m ²]	max. 100

Poznámka:

Zkratky P4 a F4 (viz tab. 24) obecně označují čističky vzduchu, které jsou schopné odloučit více než 12 000 mg částic PM (P4), respektive více než 1 500 mg látek VOC (F4). Toto téma je podrobně popsáno v kapitole „5.2.3 GB/T18801 standard (Čína)“.

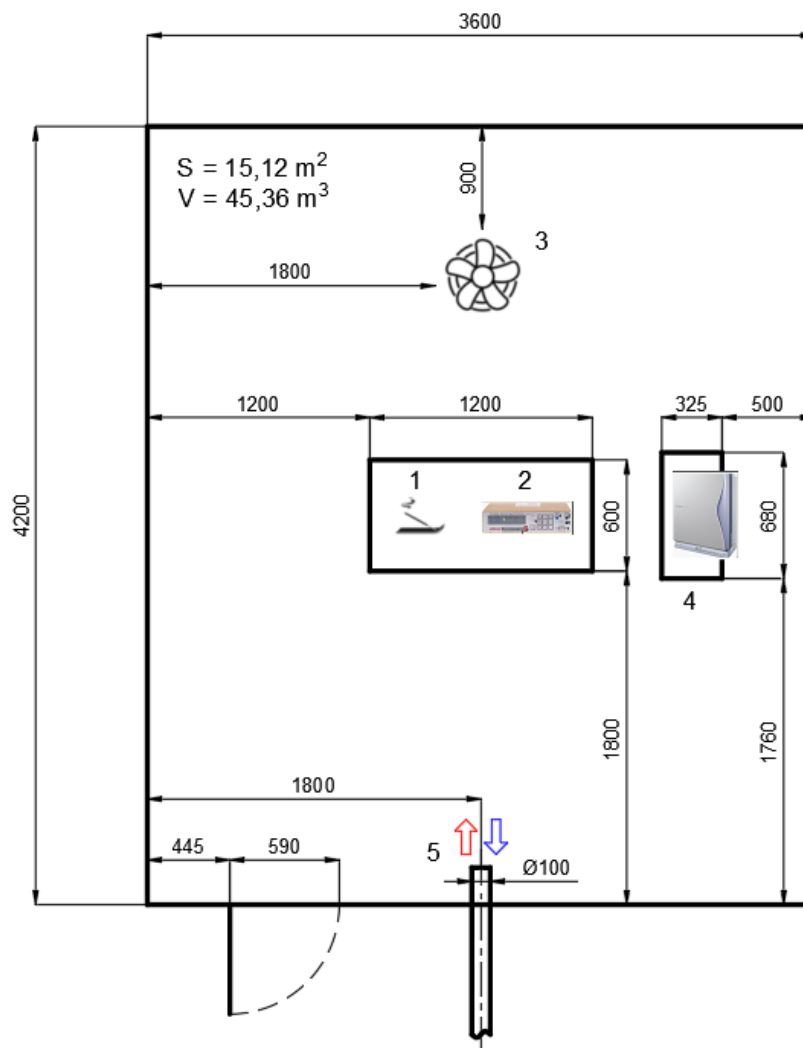
7 EXPERIMENTÁLNÍ POROVNÁNÍ ČISTIČEK VZDUCHU S VĚTRÁNÍM

Experimentální část diplomové práce probíhala v měřicí komoře, která je podrobně popsána v kapitole „7.1 Měřicí komora“. V rámci experimentu byly změřeny účinnosti snižování koncentrace tuhých znečišťujících látek pro čističky vzduchu Ionic CARE Triton X6, Daikin MC 707 VM a Haier KJF600KCAA v různých režimech. Rovněž bylo provedeno měření s odtahem vzduchu pomocí ventilátoru simulující větrání. Hlavními cíli experimentu bylo vzájemně porovnat účinnosti jednotlivých čističek a následně stanovit hodnotu průtoku vzduchu, který by bylo třeba přivádět při větrání a při němž by se křivka poklesu koncentrace přibližně shodovala s křivkou pro měřenou čističku vzduchu ve zvoleném režimu.

7.1 Měřicí komora

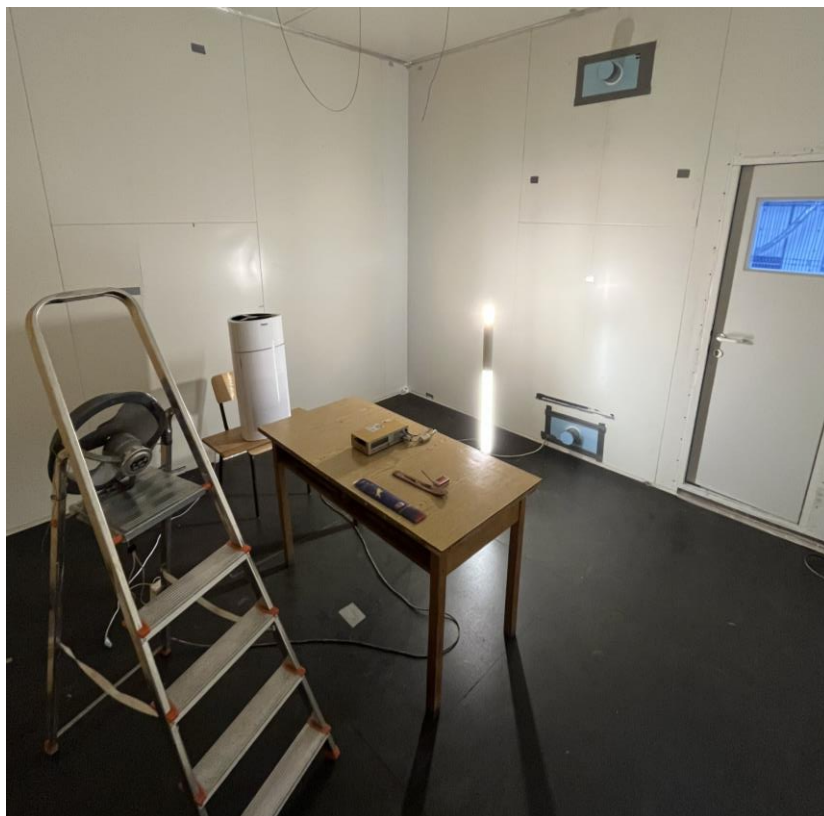
Měřicí komora se nachází v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT. Těsná komora, jejíž schéma je na obrázku č. 46, má rozměry $3,6 \times 4,2 \times 3$ m a objem $45,36 \text{ m}^3$. Místnost disponuje dvěma otvory o průměru 100 mm, které sloužily pro přívod čerstvého (horní otvor) a odvod znečištěného (spodní otvor) vzduchu. Otvory jsou umístěny uprostřed stěny ve výšce 17 a 261 cm nad podlahou (měřeno od středu otvoru). Na spodní otvor navazovala clonková trať s ventilátorem. Znečištěný vzduch byl po průchodu ventilátorem odveden potrubím mimo laboratoř, aby nedošlo ke kontaminaci vzduchu nasávaného do komory. Během testování účinností samotných čističek vzduchu byly uvedené otvory utěsněny a zalepeny izolační páskou, aby nedocházelo k nežádoucí infiltraci.

Analyzátor částic GRIMM 1.109 byl společně s vonnou tyčinkou, sloužící pro produkci znečišťujících látek, umístěn uprostřed měřicí komory na stole ve výšce 80 cm. Směšovací ventilátor byl situován v poloviční vzdálenosti mezi stěnou místnosti a stolem tak, aby před začátkem měření rovnoměrně rozptýlil kouř po celé komoře. Jednotlivé čističky vzduchu byly umístěny uprostřed delší stěny komory na podstavci, ve vzdálenosti 50 cm od stěny a od podlahy. Počítač umístěný vně komory byl s analyzátozem GRIMM propojen USB kabelem. Na obrázcích č. 47 a 48 lze vidět měřicí komoru zevnitř a zvenku.



Obr. 46: Schéma měřicí komory

- 1) Vonná tyčinka (zdroj znečištění)
- 2) Analyzátor částic GRIMM 1.109
- 3) Směšovací ventilátor
- 4) Vybraná čistička vzduchu (Ionic, Daikin, Haier)
- 5) Otvory pro přívod a odvod vzduchu



Obr. 47: Vnitřek měřicí komory



Obr. 48: Pohled na clonkovou trať s ventilátorem a měřicí komoru zvenku

7.2 Postup měření

Při měření účinnosti čističek vzduchu bylo nejprve nutné utěsnit oba kruhové otvory v místnosti. Poté došlo k zapnutí směšovacího ventilátoru a zapálení vonné tyčinky. Po cca pěti minutách se koncentrace částic zvýšila nad hodnotu $1,5 \cdot 10^6$ částic/l. Tyčinka tak mohla být uhašena a ventilátor vypnut. Následně byla zapnuta zvolená čistička vzduchu na požadovaný režim a komora uzavřena. Koncentrace částic v jednotlivých frakcích byla po celou dobu experimentu zaznamenávána analyzátozem GRIMM 1.109 v šestisekundových intervalech (rychlý režim).

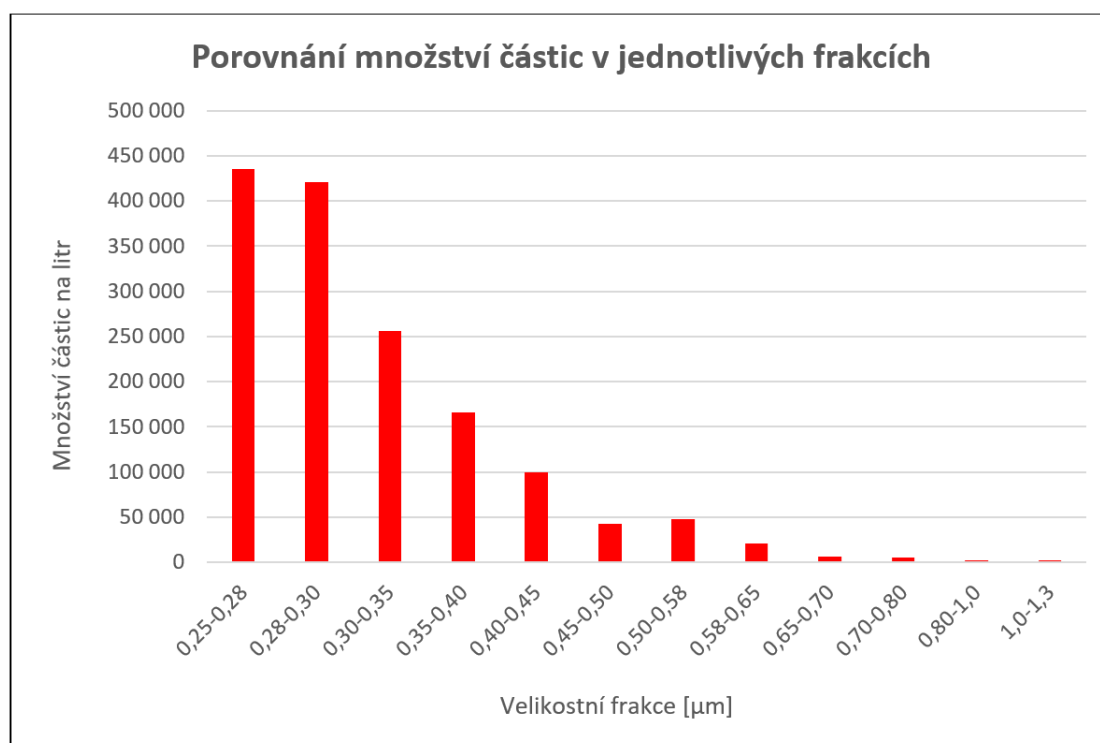
Měření trvalo vždy přibližně 15 hodin. Po jeho ukončení byly výsledky z programu DustMonitor exportovány do textového souboru a následně proběhlo jejich zpracování v programu Microsoft Excel. Úvodní srovnávací měření probíhalo bez zapnuté čističky vzduchu, kdy došlo ke snížení koncentrace částic přirozeným způsobem depozicí. Jednotlivé čističky byly vzhledem k rozměrům komory měřeny pouze v režimech odpovídajících doporučení výrobců ohledně velikosti čištěného prostoru:

- **Ionic CARE Triton X6** – plný výkon HI ($65 \text{ m}^3/\text{h}$)
- **Daikin MC 707 VM** – nízké otáčky L ($120 \text{ m}^3/\text{h}$)
- **Haier KJF600KCAA** – režim 1

Po dokončení měření účinností jednotlivých čističek došlo k odstranění těsnících prvků z kruhových otvorů v místnosti. Díky tomuto kroku bylo možné simulovat větrání pomocí přívodu čerstvého vzduchu z laboratoře horním otvorem a odvodu znečištěného vzduchu z komory otvorem spodním, na který navazovala clonková trať s ventilátorem. Postup měření je obdobný jako v případě měření účinností čističek s tím rozdílem, že byl před zapálením vonné tyčinky na ventilátoru nastaven požadovaný průtok odtahovaného znečištěného vzduchu. Cílem tohoto experimentu bylo najít průtok, při kterém by průběh snižování koncentrace částic co nejvíce odpovídal poklesu při použití dané čističky v uzavřené komoře.

7.3 Složení velikostních frakcí

Analyzátor částic GRIMM 1.109 zařídí v softwaru DustMonitor množství naměřených částic dle velikosti ve 31 frakcích. Částice produkované vonnými tyčinkami a cigaretami jsou obecně velmi jemné submikronové částice, což potvrdil i tento experiment, při kterém bylo největší množství částic naměřeno ve frakcích 0,25 až 0,3 μm . Analyzátor zaznamenal částice do velikosti přibližně 1,3 μm , částice větších rozměrů se ve vzorku vyskytovaly jen zřídka. Na obrázku č. 49 lze vidět sloupcový graf zobrazující množství částic v jednotlivých frakcích. Graf je vyneseno pro hodnoty v okamžiku uhašení vonné tyčinky (celkem cca $1,5 \cdot 10^6$ částic/l).



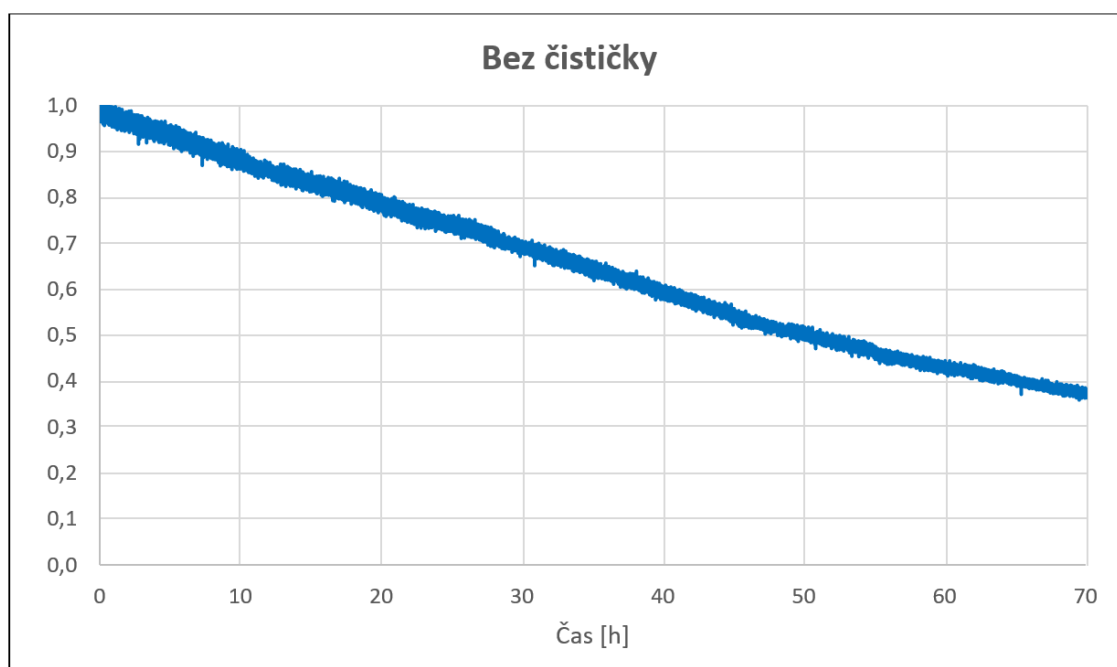
Obr. 49: Sloupcový graf velikostních frakcí

7.4 Vyhodnocení účinností čističek vzduchu

Během experimentu v laboratorní komoře byla provedena tři měření se zapnutými čističkami vzduchu a jedno měření bez čističky. Výsledky měření jsou pro porovnání i vzhledem k mírně odlišné počáteční koncentraci vyjádřeny ve formě poměrného poklesu počáteční koncentrace tuhých částic. V dalších kapitolách budou podrobněji popsány jednotlivé výsledky měření.

7.4.1 Bez použití čističky

V rámci experimentu bylo provedeno měření průběhu snižování koncentrace tuhých částic v komoře bez zapnutí čističky vzduchu. Měření probíhalo asi 70 hodin, během kterých došlo vlivem depozice k poklesu koncentrace o 62 % z počáteční hodnoty $1,5 \cdot 10^6$ částic/l na hodnotu přibližně $0,56 \cdot 10^6$ částic/l. Z grafu na obrázku č. 50 je patrné, že přirozený pokles koncentrace částic v uzavřeném prostoru probíhá velmi pomalu, ale zato plynule bez výraznějších skokových změn. V tabulce č. 25 jsou uvedeny procentuální poklesy koncentrace tuhých částic v průběhu měření po deseti hodinách pro experiment bez použití čističky vzduchu.



Obr. 50: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic bez použití čističky

Tab. 25: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic bez čističky vzduchu

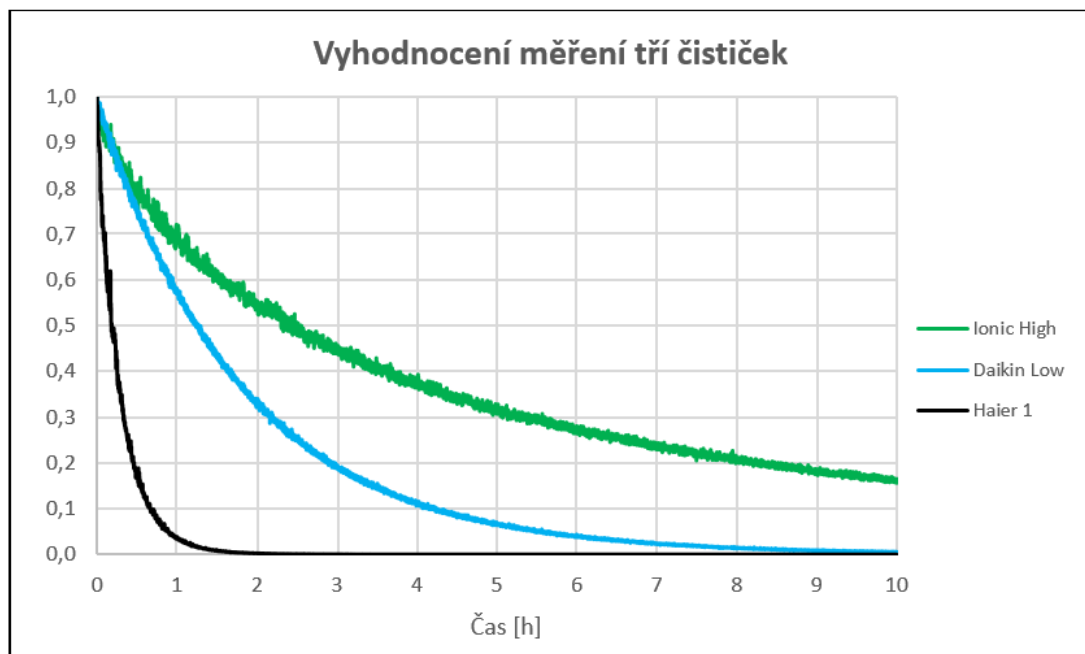
Čas [h]	Bez čističky [%]
0	100
10	86,2
20	78,7
30	69,6
40	60,3
50	50,3
60	42,8
70	37,8

7.4.2 Použití čističek vzduchu

Čističky vzduchu byly v tomto experimentu měřeny (jak již bylo uvedeno v kapitole „7.2 Postup měření“) v následujících režimech:

- **Režim plného výkonu HIGH (65 m³/h)** – čistička Ionic CARE Triton X6
- **Režim nízkých otáček LOW (120 m³/h)** – čistička Daikin MC 707 VM
- **Režim 1** (více nespecifikovaný) – čistička Haier KJF600KCAA

Na obrázku č. 51 je graf porovnávající časové průběhy koncentrace tuhých částic pro jednotlivé čističky ve zmíněných režimech. Procentuální pokles koncentrace byl u každého měření vztažen vždy ke konkrétní počáteční hodnotě kolem $1,5 \cdot 10^6$ částic/l. Z výsledků zobrazených v grafické a tabulkové (viz tab. 26) podobě vyplývá, že čistička vzduchu od firmy Haier je i při nejslabším možném režimu výrazně účinnější (zřejmě díky použití vysoce účinného HEPA filtru) než zbylé dvě čističky, když po hodině provozu klesla koncentrace částic v místnosti o více než 95 %. Čistička vzduchu od firmy Daikin dosáhla podobného snížení koncentrace po šesti hodinách provozu a při testování čističky od firmy Ionic došlo ke snížení koncentrace o 92 % až po 18 hodinách provozu.



Obr. 51: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic pro měření tří čističek

Tab. 26: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic pro tři čističky

Čas [h]	Ionic (High) [%]	Daikin (Low) [%]	Haier (režim 1) [%]
0	100	100	100
0,5	79,4	76	16,7
1	71,5	57	3,8
2	55,5	33,3	0,3
3	44,6	19	0,03
4	38,7	11,3	0
5	30,8	6,4	0
6	26,9	3,8	0
7	23,6	2,4	0
8	20,4	1,5	0
9	17,9	0,85	0
10	15,9	0,6	0

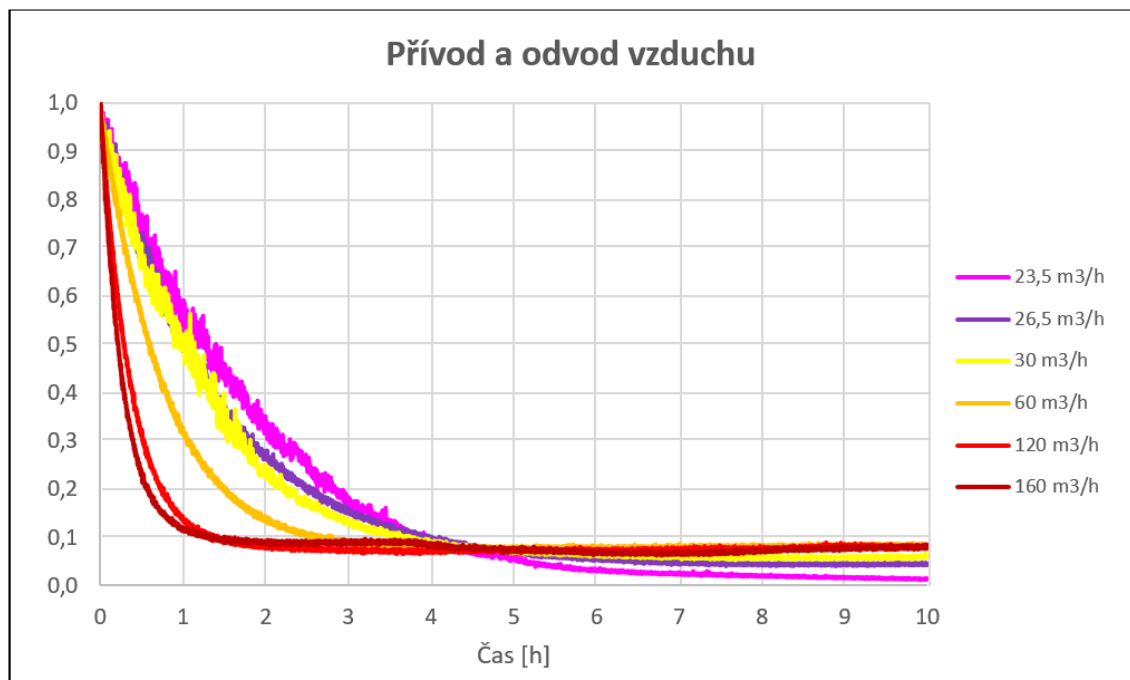
Čističky vzduchu lze kromě účinnosti snižování koncentrace tuhých částic hodnotit například podle hladiny akustického tlaku nebo příkonu, s kterým souvisí i provozní náklady. Podle dat od výrobců vychází z hlediska hladiny akustického tlaku nejlépe čistička od firmy Ionic (maximálně 8 dB), poté čistička Daikin MC 707 VM (max. 47 dB) a nejhůře vychází čistička Haier KJF600KCAA (max. 54 dB). Pokud testované čističky porovnáme z hlediska příkonu, předchozí pořadí se nezmění. Nejlépe je na tom čistička Ionic CARE Triton X6 (maximálně 12 W) následovaná čističkami Daikin a Haier (shodně max. 55 W).

7.5 Vyhodnocení účinnosti při přívodu a odvodu vzduchu

Při tomto experimentu bylo měřeno procentuální snižování koncentrace tuhých částic větráním. Čerstvý vzduch z laboratoře byl v horní části komory přiváděn kruhovým otvorem o průměru 100 mm. Znečištěný vzduch byl poté ve spodní části komory odsáván otvorem stejného průměru, na který navazovala clonková trať s ventilátorem. Znečištěný vzduch byl po průchodu ventilátorem odveden potrubním systémem mimo laboratoř, aby nedošlo ke kontaminaci vzduchu nasávaného do komory.

Celkem bylo provedeno šest měření s rozdílným nastavením průtoku na ventilátoru. Na obrázku č. 52 jsou zobrazeny výsledné průběhy snižování koncentrace tuhých částic pro jednotlivé průtoky vzduchu. Průtok vzduchu rovný 23,5 m³/h byl nejnižší možnou hodnotou,

kteřou bylo na ventilátoru možné nastavit. Pro vyšší hodnoty průtoku je pokles koncentrace částic logicky strmější a dochází k rychlejšímu vyčištění komory. Při měření s nižšími hodnotami průtoků (30, 26,5, a 23,5 m³/h) docházelo ke značnému kolísání naměřených dat. Další zajímavostí je, že při nižších průtocích se minimální koncentrace částic v místnosti postupně ustálila na nižších hodnotách (o jednotky procent), než při průtocích vyšších, kdy už zřejmě docházelo ke strhávání částic usazených na površích komory (viz tab. 27).



Obr. 52: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic při přívodu a odvodu vzduchu

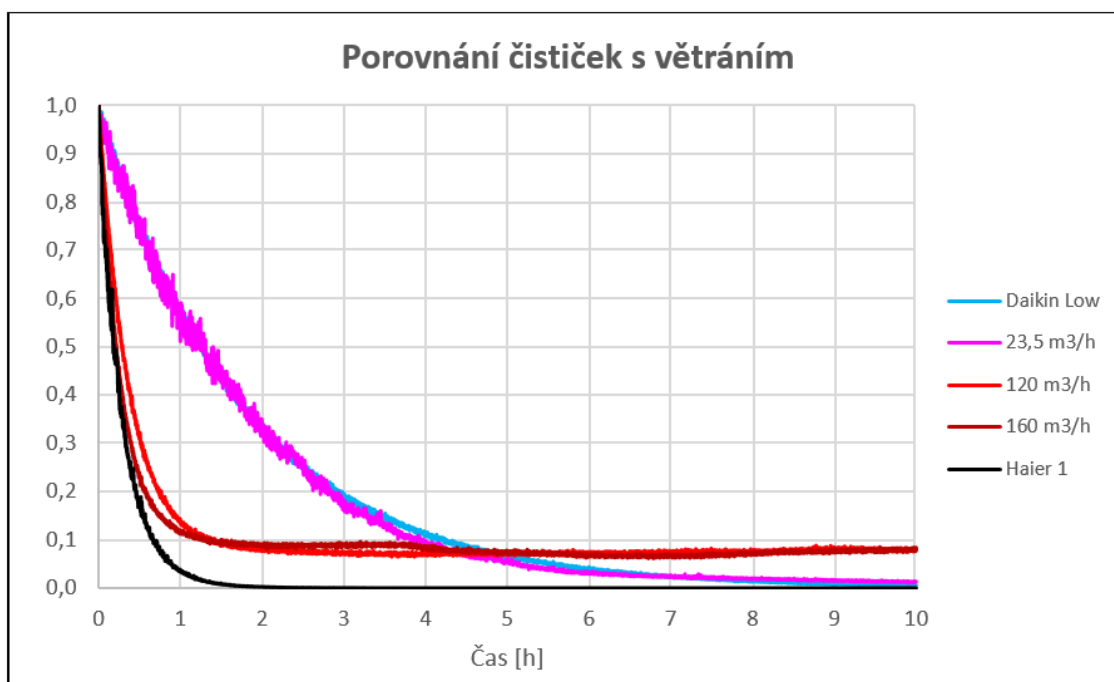
Tab. 27: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic při přívodu a odvodu vzduchu

Čas [h]	23,5 m ³ /h [%]	26,5 m ³ /h [%]	30 m ³ /h [%]	60 m ³ /h [%]	120 m ³ /h [%]	160 m ³ /h [%]
0	100	100	100	100	100	100
1	53,3	51	51,6	32,7	13,7	11,7
2	32,1	26,7	22,2	14,3	8,5	8,8
3	18,2	14,9	12,8	8,9	7,6	8,8
4	9,4	9,6	8,5	7,8	7,1	8,8
5	5,7	6,8	6,9	8	7	7,4
6	3,2	5,5	6,4	7,9	7,4	6,8
7	2,5	4,7	6,1	7,7	7,4	6,8
8	1,9	4,4	5,7	8,3	7,6	6,9
9	1,6	4,4	5,9	8,1	8	8,2
10	1,3	4,5	6,1	8,5	8	8

V rámci experimentu byl pro porovnání rovněž proveden test snižování koncentrace částic uvnitř místnosti bez čističky vzduchu, kdy se za přibližně 70 hodin měření snížila koncentrace přirozeným způsobem depozicí o 62 % z původní hodnoty $1,5 \cdot 10^6$ částic/l.

Hlavním úkolem druhé části experimentu bylo nastavit průtok ventilátoru, který simuloval větrání čistým okolním vzduchem tak, aby odpovídal snižování koncentrace tuhých částic při užití čističek vzduchu.

Po řadě experimentů byla zjištěna přibližná hodnota průtoku odpovídající čističce Daikin v režimu Low, a to $23,5 \text{ m}^3/\text{h}$ (viz obr. 54 a tab. 28). Tato hodnota průtoku byla rovněž nejnižším možným nastavením ventilátoru. Při hodnotě průtoku větráním $120 \text{ m}^3/\text{h}$ (stejný průtok, jako má čistička Daikin v režimu Low) byl pokles koncentrace částic asi třikrát rychlejší, než u testované čističky. U větrání došlo díky přívodu čistého okolního vzduchu ke snížení koncentrace o 92 % za přibližně 1,8 hodiny, kdežto u čističky Daikin došlo ke stejnému snížení až za 4,6 hodin.

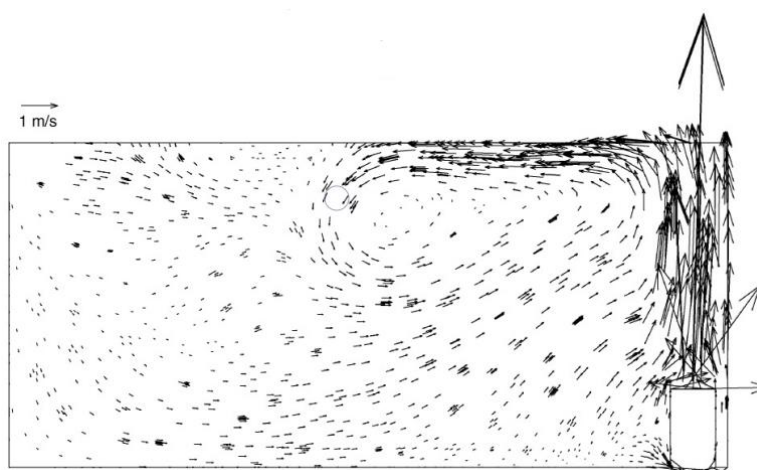


Obr. 54: Porovnání časového průběhu snižování koncentrace tuhých částic u vybraných čističek a průtoků vzduchu

Tab. 28: Porovnání procentuálního poklesu koncentrace tuhých částic u vybraných čističek a průtoků vzduchu

Čas [h]	Čističky vzduchu [%]		Průtoky vzduchu [%]		
	Daikin (L)	Haier (1)	23,5 m ³ /h	120 m ³ /h	160 m ³ /h
0	100	100	100	100	100
0,5	76	16,7	76,1	31,5	23,1
1	57	3,8	53,3	13,7	11,7
2	33,3	0,3	32,1	8,5	8,8
3	19	0,03	18,2	7,6	8,8
4	11,3	0	9,4	7,1	8,8
5	6,4	0	5,7	7	7,4
6	3,8	0	3,2	7,4	6,8
7	2,4	0	2,5	7,4	6,8
8	1,5	0	1,9	7,6	6,9
9	0,85	0	1,6	8	8,2
10	0,6	0	1,3	8	8

Lepší účinnost větrání při stejném průtoku je způsobena především přívodem čistého okolního vzduchu. Další možnou příčinou je opětovné nasávání již vyčištěného vzduchu čističkou, díky čemuž dochází ke snížení její účinnosti. Touto problematikou se zabývá článek [75], jehož součástí je obrázek č. 55, který zobrazuje simulaci proudění v CFD při umístění čističky vzduchu v rohu místnosti a lze na něm názorně vidět nasávání již vyčištěného vzduchu čističkou.



Obr. 55: CFD simulace proudění v místnosti při zapnuté čističce vzduchu [75]

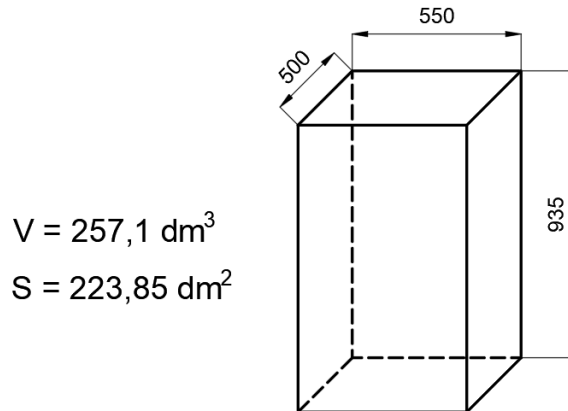
Pro čističku vzduchu Haier v režimu 1 a větrání vycházejí srovnatelné průběhy snižování koncentrace při průtoku ventilátorem přibližně 160 m³/h (viz obr. 54 a tab. 28), kdy do hodnoty snížení koncentrace o zhruba 80 % jsou obě křivky srovnatelné. Od zmíněné hranice pak čistička Haier s kvalitním HEPA filtrem čistí místnost dále, kdežto při simulovaném větrání se konečná hodnota koncentrace znečišťujících částic v místnosti ustálí na cca osmi procentech počáteční koncentrace. U čističky Ionic nebylo vzhledem k výrazně pomalejšímu poklesu koncentrace již možné nastavit na ventilátoru odpovídající nízký průtok, proto zde její hodnocení chybí.

8 POSOUZENÍ ÚČINNOSTI ČISTIČEK VZDUCHU PŘI ROZDÍLNÉM ZAKRYTÍ

Druhá samostatná fáze experimentální části diplomové práce probíhala opět v laboratorní komoře na Ústavu techniky prostředí, jejíž podrobný popis je uveden v kapitole „7.1 Měřicí komora“. Hlavním cílem experimentu bylo posoudit účinnosti jednotlivých čističek z hlediska snižování koncentrace tuhých znečišťujících částic při rozdílném zakrytí, simulující například nevhodné umístění čističky. Podobnou problematikou se zabývala i německá publikace [61] uvedená v kapitole „5.3 Hodnocení přenosných čističek vzduchu“, kde se ukázal poměrně významný vliv umístění čističky na parametr CADR.

8.1 Experimentální zákryt

Pro simulaci zakrytí jednotlivých čističek vzduchu byla použita krabice z pevného kartonu o rozměrech $550 \times 935 \times 500$ mm (viz obr. 56) a povrchu $223,85 \text{ dm}^2$ (bez dna krabice).



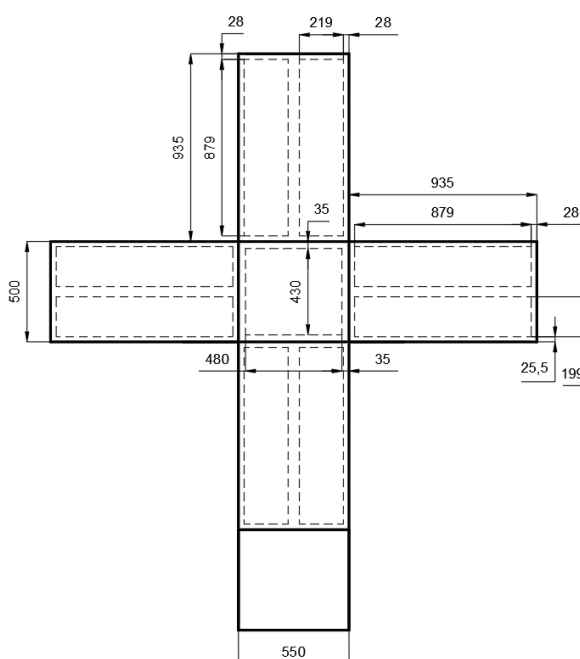
Obr. 56: Původní rozměry experimentální krabice

Do experimentální krabice byly nejprve vyřezány otvory tak, aby došlo k rovnoměrnému zakrytí měřené čističky vzduchu z 25 %. Reálnou podobu a rozměry jednotlivých otvorů, jejichž celková plocha byla přibližně $167,6 \text{ dm}^2$ (asi 75 % z povrchu krabice), lze vidět na obrázcích č. 57 a 58. Do horního víka krabice byl vyřezán otvor o rozměrech 480×430 mm, do přední a zadní strany byly vyřezány otvory o rozměrech 219×879 mm, do levé a pravé strany byly vyřezány otvory o rozměrech 199×879 mm

a spodní víko krabice zůstalo v původním neupraveném stavu. Jednotlivé otvory jsou na obrázku č. 58 zobrazeny čárkovaně.



Obr. 57: Experimentální krabice při zakrytí 25 %

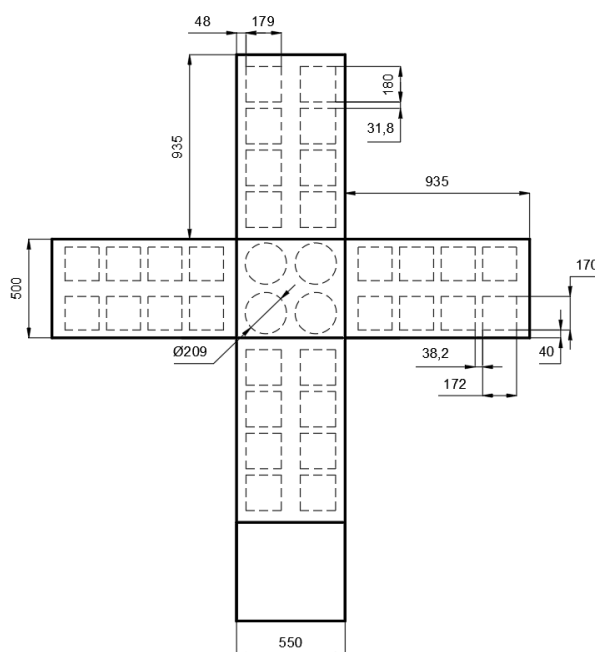


Obr. 58: Rozměry experimentální krabice při zakrytí 25 %

Pro následující experimenty bylo zapotřebí vytvořit prvky, které by simulovaly zakrytí čističky vzduchu z 50 a 75 %. K rovnoměrnému zakrytí čističky z 50 % posloužilo pět kartonových dílů, jejichž reálnou podobu a rozměry lze vidět na obrázcích č. 59 a 60. Do prvku zakrývajícího horní víko byly vyřezány čtyři kruhové otvory o průměru 209 mm, do dílů pro levou a pravou stranu bylo vytvořeno celkem 16 otvorů, každý o rozměrech 170×172 mm a do prvků zakrývající přední a zadní stranu bylo vyřezáno stejné množství otvorů, každý o rozměrech 179×180 mm.

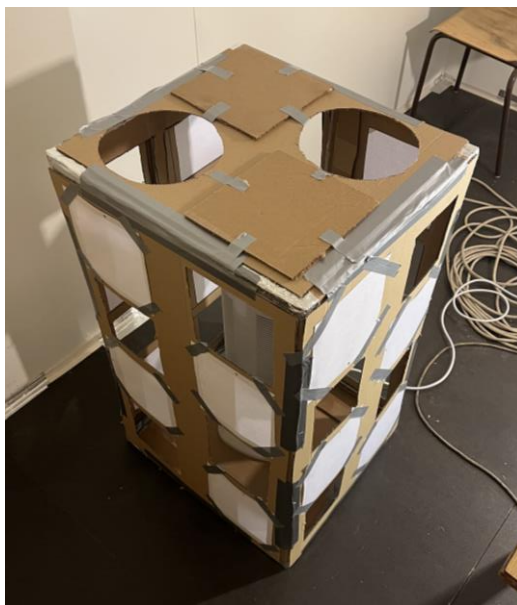


Obr. 59: Experimentální krabice při zakrytí 50 %

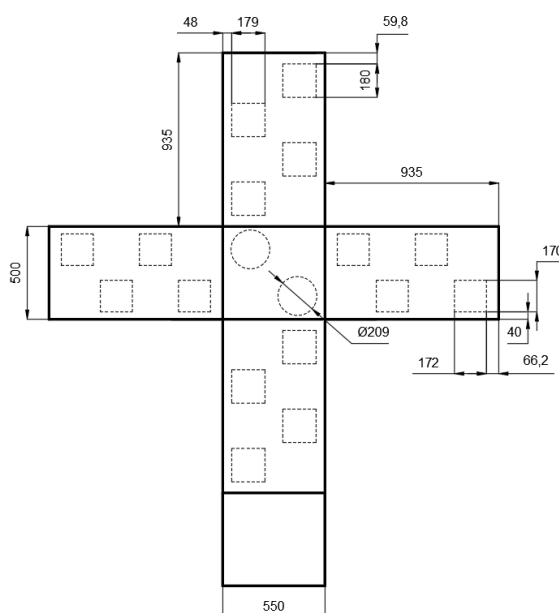


Obr. 60: Rozměry experimentální krabice při zakrytí 50 %

Pro provedení experimentu, při kterém byla čistička vzduchu rovnoměrně zakryta ze 75 %, byly použity prvky vytvořené při předchozím měření (zakrytí 50 %). Polovina z nich však byla přelepena kartonem či obyčejným papírem, čímž bylo docíleno požadovaného zakrytí. Reálnou podobu a rozměry krabice včetně rozmístění prázdných otvorů lze vidět na obrázcích č. 61 a 62.



Obr. 61: Experimentální krabice při zakrytí 75 %



Obr. 62: Rozměry experimentální krabice při zakrytí 75 %

8.2 Postup měření

Postup měření druhé samostatné fáze experimentální části diplomové práce je podobný jako při měření v části první. Oba kruhové otvory v komoře zůstaly pro všechna měření zaslepené a komora tedy byla těsná. Nejprve došlo k zapálení vonné tyčinky a zapnutí směšovacího ventilátoru. Tyčinka byla uhašena a ventilátor vypnut po cca pěti minutách, kdy došlo ke zvýšení koncentraci částic v místnosti nad hodnotu $1,5 \cdot 10^6$ částic/l. Poté byla zvolená čistička vzduchu vložena do upravené krabice o vybraném zakrytí (25, 50 a 75 %) a zapnuta na požadovaný režim. Koncentrace částic v jednotlivých frakcích byla opět po celou dobu experimentu zaznamenávána analyzátozem GRIMM 1.109 v šestisekundových intervalech.

Měření trvalo různě dlouho v závislosti na účinnosti měřené čističky vzduchu. Měření čističky Ionic probíhalo vždy přibližně 20 hodin, čistička Daikin byla měřena přibližně 15 hodin a čistička Haier 5 hodin. Po ukončení každého měření byly (stejně jako v první části) exportovány výsledky z programu DustMonitor do textového souboru a následně proběhlo jejich zpracování v programu Microsoft Excel.

8.3 Vyhodnocení účinností čističek vzduchu

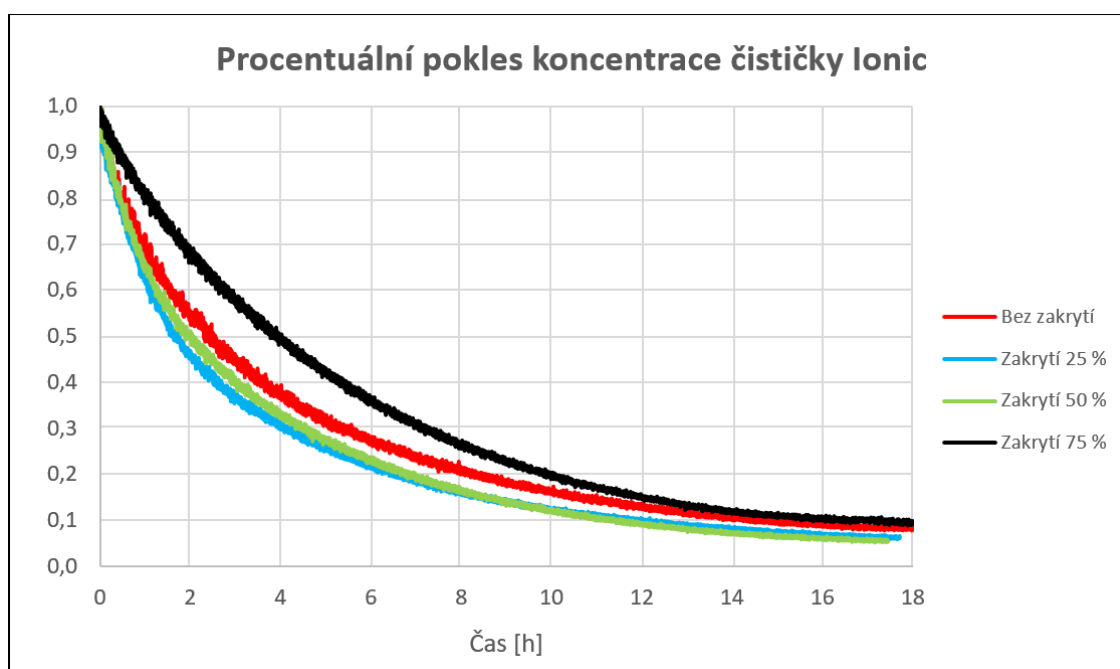
Během experimentu v laboratorní komoře bylo provedeno celkem devět měření pro tři čističky vzduchu se zakrytím 25, 50 a 75 %. Hodnoty pro měření čističky bez zákrytu jsou převzaty z první fáze experimentální části. Čističky vzduchu byly umístěny ve stejné pozici jako v první fázi. Výsledky měření jsou pro porovnání i vzhledem k mírně odlišné počáteční koncentraci vyjádřeny opět ve formě poměrného poklesu počáteční koncentrace tuhých částic. V dalších kapitolách budou podrobně popsány jednotlivé výsledky měření.

8.3.1 Čistička Ionic CARE Triton X6

Čistička vzduchu od firmy Ionic byla pro laboratorní komoru o objemu $45,36 \text{ m}^3$ měřena ve stejném režimu (HI - High) jako v první fázi experimentální části práce. Z obrázku č. 63, který porovnává časové průběhy koncentrace tuhých částic pro měřenou čističku při rozdílném zakrytí, je patrné, že při zakrytí 25 a 50 % došlo dokonce k mírnému zlepšení účinnosti čističky vzduchu, oproti měření bez zákrytu. Po dvou hodinách provozu čističky

bez zákrytu klesla původní koncentrace tuhých částic na 55,5 %, za stejný čas klesla koncentrace při zakrytí 25 % na 45,6 % a při zakrytí čističky z 50 % klesla koncentrace přibližně na polovinu (50 %). Čistička vzduchu Ionic CARE Triton X6 je totiž vybavena ionizátorem (iontovým generátorem), který funguje na principu usazování nabitých znečišťujících látek na nejbližších okolních plochách. Malé zakrytí (25 a 50 %) významně nebrání v přívodu znečišťujících látek do čističky a naopak mírně přispívá k zachytávání částic nabitých ionizátorem. Lze nicméně konstatovat, že ve skutečnosti nemají zakrytí v tomto rozsahu na provoz čističky podstatnější vliv.

Zakrytí čističky vzduchu ze 75 % bylo již natolik výrazné, že ovlivnilo přívod znečišťujících látek do čističky a mírně tak zhoršilo její účinnost, kdy po dvou hodinách klesla původní koncentrace tuhých částic na 68 %. Výsledky měření v číselné podobě jsou zobrazeny v tabulce č. 29.



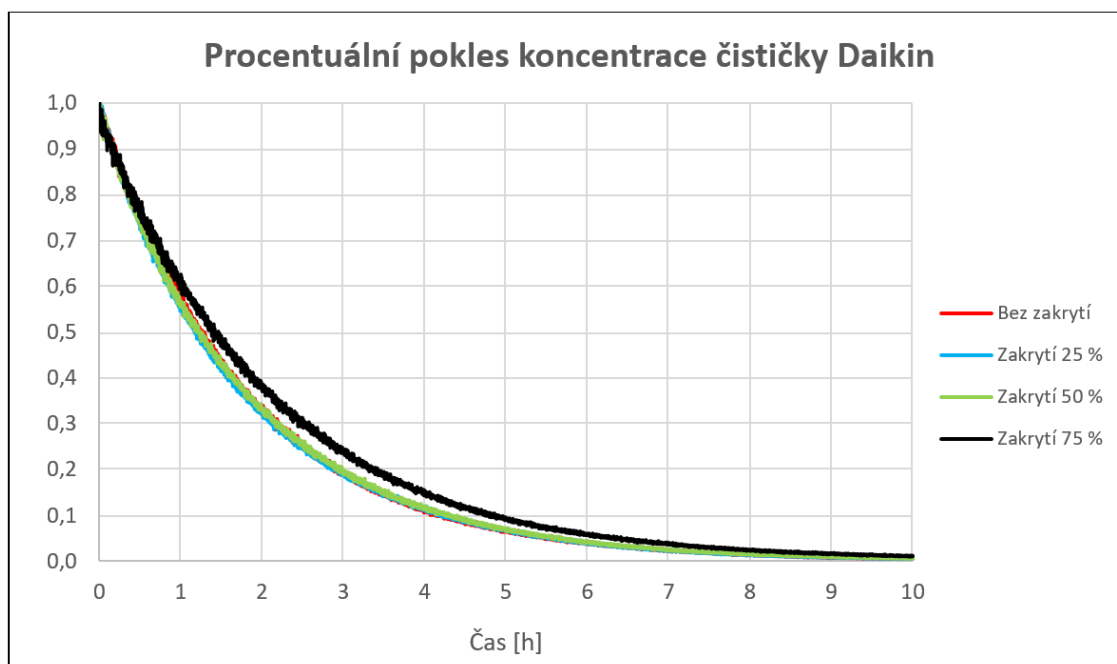
Obr. 63: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic pro čističku Ionic

Tab. 29: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic pro čističku Ionic

Čas [h]	Bez zakrytí [%]	Zakrytí 25 % [%]	Zakrytí 50 % [%]	Zakrytí 75 % [%]
0	100	100	100	100
1	71,5	62,7	65,5	81,1
2	55,5	45,6	49,9	68
4	38,7	29,7	32,2	49,6
6	26,9	21,9	22,9	35,6
8	20,4	16,1	16,4	26,1
10	15,9	12,2	12,3	19,7
12	13,3	10	9,4	14,8
14	10,6	8,4	7,3	11,9
16	8,8	6,8	5,8	9,8

8.3.2 Čistička Daikin MC 707 VM

Čistička vzduchu Daikin byla vzhledem k objemu laboratorní komory provozována v režimu nízkých otáček (L – Low). Z obrázku č. 64 je patrné, že procentuální pokles koncentrace tuhých částic se pro všechna měřená zakrytí lišil minimálně. Nejpomalejší pokles nastal dle očekávání při zakrytí čističky ze 75 %, nicméně jen nepatrně. Po jedné hodině provozu čističky bez zákrytu klesla původní koncentrace částic na 57 %, za stejný čas klesla koncentrace při zakrytí 25 % na 55,4 %, při zakrytí čističky z 50 % na 56,6 % a konečně při zakrytí ze 75 % klesla koncentrace na 61,8 % (viz tab. 30). Po deseti hodinách provozu se koncentrace částic ustálila přibližně na hodnotě 0,5 % pro všechna čtyři měření. Z naměřených dat lze tedy jednoznačně říci, že zakrytí, resp. nevhodné umístění čističky vzduchu Daikin MC 707 VM má na její provoz ve zkušební komoře jen minimální vliv, kdy se průběhy vyrovnají díky ventilátoru a současně ne příliš vysoké rychlosti poklesu koncentrace dosahované v nezakrytém stavu.



Obr. 64: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic pro čističku Daikin

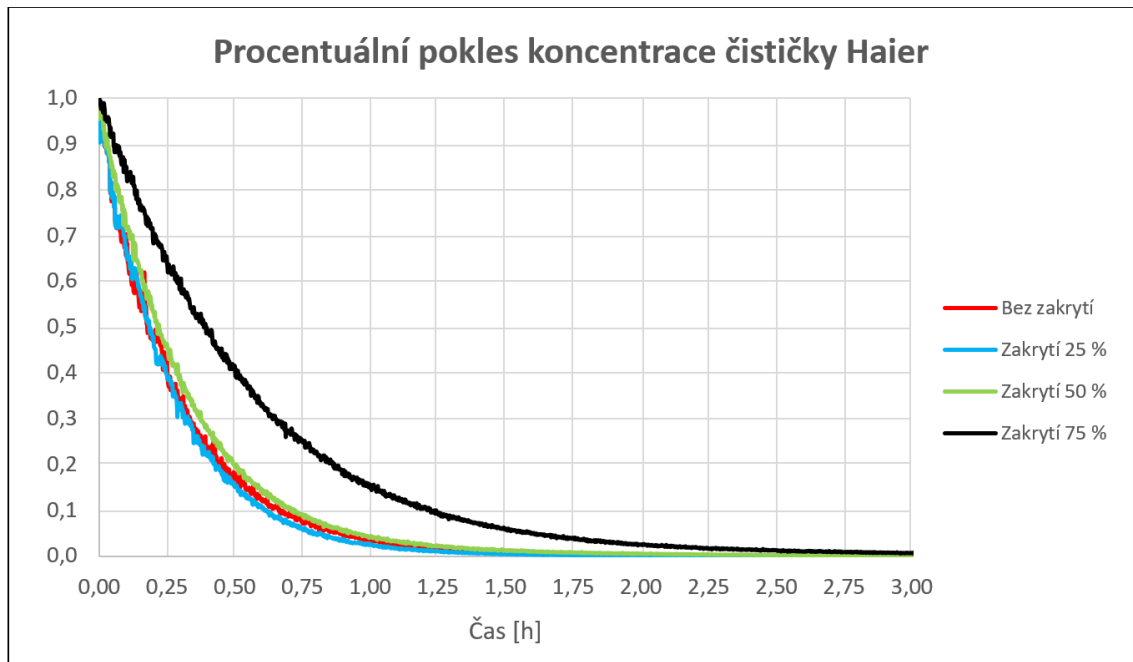
Tab. 30: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic pro čističku Daikin

Čas [h]	Bez zakrytí [%]	Zakrytí 25 % [%]	Zakrytí 50 % [%]	Zakrytí 75 % [%]
0	100	100	100	100
0,5	76	72,4	73,8	76,2
1	57	55,4	56,6	61,8
2	33,3	32,1	33	38,3
3	19	19,5	19,6	24,4
4	11,3	11,5	11,6	14,5
5	6,4	6,7	7,2	9,3
6	3,8	3,9	4,4	5,9
7	2,4	2,4	2,4	3,7
8	1,5	1,3	1,5	2,4
9	0,85	0,95	1,1	1,7
10	0,6	0,6	0,5	1,1

8.3.3 Čistička Haier KJF600KCAA

Čistička vzduchu od firmy Haier byla testována ve stejném režimu jako v první fázi experimentální části (režim 1). Z grafu na obrázku č. 65 vyplývá, že při zakrytí čističky z 25 a 50 % se průběhy koncentrace tuhých částic změnily oproti měření bez zákrytu pouze

minimálně. Po čtvrt hodině provozu čističky bez zákrytu klesla původní koncentrace tuhých částic na 42,6 %, za stejnou dobu klesla koncentrace při zakrytí 25 % na 39,4 % a při zakrytí čističky vzduchu z 50 % klesla koncentrace na 46,3 % (viz tab. 31). Ovšem výrazný rozdíl se již projevil, díky vysoké účinnosti čističky s rychlým poklesem koncentrace, při největším zakrytí čističky (ze 75 %), kdy po 15 minutách provozu klesla koncentrace tuhých částic na pouhých 64,2 %. K úplnému vyčištění komory došlo pro všechna měření přibližně po třech hodinách provozu čističky.



Obr. 65: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic pro čističku Haier

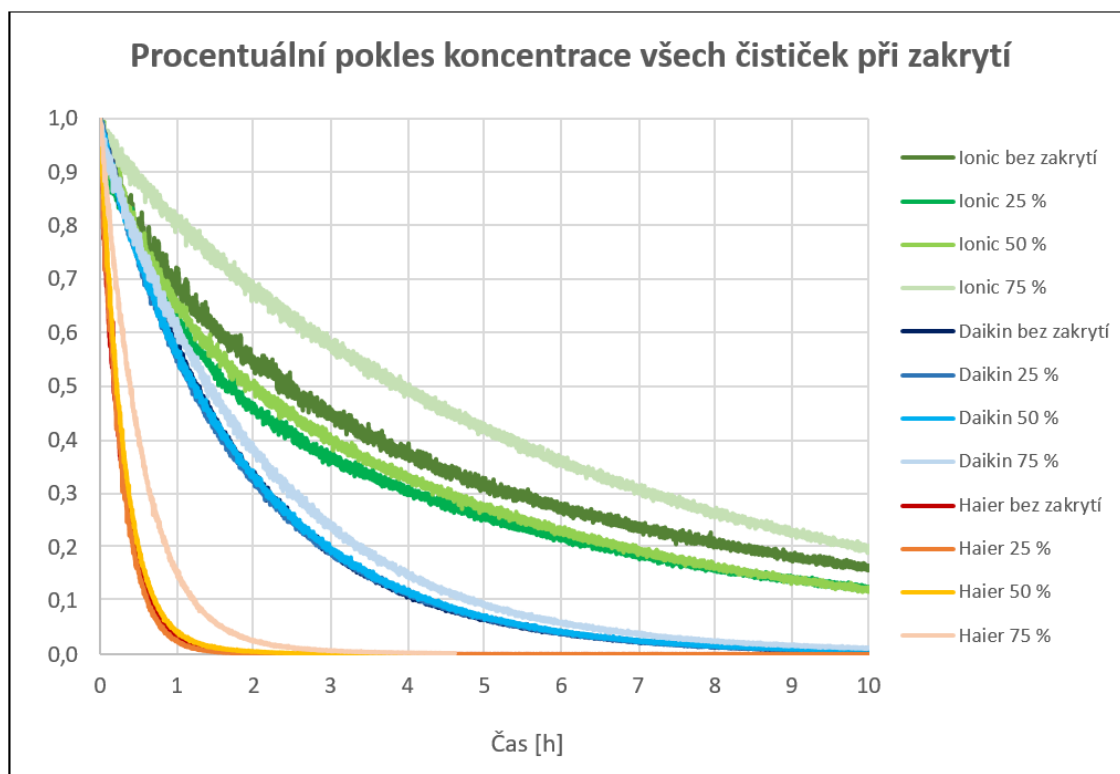
Tab. 31: Procentuální pokles koncentrace tuhých částic pro čističku Haier

Čas [h]	Bez zakrytí [%]	Zakrytí 25 % [%]	Zakrytí 50 % [%]	Zakrytí 75 % [%]
0	100	100	100	100
0,125	61	61,8	64,9	82,8
0,25	42,6	39,4	46,3	64,2
0,5	16,7	15,1	19,7	41,6
0,75	7,4	5,9	8,9	24,9
1	3,8	2,5	4,2	15,6
1,25	1,5	1,1	2,3	9,6
1,5	0,7	0,4	1,3	6
1,75	0,5	0,2	0,7	3,8
2	0,3	0,1	0,4	2,5
2,25	0,1	0,07	0,3	1,6
2,5	0,1	0,04	0,2	1,2
2,75	0,1	0,03	0,1	0,9
3	0,03	0	0,1	0,6

8.3.4 Celkové vyhodnocení

Z provedených měření vyplývá, že zakrytí čističky vzduchu z 25 a 50 % nemá na její provoz téměř žádný vliv. Rozdílná účinnost snižování koncentrace tuhých znečišťujících částic nastává až při výraznějším zakrytí čističky vzduchu. V případě této práce se jednalo o zakrytí čističky ze 75 %.

Jak vyplývá z obrázku č. 66, zakrytí mělo největší vliv na provoz čističky Haier KJF600KCAA, která je stále nejúčinnější ze tří měřených čističek, avšak její účinnost se oproti měření bez zákrytu zhoršila v některých okamžicích až o 28 %. Takto vysoký pokles byl s největší pravděpodobností způsoben vysokou účinností této čističky s rychlým poklesem koncentrace. Nejlépe vyšla z experimentu čistička vzduchu Daikin MC 707 VM, u které došlo ke zhoršení účinnosti nejvýše o 7 %. Větší zakrytí mělo na provoz této čističky ve zkušební komoře minimální vliv především proto, že se průběhy vyrovnaly díky ventilátoru, ale na rozdíl od čističky Haier nedocházelo k tak vysoké rychlosti poklesu koncentrace. Čistička Ionic CARE Triton X6 se vzhledem k maximálnímu zhoršení o 17 % nachází v rámci tohoto experimentu, který simuloval nevhodné umístění čističky vzduchu, mezi ostatními dvěma měřenými typy.



Obr. 66: Časový průběh snižování koncentrace tuhých částic pro všechny čističky

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se nejprve zaměřila na základní teorii částic a podrobněji popsala suspendované částice PM, včetně jejich negativního vlivu na lidské zdraví. Dále charakterizovala principy odlučování tuhých částic a stručně popsala čtyři základní skupiny odlučovačů. V dalších dvou kapitolách se práce nejprve věnovala aktuální situaci v oblasti třídění filtrů atmosférického vzduchu a poté samotné kvalitě vnitřního ovzduší z hlediska vnitřního mikroklimatu a legislativy. Poslední kapitola teoretické části byla již zaměřena na samotné čističky vzduchu, přičemž zde byly nejprve charakterizovány jednotlivé druhy filtrace v čističkách, následně stručně popsány různé světové hodnotící standardy, dále byla vypracována krátká rešerše zaměřená na hodnocení přenosných čističek vzduchu a na závěr byly uvedeny konkrétní typy čističek ze tří cenových kategorií.

První fáze experimentální části byla věnována srovnání čističek vzduchu Ionic CARE Triton X6 (režim High), Daikin MC 707 VM (režim Low) a Haier KJF600KCAA (režim 1) z hlediska snižování koncentrace tuhých znečišťujících částic. Jednotlivé režimy byly zvoleny na základě doporučení ohledně velikosti čištěného prostoru, kterým byla těsná laboratorní komora ($45,36 \text{ m}^3$) v halových laboratořích na Ústavu techniky prostředí. Komora obsahovala dva kruhové otvory, které musely být pro toto měření zcela utěsněny, aby nedocházelo k nežádoucí infiltraci. Jako zdroj znečištění sloužily vonné tyčinky, pomocí kterých bylo možné během pěti minut zvýšit koncentraci částic v komoře na více než $1,5 \cdot 10^6$ částic/l. Koncentrace částic v jednotlivých frakcích byla po celou dobu experimentu zaznamenávána analyzátozem GRIMM 1.109 v šestisekundových intervalech.

Pro porovnání bylo nejprve provedeno asi 70 hodin dlouhé měření bez čističky vzduchu, při kterém došlo vlivem depozice k poklesu koncentrace o 62 % z počáteční hodnoty $1,5 \cdot 10^6$ částic/l na hodnotu přibližně $0,56 \cdot 10^6$ částic/l. Výsledky měření jednotlivých čističek v uvedených režimech ukázaly, že z hlediska snižování koncentrace tuhých částic je nejúčinnější čistička od firmy Haier s vysoce účinným HEPA filtrem, která daný prostor dokázala vyčistit již po hodině provozu. Naopak nejméně účinná byla čistička Ionic obsahující pouze elektrostatický filtr, při jejímž použití došlo k vyčištění komory až po 18 hodinách.

V této fázi práce byla rovněž porovnávána účinnost čističek vzduchu s větráním, které bylo simulováno přívodem čerstvého vzduchu horním kruhovým otvorem z laboratoře

a odvodem znečištěného vzduchu otvorem spodním, na který navazovala clonková trať s ventilátorem Systemair K315 L EC. Celkem bylo provedeno šest měření s různě nastaveným průtokem ventilátoru. Křivce poklesu koncentrace při užití čističky vzduchu Daikin v režimu Low (120 m³/h) nejvíce odpovídala křivka při simulovaném větrání s průtokem 23,5 m³/h. Při větrání s průtokem 120 m³/h, který odpovídal nastavení čističky Daikin (Low), byl pokles koncentrace částic asi třikrát rychlejší, než u testované čističky. Hlavní příčinou byl přívod čistého okolního vzduchu při větrání a opětované nasávání již vyčištěného vzduchu čističkou. Pro čističku Haier v režimu 1 a simulované větrání vyšly srovnatelné průběhy při průtoku ventilátorem 160 m³/h.

Druhá samostatná fáze experimentální části této diplomové práce byla věnována porovnání účinnosti měřených čističek z hlediska snižování tuhých znečišťujících částic při rozdílném zakrytí, které simulovalo například nevhodné umístění čističky vzduchu v reálném provozu. Pro tento experiment byla využita krabice z pevného kartonu, pomocí které bylo postupně vytvořeno zakrytí jednotlivých čističek vzduchu z 25, 50 a 75 %. Výsledky měření ukázaly, že zakrytí z 25 a 50 % procent nemá téměř žádný vliv na účinnost měřených čističek. Zakrytí čističky ze 75 % procent mělo největší vliv na čističku Haier KJF600KCAA, jejíž účinnost se oproti měření bez zákrytu snížila v některých momentech až o 28 %. Nejlépe naopak při tomto experimentu vyšla čistička Daikin MC 707 VM, u které došlo při největším zakrytí ke zhoršení účinnosti maximálně o 7 %.

Na závěr lze říci, že většina běžně dostupných čističek vzduchu je schopna velice účinně snížit koncentraci tuhých znečišťujících částic ve vnitřním prostředí. Dražší čističky s kvalitnější vícestupňovou filtrací a ventilátorem (Haier a Daikin) se na požadovanou koncentraci většinou dostanou za kratší čas, než levnější elektrostatické čističky (Ionic), i ty jsou však schopné po určitém čase dosáhnout stejně kvalitního prostředí. Rovněž lze prohlásit, že menší zakrytí čističek nemá na provoz čističek vzduchu téměř žádný vliv.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HEMERKA J. a VYBÍRAL P.: *Ochrana ovzduší*, v Praze, ČVUT, 2010, ISBN 978-80-01-04646-3.
- [2] Portál Českého hydrometeorologického ústavu, *Ročenka „Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2021“* [online], ČHMÚ v Praze, 2021. Dostupné z: https://www.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/21groc/gr21cz/UKO_rocenka_2021_komplet.pdf
- [3] HEMERKA J.: *Odlučování tuhých částic*, ČVUT v Praze, 1994, ISBN 80-01-01088-0
- [4] OBROUČKA K.: *Látky znečišťující ovzduší*, Ostrava, VŠB – TU, 2001, ISBN 80-248-0011-X
- [5] MATUŠKA T.: *Experimentální metody v technice prostředí*, ČVUT v Praze, 2005, ISBN 80-01-03291-4
- [6] CAFE working group on PM (Edwards L., a kol.), *Second Possition Paper on Particulate Matter* [online], 2004. Dostupné z: https://ec.europa.eu/environment/archives/cape/pdf/working_groups/2nd_position_paper_pm.pdf
- [7] PDF.corahb.net, *Co je filtr pevných částic a k čemu slouží?* [online]. Dostupné z: <https://dpf.corahb.net/dotazy.html>
- [8] European Environment Agency, *Premature deaths due to air pollution continue to fall in the EU, more efforts needed to deliver a toxic-free environment* [online]. Dostupné z: <https://www.eea.europa.eu/highlights/premature-deaths-due-to-air>
- [9] LANDLOVÁ L.: *Studium perzistentních organických polutantů vázaných na prachové částice v atmosféře – jejich distribuce, osud a efekt*, MU v Brně, 2008, diplomová práce, vedoucí práce: Jana Klánová
- [10] C. TERZANO, F. DI STEFANO, V. CONTI, E. GRAZIANI, A. PETROIANNI.: *Air pollution ultrafine particles: toxicity beyond the lung* [online], 2010. Dostupné z: <http://www.europeanreview.org/wp/wp-content/uploads/824.pdf>
- [11] PRAŽNIKAR Z., PRAŽNIKAR J.: *The effects of particulate matter air pollution on respiratory health and on the cardiovascular systém* [online], 2012. Dostupné z: <https://sciendo.com/article/10.2478/v10152-012-0022-z>
- [12] HEMERKA J., VYBÍRAL P.: *Filtrace atmosférického vzduchu*, ČVUT v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04902-0
- [13] KVASNIČKA K.: *Návrh a vývoj elektrostatického odlučovače*, VUT v Brně, 2018, diplomová práce, vedoucí práce: Michal Ptáček

- [14] ZÁRYBNICKÁ M.: *Odloučení tuhých částic ve spalínách* [online], VUT v Brně, projekt. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/20_Obnova-a-tvorba-ZP_52-53/52_IUT/129_Odlucovani-tuhych-castic-ve-spalinach---Zarybnicka---P1.pdf
- [15] HEMERKA J.: *Filtrace atmosférického vzduchu II* [online], portál tzb-info, 2009. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/potrubi-a-jeho-soucasti/5843-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-ii>
- [16] HEMERKA J., VYBÍRAL P.: *Převod tříd filtrů mezi ČSN EN 779 a ČSN ISO 16890-1* [online], VVI 4/2020 s. 152 – 158. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/92241/Hemerka_Vybiral__Prevod_tr_id_filtru_mezi_CSN_EN_779_a_CSN_ISO_168901__%282020%29_PUBV_342919.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [17] HEMERKA J.: *Filtrace pro vzduchotechnická zařízení*, 2020
- [18] HEMERKA J., VYBÍRAL P.: *Změny ve třídění vysoce účinných filtrů atmosférického vzduchu* [online], VVI 2/2021 s. 86 – 93. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/94264/Hemerka_Vybiral__Zmeny_ve_trideni_vysoce_ucinnych_filtru_atmosferickeho_vzduchu__%282021%29_PUBV_349925.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [19] DOLEŽÍLKOVÁ H.: *Interakce venkovního a vnitřního ovzduší* [online], portál tzb-info, 2010. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/6486-kvalita-vnejsiho-a-vnitriho-vzduchu>
- [20] JOKL M.: *Zdravé obytné a pracovní prostředí*, ČVUT v Praze, 2002, ISBN 80-200-0928-0
- [21] DOBIÁŠOVÁ L.: *Modelování vnitřního prostředí v interakci s člověkem*, ČVUT v Praze, 2019, disertační práce, školitel: Daniel Adamovský
- [22] JOKL M. V.: *Teorie vnitřního prostředí budov*, ČVUT v Praze, 1993, ISBN 80-01-00481-3
- [23] ZMRHAL V.: *Hygienické hodnocení škodlivin ve vnitřním ovzduší a návrh větrání* [online], VVI 3/2013 s. 98 – 100. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/~zmrhavla/Publikace/VVI-2013-03_p098.pdf
- [24] ZMRHAL V.: *Prezentace z předmětu větrání („Úvod do větrání, bilance větraného prostoru“)* [online], ČVUT v Praze, Dostupné z: <http://users.fs.cvut.cz/vladimir.zmrhal/language/cs/vyuka/vetrani/>
- [25] MATHAUSEROVÁ Z.: *Požadavky na kvalitu vnitřního prostředí budov – mikroklimatické podmínky a větrání* [online], portál tzb-info, 2009. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vetrani-klimatizace/5593-pozadavky-na-kvalitu-vnitriho-prostredi-budov-mikroklimaticke-podminky-a-vetrani>
- [26] *Zákony pro lidi, Zákon č. 283/2021 Sb., stavební zákon* [online]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2021-283/zneni-20230701#p334_p334-1

- [27] Zákony pro lidi, *Zákon č. 372/2011 Sb., zákon o zdravotních službách* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/nabidka/cs/2011-372/zneni-20120401#p128-1>
- [28] Zákony pro lidi, *Zákon č. 258/2000 Sb., zákon o ochraně veřejného zdraví v platném znění* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2000-258>
- [29] Zákony pro lidi, *Zákon č. 262/2006 Sb., zákoník práce* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-262?text=Z%C3%A1kon+%C4%8D.+262%2F2006+Sb.%2C>
- [30] Zákony pro lidi, *Zákon č. 309/2006 Sb., zákon o zajištění dalších podmínek bezpečnosti a ochrany zdraví při práci* [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2006-309?text=Z%C3%A1kon+%C4%8D.+309%2F2006+Sb.%2C>
- [31] Merriam-Webster dictionary, *Definition of Air Purifier* [online]. Dostupné z: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/air%20purifier>
- [32] ELEMENTAL Air Systems, *The 5 Methods of Air Purification* [online]. Dostupné z: <https://elementalairsystems.com/blogs/air-education-blog/the-5-methods-of-air-purification>
- [33] Lab Supply Network, *Difference Between a HEPA and ULPA Filter* [online]. Dostupné z: <https://www.laboratory-supply.net/blog/difference-between-a-hepa-and-ulpa-filter/>
- [34] United States Environmental Protection Agency, *What is a HEPA filter?* [online]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-hepa-filter>
- [35] SanaLife, *Activated carbon filtration* [online]. Dostupné z: <https://www.sanalifewellness.com/blog/activated-carbon-filtration>
- [36] HVAC global, *What is electrostatic filter?* [online]. Dostupné z: <https://hvacglobal.org/2022/02/09/what-is-electro-static-filter/>
- [37] Vzduchotechnik Chrastava, *Elektrostatické filtrační soustavy* [online]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnik.cz/vyrobky/elektrostaticke-filtry/>
- [38] RiansDeal, *Electrostatic air filter: working principle, usage, props and cons* [online]. Dostupné z: <https://www.riansdeal.com/electrostatic-air-filter/>
- [39] HeathLine, *How does and air ionizer work?* [online]. Dostupné z: <https://www.healthline.com/health/what-does-an-ionizer-do>
- [40] IQAir, *Are UV air purifiers worth it?* [online]. Dostupné z: <https://www.iqair.com/newsroom/are-uv-air-purifiers-worth-it>
- [41] Ionmax, *How does a UV air purifier protect you from bacteria and viruses?* [online]. Dostupné z: <https://ionmax.com.au/blogs/resources/uv-light-in-air-purifiers>
- [42] PureEnrichment, *PureZone 3-in-1 air purifier* [online]. Dostupné z: <https://pureenrichment.com/products/purezone-3-in-1-true-hepa-air-purifier>

- [43] FEI H., WOOJUNG W., WONYONG CH.: *Photocatalytic air purification mimicking the self-cleaning proces of the atmosphere* [online], nature communications, 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22839-0>
- [44] ExplainThatStuff, *Photocatalytic air purifiers* [online]. Dostupné z: <https://www.explainthatstuff.com/how-photocatalytic-air-purifiers-work.html>
- [45] Airtecnicos, *Purification and Disinfection Photocatalytic Fan Kleenfan* [online]. Dostupné z: <https://www.airtecnicos.com/products/purification-and-disinfection-photocatalytic-fan-kleenfan>
- [46] ZdravíOnline, *Čistička vzduchu Airbi Fresh* [online]. Dostupné z: <https://www.zdravionline.cz/p/Cisticka-vzduchu-Airbi-Fresh?phone=0>
- [47] Learn Metrics, *Understanding CADR Rating* [online]. Dostupné z: <https://learnmetrics.com/cadr-rating/>
- [48] GINESTET A.: *Development and evaluation of new test method for portable air cleaners* [online], International energy agency. Dostupné z: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/CR/CR15_New%20test%20method%20for%20portable%20air%20cleaners.pdf
- [49] SAAR R.: *Test method for rating performance of portable room air cleaners* [online], Director of Standards and Cerification Association of Home Appliance Manufactures. Dostupné z: https://nanopdf.com/download/epa-room-air-cleaner-energy-star-program_pdf
- [50] KWANG-CHUL N., MYUNG-DO O.: *Variation of clean air delivery and effective air cleaning ratio of room air cleaning devices* [online], Building and Environment č. 84, s. 44 – 49. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132314003527>
- [51] MámeDoma, *Čistička vzduchu Breville 360° Light Protect BAP007X* [online]. Dostupné z: <https://www.mamedoma.cz/cisticky-vzduchu/breville-bap007x/>
- [52] AHAM Verifide, *Frequently asked questions about testing of portable air cleaners* [online]. Dostupné z: <https://ahamverifide.org/wp-content/uploads/2020/09/Testing-of-Portable-Air-Cleaner-Performance-FAQs-2020-Updates.pdf>
- [53] ALIREZA A., MO J., TIAN E., SEPPÄNEN O.: *Testing portable air cleaning units – test methods and standards: a critical review* [online], REHVA Journal č. 3/2022, s. 35 – 46. Dostupné z: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/testing-portable-air-cleaning-units-test-methods-and-standards-a-critical-review>
- [54] IQAir, *Air purifier long-term performance: CCM vs CADR* [online]. Dostupné z: <https://www.iqair.com/newsroom/measure-air-purifier-long-term-performance-CCM>
- [55] KIRKMAN S., ZHAI J., MILLER S. L.: *Effectivness of air cleaners for removal of virus-containing respiratory droplets: Recommendations for air cleaner selection for campus spaces* [online]. Dostupné z: <https://shellym80304.files.wordpress.com/2020/06/air-cleaner-report.pdf>

- [56] Chinese Standard, *GB/T18801-2015* [online]. Dostupné z: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT18801-2015>
- [57] GINESTET A., BLONDEAU P., FROCHOT D., KALUZNY P., CHRISTINE M.: *A new test method for indoor air cleaner efficiency determination and harmless assessment* [online], *Indoor Air* 2008. Dostupné z: https://www.academia.edu/42376798/A_new_test_method_for_indoor_air_cleaner_efficiency_determination_and_harmless_assessment
- [58] BERNE Ph., BROUARD C., GOLANSKI L., ROUSSEY A., WAYSER B., GUIOT A., CLAVAGUERA S., DELLÉA O.: *Comparative study of commercial home air cleaners* [online], *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 609 (2019). Dostupné z: 10.1088/1757-899X/609/4/042076
- [59] VAN DER HEIDE S., VAN AALDEREN W., KAUFFMAN H., DUBOIS H., DE MONCHY J.: *Clinical effects of air cleaners in homes of asthmatic children sensitized to pet allergens* [online], *Journal of Allergy and Clinical Immunology* č. 104 (1999), s. 447 – 451. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0091-6749\(99\)70391-X](https://doi.org/10.1016/S0091-6749(99)70391-X)
- [60] SHAUGHNESSY R., LEVETIN E., BLOCKER J., SUBLETTE K.: *Effectiveness of Portable Indoor Air Cleaners: Sensory Testing Results* [online], *Indoor Air* č. 4 (1994), s. 179 – 188. Dostupné z: 10.1111/j.1600-0668.1994.t01-1-00006.x
- [61] KÜPPER M., ASBACH CH., SCHNEIDERWIND U., FINGER H., SPIEGELHOFF D., SCHUMACHER S.: *Testing of an Indoor Air Cleaner for Particulate Pollutants under Realistic Conditions in an Office Room* [online], *Aerosol and Air Quality Research* č. 19, s. 1655 – 1665. Dostupné z: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.01.0029>
- [62] SCHUMACHER S., SPIEGELHOFF D., SCHNEIDERWIND U., FINGER H., ASBACH CH.: *Performance of New and Artificially Aged Electret filters in Indoor Air Cleaners* [online], *Chemical Engineering Technology* č. 41, s. 27 – 34. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/ceat.201700105>
- [63] NOVOSELAC A., SIEGEL A.: *Impact of placement of portable air cleaning devices in multizone residential environments* [online], *Building and Environment* č. 44, s. 2348 – 2356. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.023>
- [64] WARING M., SIEGEL J., CORSI R.: *Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners* [online], *Atmospheric Environment* č. 42, s. 5003 – 5014. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.011>
- [65] COOPER E., WANG Y., STAMP S., BURMAN E., MUMOVIC D.: *Use of portable air purifiers in homes: Operating behavior, effect on indoor PM_{2.5} and perceived indoor air quality* [online], *Building and Environment* č. 191. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107621>
- [66] Váš pomocník, *Testy nejlepších čističek vzduchu 2023 spolu s recenzemi* [online], Tomáš Křišťál. Dostupné z: <https://vas-pomocnik.cz/cisticky-vzduchu/#test-cisticek-vzduchu-do-5-000-korun>

- [67] GRIMM Aerosol Technik GmbH & Co. KG, *Manuál Portable Laser Aerosolspectrometer and Dust Monitor Model 1.108/1.109* [online]. Dostupné z: <https://cires1.colorado.edu/jimenez-group/Manuals/Grimm OPC Manual.pdf>
- [68] Systemair, *Ventilátor K 315L EC* [online]. Dostupné z: <https://shop.systemair.com/cs-CZ/k--315--l--ec/p101545>
- [69] Ionic CARE, *Ionic-CARE Triton X6* [online]. Dostupné z: <https://www.ionic-care.cz/o-ionic-care.html>
- [70] ProAlergiky, *Čistička vzduchu Daikin MC 707* [online]. Dostupné z: <https://proalergiky.cz/eshop/cisticka-vzduchu-daikin.html>
- [71] DAIKIN, *Product MC707* [online]. Dostupné z: https://www.daikin-ksa.com/en_us/products/product.html/MC707.html
- [72] ProAlergiky, *Návod k obsluze čističky vzduchu Daikin MC 707* [online]. Dostupné z: https://proalergiky.cz/eshop/datove_uloziste/ke_stazeni/navod-Daikin-C707.pdf
- [73] KlimaLevně, *Čistička vzduchu Haier KJF600KCAA* [online]. Dostupné z: <https://www.klimalevne.cz/produkt/cisticka-vzduchu-haier-500-m3-h/>
- [74] Haier, *Users manual Haier KJF600KCAA* [online]. Dostupné z: <https://image.haier.com/th/air-purifier/W020210505688584758061.pdf>
- [75] QIAN H., LI Y., SUN H., NIELSEN P. V., HUANG X., ZHENG X.: *Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in simulated hospital ward* [online], *Building Simulation* č. 3, s. 215 – 224. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12273-010-0005-4>

PŘÍLOHY

Součástí této práce je CD obsahující:

- 1) Diplomovou práci ve formátu PDF
- 2) Dva soubory naměřených dat a vyhodnocení čističek vzduchu ve formátech XLSX