

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

FILTRAČNÍ MATERIÁLY PRO PRŮMYSLOVOU  
A VZDUCHOVOU FILTRACI

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# Anotace

V této práci jsou popsány teoretické základy atmosférické a průmyslové filtrace, základní principy separace částic, provedení atmosférických i průmyslových filtrů včetně jejich třídění a způsobu regenerace.

Dále se tato práce věnuje filtračním materiálům, jejich rozdělení a různým druhům povrchových úprav. Část práce je věnována technologii nanovláken včetně popisu jejich výroby a využití ve filtraci plynů.

V experimentální části byly provedeny orientační zkoušky frakční odlučivosti částic na čtyřech vzorcích filtračních materiálů, používaných k výrobě ochranných pomůcek a opatřených nanovlákenou membránou.

# Abstract

This work describes theoretical basis of atmospheric and industrial filtration, fundamental principles of particle separation, design of atmospheric and industrial filters including their classification and method of regeneration.

Furthermore, the study deals with filtration materials, their classification and various kinds of surface modifications. One part is devoted to the technology of nanofibers, includes a description of their fabrication and their application in gas filtration.

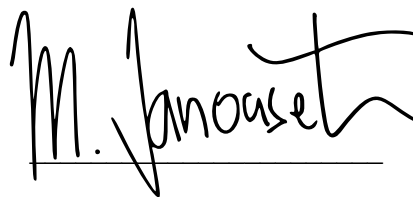
Indicative tests of fractional separability were run in the experimental part, examining four samples of filtration materials used to manufacture safety equipment and provided with membrane of nanofibers.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího bakalářské práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků bakalářské práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne 12. 1. 2017.

Podpis:

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Janoušek', written over a horizontal line.

Miroslav Janoušek

# Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval své rodině a všem svým přátelům a blízkým, kteří za mnou v průběhu psaní této práce stáli. Především však chci poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Vybíralovi Ph.D. za příkladné vedení a všechny jím poskytnuté vědomosti a materiály.

# Obsah

<b>1.</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Základy filtrace</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Atmosférická filtrace</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2</b>	<b>Průmyslová filtrace</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3</b>	<b>Základní pojmy</b> .....	<b>6</b>
2.3.1	Odlučivost čisté vláknité vrstvy .....	6
2.3.2	Tlaková ztráta čisté vláknité vrstvy .....	9
2.3.3	Kinetika filtrace.....	10
<b>3.</b>	<b>Základní principy separace částic</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Gravitační princip</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Setrvačný a odstředivý princip</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Elektrický princip</b> .....	<b>15</b>
<b>3.4</b>	<b>Difúzní princip</b> .....	<b>16</b>
<b>3.5</b>	<b>Intercepční princip</b> .....	<b>17</b>
<b>3.6</b>	<b>Sítový princip</b> .....	<b>19</b>
<b>3.7</b>	<b>Kombinace odlučovacích principů</b> .....	<b>20</b>
<b>4.</b>	<b>Provedení filtrů</b> .....	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Provedení atmosférických filtrů</b> .....	<b>21</b>
4.1.1	Třídění atmosférických filtrů.....	21
4.1.2	Druhy atmosférických filtrů .....	23
<b>4.2</b>	<b>Provedení průmyslových filtrů</b> .....	<b>24</b>
<b>5.</b>	<b>Regenerace filtrů</b> .....	<b>28</b>
<b>5.1</b>	<b>Regenerace zpětným proplachem</b> .....	<b>28</b>
<b>5.2</b>	<b>Regenerace pulsním rázem (<i>pulse-jet</i>)</b> .....	<b>29</b>
<b>6.</b>	<b>Filtrační materiály</b> .....	<b>31</b>
<b>6.1</b>	<b>Rozdělení filtračních materiálů v atmosférické filtraci</b> .....	<b>31</b>
6.1.1	Jednoduché filtrační materiály .....	31
6.1.2	Vláknité filtrační materiály .....	33
6.1.3	Porézní hmoty pro sorpční filtry .....	35
<b>6.2</b>	<b>Rozdělení filtračních materiálů v průmyslové filtraci</b> .....	<b>36</b>
<b>6.3</b>	<b>Povrchové úpravy</b> .....	<b>42</b>
<b>7.</b>	<b>Technologie nanovláken</b> .....	<b>47</b>
<b>7.1</b>	<b>Charakteristika a vlastnosti nanovláken</b> .....	<b>47</b>
<b>7.2</b>	<b>Výroba nanovláken</b> .....	<b>50</b>
7.2.1	Elektrospinning .....	50
7.2.2	Metoda „melt-blown“ .....	53
7.2.3	Ostatní metody .....	54

<b>7.3</b>	<b>Použití nanovláken .....</b>	<b>56</b>
7.3.1	V atmosférické filtraci .....	56
7.3.2	V průmyslové filtraci.....	63
<b>8.</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>65</b>
<b>8.1</b>	<b>Cíle měření.....</b>	<b>66</b>
<b>8.2</b>	<b>Popis měření .....</b>	<b>66</b>
8.2.1	Popis experimentální trati.....	66
8.2.2	Optický analyzátor GRIMM model 1.109.....	67
<b>8.3</b>	<b>Postup měření .....</b>	<b>69</b>
<b>8.4</b>	<b>Naměření hodnoty .....</b>	<b>72</b>
8.4.1	Vzorek E .....	72
8.4.2	Vzorek F.....	74
8.4.3	Vzorek G.....	76
8.4.4	Vzorek H.....	77
8.4.5	Výstupy z měření vzorků A, B, C a D.....	79
<b>8.5</b>	<b>Vyhodnocení .....</b>	<b>82</b>
<b>9.</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>84</b>
<b>10.</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>86</b>

# Seznam použitých veličin

Označení	Název	Jednotka
$A$	čelní plocha vláknité vrstvy	$[m^2]$
$a$	velikost částice	$[m]$
$C_v$	výstupní koncentrace	$[mg/m^3]$
$c$	objemové zaplnění	$[-]$
$D_B$	součinitel tepelné difúze	$[m^2/s]$
$d$	průměr vlákna	$[m]$
$d_f$	velikost překážky	$[m]$
$d_p$	velikost částice	$[m]$
$F_\tau$	aerodynamický odpor	$[N]$
$h$	tloušťka filtračního materiálu	$[m]$
$Kn$	Knudsenovo kritérium	$[-]$
$l$	délka vláken	$[m]$
$M_z$	hmotnost zachycených částic	$[kg]$
$O_c$	celková odlučivost	$[%]$
$O_f$	frakční odlučivost vrstvy	$[-]$
$O_{f,i}$	frakční odlučivost částic na izolovaném vlákne	$[-]$
$O_{f,dif}$	frakční odlučivost izolovaného vlákna vlivem difúze	$[-]$
$O_{f,dif+int}$	frakční odlučivost izolovaného vlákna vlivem difúze a intercepce	$[-]$
$O_{f,dod}$	dodatečný člen frakční odlučivosti	$[-]$
$O_{f,int}$	frakční odlučivost izolovaného vlákna vlivem intercepce	$[-]$
$P$	průnik částic	$[-]$
$\Delta p_z$	tlaková ztráta	$[Pa]$
$Q$	faktor kvality	$[-]$
$R$	poloměr vlákna	$[m]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[-]$

$S$	celková plocha usazovacích elektrod	$[m^2]$
$Stk$	Stokesovo číslo	$[-]$
$s$	tloušťka vrstvy	$[m]$
$u_k$	konečná odlučovací rychlost částice	$[m/s]$
$V$	objemový průtok vzduchu	$[m^3/s]$
$v$	rychlost proudu plynu	$[m/s]$
$\bar{x}$	difúzní mezní vrstva	$[m]$

### Řecká abeceda

$\alpha$	parametr intercepce	$[-]$
$\gamma_1$	korekční součinitel izolovaného vlákna	$[-]$
$\gamma_2$	korekční součinitel izolovaného vlákna	$[-]$
$\epsilon$	poréznost	$[-]$
$\eta$	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\lambda$	parametr vrstvy	$[-]$
$\lambda_l$	střední volná dráha molekul plynu	$[m]$
$\Pi$	bezrozměrná tlaková ztráta	$[-]$



# 1. Úvod

Tlak na filtraci tuhých znečišťujících látek každým rokem stoupá a z ochrany ovzduší se postupem let stala celospolečenská problematika s dopadem na jednotlivce. Důsledky znečišťování prostředí se společnost zabývá již delší dobu. Například v roce 1983 vydalo Státní zemědělské nakladatelství v Praze text, kde se autoři Ivan Novák a jeho kolektiv zabírají, ve stejnojmenné knize, ochranou ovzduší v ČSSR a kde jasně deklarují, že „...se řadí (pozn.: Československo) mezi země s nejvíce znečišťovaným ovzduším. Z toho vyplývá rozsah hospodářských, technických, zdravotních, ekologických a společenských problémů. Jejich závažnost je dána soustředěním průmyslu a výroby energie v několika vysoce industrializovaných a urbanizovaných oblastech státu.“ [1]

Tento stav se od roku 1983 do nedávné doby výrazně zlepšoval a mezi lety 1990 až 2000 docházelo k výraznému poklesu emisí částic  $SO_2$ ,  $NO_x$ ,  $NH_3$ ,  $VOC$  i tuhých znečišťujících látek ( $TZL$ ). Tato skutečnost byla dána především porevoluční přeměnou československého a od roku 1993 českého průmyslu a vstupem země do Evropské unie a přijetím její přísnější legislativy na ochranu ovzduší. V tomto období také docházelo ke strukturálním změnám, plynofikaci a rozvoji jaderné energetiky. [2] Po roce 2000 došlo k útlumu a změny jsou méně výrazné. V některých případech dokonce množství emisí krátkodobě vzrostlo. U  $VOC$ ,  $NO_x$  a  $SO_2$  došlo mezi lety 2000 až 2007 ke stagnaci. Tento stav se v následujících letech podařilo v některých případech zvrátit.

Jedním z důvodů současného pomalého tempa poklesu některých znečišťujících látek v ovzduší je i rozvoj automobilové dopravy na území státu. To se mimo jiné projevuje zvýšeným výskytem jemných částic  $TZL$  a  $NO_x$ . Dále se na emisích podílejí stacionární zdroje jako jsou například teplárny, uhelné elektrárny a lokální topeniště.

Jak je z výše uvedeného patrné, nebezpečné částice ovlivňují způsob a kvalitu života každého z nás a je potřeba se jejich regulací zabývat.

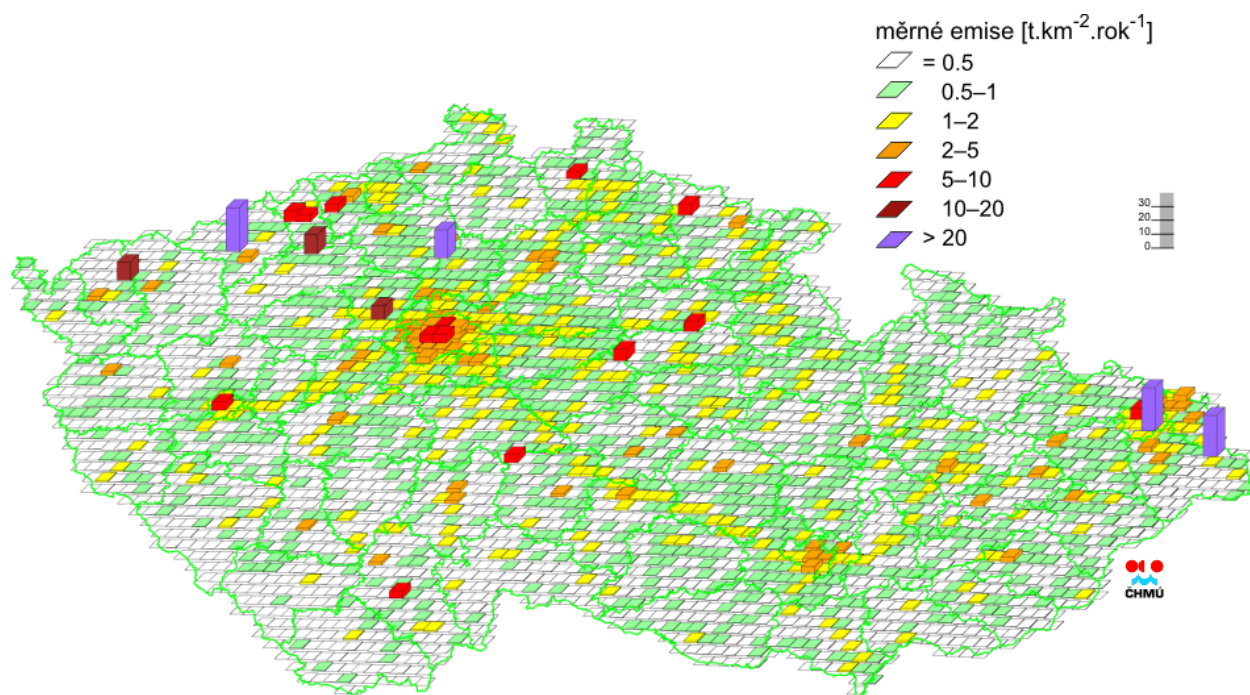
**Cílem této práce** je zhodnocení v současnosti používaných materiálů a filtračních systémů jak pro průmyslovou, tak pro atmosférickou filtraci, jejichž pomocí chráníme ovzduší a tím i naši společnost před vlivem škodlivin.

I díky současnému rozvoji nových materiálů jako jsou nanotextilie, a efektivnějšímu způsobu využití odlučovacích principů, lze v současné době dosáhnout účinnosti odlučování filtračních systémů až na úroveň vyšší, než je 99,99 % všech odloučených částic. Právě princip technologie nanovláken, na jejichž výzkumu se podílí čeští vědci a která dnes tvoří jeden z nejperspektivnějších způsobů filtrace budoucnosti, je popsán v samostatné podkapitole filtračních materiálů. Na měření jejich odlučivosti je postavena i praktická část této bakalářské práce, kde se experimentálním měřením na zkušební trati zkoumal vliv filtrační nanotextilie na množství nečistot.

## 2. Základy filtrace

V atmosférickém vzduchu se nachází mnoho znečišťujících příměsí jako je oxid siřičitý ( $SO_2$ ), vznikající při spalování fosilních paliv, oxidy dusíku ( $NO_x$ ) tvořené oxidem dusnatým ( $NO$ ) a dusičitým ( $NO_2$ ), které vznikají při spalovacích procesech, oxid uhelnatý ( $CO$ ) a další tuhé znečišťující látky.

Ve dvacátém století představovaly největšího znečišťovatele ovzduší především oxidy dusíku, prašný aerosol a oxid siřičitý. To se na prahu století jednadvacátého, i přes různá opatření, jako je využití znalostí filtrace ve spalovnách a těžkém průmyslu, příliš nezměnilo, a tak i v 21. století suspendované částice, které zůstávají po dlouho dobu v atmosféře a dále na ně vázané látky, jako jsou například těžké kovy apod., nadále představují značné nebezpečí pro zdraví jedince. [3]



Obr. 2.1.1 – Emisní hustoty tuhých znečišťujících látek vyobrazených ve čtvercích 5 x 5 km, 2011. [4]

Na obrázku 2.1 jsou k roku 2011 ve formě čtverců o rozměrech 5 x 5 km vyznačeny oblasti s naměřeným množstvím měrných emisí v  $t/m^2$  za daný rok. Zelená a bílá barva vyznačují nízké hodnoty naměřených emisí. Žlutou až červenou barvou pak oblasti s jejich zvýšeným výskytem. Fialovou jsou pak vyznačeny oblasti s velmi vysokou koncentrací znečišťujících látek. Z mapy je patrné především vážné znečištění okolí Mělníka, Ostravska a Ústecka způsobeného stacionárními zdroji znečištění a vyšší míru znečištění hlavních dopravních tepen a velkých měst vlivem působení mobilních zdrojů.

Pro zachování, případně zlepšení kvality ovzduší, zajištění funkce strojů, ale i z dalších důvodů je nutná filtrace. Ta pracuje na principu separace tuhých částic z nosných plynů a lze ji rozdělit do dvou oblastí. První oblastí je **filtrace atmosférického vzduchu** a druhou oblastí je **filtrace průmyslová**. Rozdíl mezi těmito dvěma typy filtrace spočívá ve vstupních parametrech plynů a částic a místě jejich záchytu ve filtrační vrstvě a způsobu regenerace.

Na rozdíl od atmosférické filtrace se hodnoty maximální koncentrace částic u průmyslové filtrace pohybují v řádu jednotek  $g/m^3$ , tedy o řád výše než u filtrace atmosférického vzduchu, kde se tyto hodnoty pohybují řádově v  $mg/m^3$ , a zároveň teplota prachů dosahuje násobně vyšších hodnot.

Z toho je jasně patrné, že v případě průmyslové filtrace lze hovořit o řádově vyšších hodnotách znečištění a tím také o zvýšených nárocích na systém zachytávání uvolněných částic v daném provozu a nutnosti dodržení emisních limitů stanovených zákonem.

Průmyslová filtrace je obvykle využívána v případě průmyslových provozů, naproti tomu principu atmosférické filtrace je využito například v klimatizačních jednotkách a podobně.

## 2.1 Atmosférická filtrace

Atmosférická filtrace spočívá ve filtraci atmosférického vzduchu, tedy vzduchu, který nás obklopuje a který sestává ze směsi většího počtu různých plynů,

především kyslíku (21%), dusíku (78%), argonu (1%), nižších koncentrací oxidu uhličitého, dále nízkých koncentrací vzácných plynů jako je xenon, krypton, neon, hélium a dále vodních par a vodíku. Jak již bylo zmíněno v úvodu, v případě atmosférické filtrace lze hovořit o filtraci plynů o nižší vstupní teplotě a nižší koncentraci, než tomu je v případě filtrace průmyslové. [1]

Samotnou filtraci lze provádět za pomoci odlučování částic na dané filtrační vrstvě, která může sestávat jak ze speciálně upravené filtrační textilie, nebo například porézní hmoty či zrnité vrstvy.

Proces filtrace, tedy odlučování, lze v daném procesu provést vícekrát, taková filtrace je známa pod pojmem „vícestupňová filtrace,“ a je základním prvkem pro vytvoření čistoty vnitřního ovzduší vyžadované ochranou pracovníků a dodržením požadavků jednotlivých technologických procesů.

Mezi nejběžnější aplikace atmosférických filtrů patří prvky určené k větrání a klimatizaci. Filtry zde slouží jak k dodržení hygienických požadavků na prostředí daných Nařízením vlády č. 361/2007Sb., které stanovuje podmínky ochrany zdraví při práci [5], tak i k ochraně pracovníků a samotných zařízení.

## 2.2 Průmyslová filtrace

V případě průmyslové filtrace se v zásadě jedná o proces principiálně podobný filtraci atmosférického vzduchu, avšak s několika zásadními rozdíly, jako je hodnota maximální koncentrace částic a vstupní teplota plynu, respektive prachových částic plynem nesených.

O zachytávání částic se zde starají filtry, na jejichž povrchu se částice odlučují, což je v kontrastu s hloubkovou filtrací prováděnou v případě atmosférické filtrace. Zde pak dochází k tvorbě vrstvy odloučených částic, kterou známe jako „filtrační koláč“. Ten se v určitých časových intervalech odstraňuje a tím dochází k regeneraci filtračního materiálu.

Struktura dané filtrační vrstvy je rozličná a liší se dle použitého filtračního materiálu. Pod pojmem filtrační vrstva jsou známy především vláknité vrstvy, jež jsou zároveň nejrozšířenějším druhem filtračních materiálů, následně filtrační vrstvy zrnité, případně vrstvy z porézních hmot. Důležitým prvkem průmyslové filtrace jsou fyzikálně-chemické vlastnosti materiálů, z nichž je daná vrstva vyrobena. [6]

Další podstatnou věcí v průmyslové filtraci jsou základní veličiny charakterizující danou filtrační vrstvu. Za takové základní veličiny, jež jsou obě závislé na struktuře dané vrstvy, ale i parametrech plynu a stavu zanesení odloučenými částicemi, považujeme tzv. odlučivost a tlakovou ztrátu.

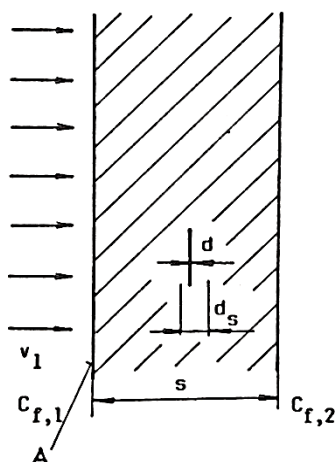
## 2.3 Základní pojmy

Proces separace částic z plynů je značně závislý na tvaru a zrnitosti jednotlivých částic. Z toho plynou pojmy popisující samotný proces filtrace, mezi které patří **odlučivost vláknité vrstvy**, její **tlaková ztráta** a dále **statika a kinetika filtrace**, kde statika se zabývá vyšetřováním základních charakteristik filtrační vrstvy v čistém stavu a kinetika se následně věnuje sledování změny tlakové ztráty se zanášením filtrační vrstvy. [6]

Tyto pojmy jsou dále rozvedeny v následujících podkapitolách.

### 2.3.1 Odlučivost čisté vláknité vrstvy

Základním principem filtrace částic je odlučování ve vláknité vrstvě, jež je složena z filtračních vláken. Podstatou takové filtrace je odlučování částic na jednotlivých vláknech, následované odlučováním i na částicích již odloučených. Tento proces je znám pod pojmem **hloubková filtrace** [7] – odlučování částic uvnitř vláknité vrstvy. Každá taková vrstva je charakterizována několika základními veličinami, mezi které patří průměr vláken  $d$ , tloušťka vrstvy  $s$  (viz Obr. 2.2) a poréznost  $\varepsilon$ .



Obr. 2.1.2 - Schéma vláknité vrstvy. [6]

Průměr vlákna  $d$  závisí na druhu a účelu použití daného filtračního materiálu. U vysoce účinných filtrů lze dosáhnout desetin, až jednotek  $\mu m$ . Následná tloušťka filtrační vrstvy  $s$  pak dosahuje desetin až desítek  $mm$ . [7]

Poréznost  $\varepsilon$  lze vyjádřit doplňkovou veličinou zaplnění  $c$  představující poměr objemu vláken k objemu vrstvy [1], pro niž platí vztah  $c = 1 - \varepsilon$ . U atmosférických filtrů je v praxi uvažována míra poréznosti  $\varepsilon > 0,8$  až  $0,9$ . U průmyslových filtrů pak  $\varepsilon > 0,7$ . [7] Poréznost je stanovována jako bezrozměrná veličina.

Základní veličinou určující vlastnosti daného filtračního materiálu je tzv. parametr vrstvy  $\lambda$ . Principiálně, čím vyšších hodnot nabude veličina  $\lambda$ , tím vyšší bude odlučivost v dané vrstvě. [7] Navýšení hodnoty  $\lambda$  lze dosáhnout za pomoci zvětšení tloušťky vláknité vrstvy  $s$ , zmenšení průměru vláken  $d$ , případně pomocí snížení hodnoty poréznosti  $\varepsilon$ .

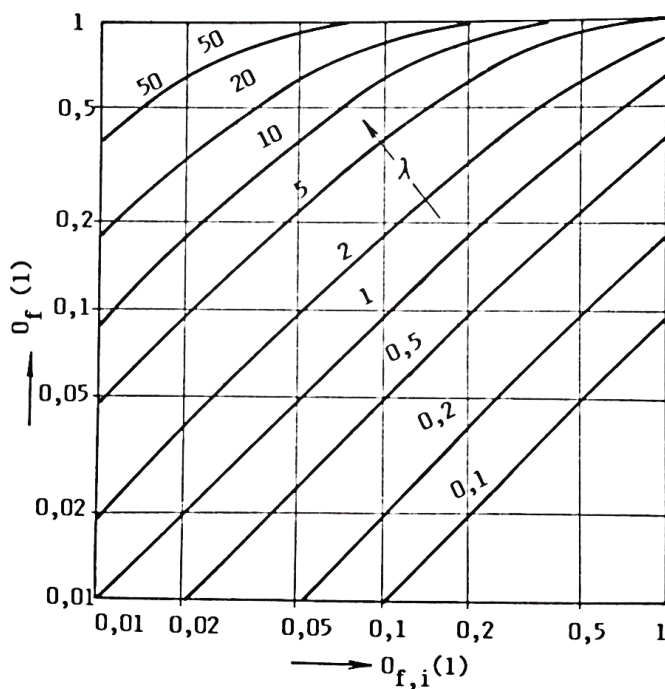
Nejdůležitější vlastností filtračního materiálu je výsledná závislost frakční odlučivosti vláknité vrstvy na velikosti částice  $O_f(a)$ , jež vychází z frakční odlučivosti částic na izolovaném vlákně  $O_{f,i}$ . [7]

Vztah mezi oběma veličinami je vyjádřen následovně [6]:

$$O_f = 1 - \exp(-O_{f,i} \cdot \lambda) \quad (1)$$

Jedná se o zjednodušený vztah, který záměrně zanedbává další okolní vlivy, jako je například ulpívání částic na povrchu vlákna, kdy částici takto ulpěnou lze považovat za již odloučenou. Daný vztah také nezohledňuje nerovnoměrnost rozdělení vláken ve vrstvě a jejich orientaci, ale vnímá vlákna jako rovnoměrně rozprostřená, orientovaná kolmo ke směru proudu vzduchu  $v$ . Toto zjednodušení je patrné z obrázku 2.2.

Z předchozího vztahu následně plyne, že čím vyšší je součin veličin  $O_{f,i}$  a  $\lambda$ , tím vyšší je hodnota frakční odlučivosti vláknité vrstvy. Tato vzájemná souvislost je graficky vyjádřena na obrázku 2.3.



Obr. 2.1.3 - Závislost frakční odlučivosti izolovaného vlákna  $O_{f,i}$ , frakční odlučivosti vrstvy  $O_f$  a parametru vrstvy  $\lambda$ . [6]

Vzhledem ke skutečnosti, že u reálné vláknité vrstvy nejsou vlákna ve vrstvě rovnoměrně rozmístěna a nebývají orientována čistě kolmo ke směru proudu vzduchu  $v$  (viz Obr. 2.1) a ani nelze předpokládat, že všechny odloučené částice na vlákně na tomto vlákně následně také ulpí, lze zavést pro zohlednění skutečných podmínek při odlučování



částic v reálné vláknité vrstvě korekční součinitele účinnosti izolovaného vlákna  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$ , kde korekční součinitel  $\gamma_1$  zohledňuje nerovnoměrné rozdělení vláken ve vrstvě a korekční součinitel  $\gamma_2$  zohledňuje korekci na strhávání a odskok již odloučených částic zpět do proudu plynu.

Pro součinitel  $\gamma_1$  platí, že u většiny reálných vláknitých vrstev dosahuje jeho hodnota  $\gamma_1 \cong 0,4$  až  $0,7$  [6]. V případě parametru  $\gamma_2$  lze uvažovat především vlastnosti částice a vlastnosti vlákna, jako je například jeho tvrdost či pružnost. Současně s tím však platí, že hodnota parametru  $\gamma_2$  reflektuje velikost částice, rychlost vzduchu ve vrstvě a průměr vlákna, kdy při snížení daného parametru je zvýšena hodnota korekce frakční odlučivosti vrstvy  $O_f(a)$  (viz vztah pro korigovanou frakční odlučivost (2)).

$$O_f' = 1 - \exp(-\lambda \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot O_{f,i}) \quad (2)$$

### 2.3.2 Tlaková ztráta čisté vláknité vrstvy

Druhou důležitou veličinou je tlaková ztráta. Při znalosti čelní plochy vláknité vrstvy  $A$  a délky vláken  $l$  lze odvodit vztah

$$\Delta p_z = \frac{l \cdot F_t}{A} = \frac{2 \cdot (1-\epsilon) \cdot \alpha}{\pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{v \cdot s \cdot \eta}{(d)^2}, \quad (3)$$

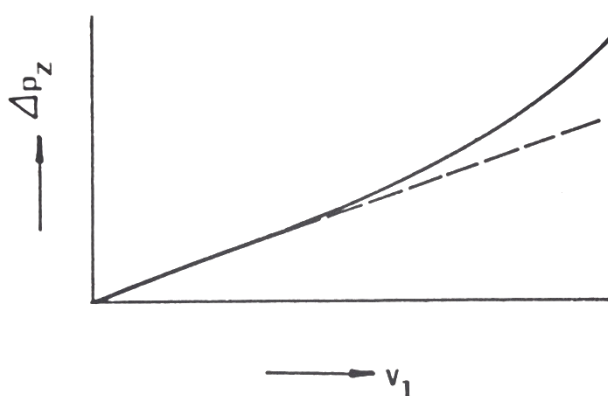
kde  $F_t$  představuje aerodynamický odpor jednotlivých délek vláken a velikosti čelní plochy vláknité vrstvy  $A$ ,  $d$  průměr vláken,  $s$  tloušťku vrstvy a  $v$  čelní rychlost plynu o viskozitě  $\eta$ . V první části výrazu je zahrnut vliv Reynoldsova čísla  $Re_d$ , vliv změny odporu obtékaných vláken a vliv působení sousedních vláken na vlákno obtékané. [7]

Pro vyjádření tlakové ztráty čisté ideální vrstvy se zavádí tzv. **bezrozměrná tlaková ztráta  $\Pi$** , vyjádřená pomocí proudových modelů. Podle toho ji lze považovat za funkci **porézности**, případně **objemového zaplnění**, funkci **modifikovaného Reynoldsova čísla**, nebo funkci **Knudsenova čísla**. Vztah pro výpočet tlakové ztráty lze pak vyjádřit jako,

$$\Delta p_z = \frac{v \cdot s \cdot \eta}{R^2} \cdot \Pi, \quad (4)$$

kde průměr vlákna  $d$  je nahrazen poloměrem  $R^2$ . [8]

Změna tlakové ztráty čisté vláknité vrstvy nastává v závislosti na změně čelní rychlosti  $v$ , respektive průtoku plynu, kdy při nízkých rychlostech je charakteristika lineární, ale se vzrůstající filtrační rychlostí  $v$  se mírně odchyluje od lineární závislosti. Závislost tlakové ztráty čisté vláknité vrstvy na filtrační rychlosti je popsána na obrázku 2.1.4.



Obr. 2.1.4 - Závislost tlakové ztráty čisté vláknité vrstvy  $\Delta p_z$  na filtrační rychlosti  $v$ . [6]

### 2.3.3 Kinetika filtrace

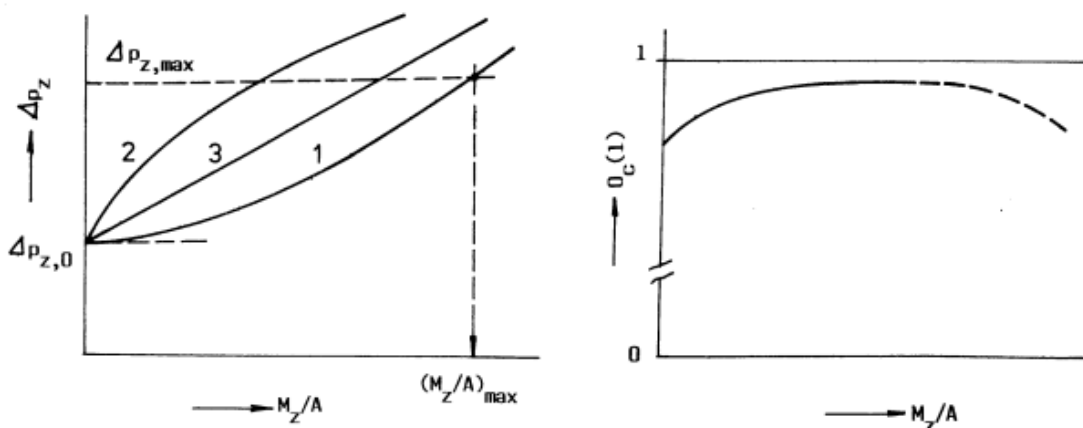
Kinetika filtrace se zabývá změnou tlakové ztráty způsobenou zanášením filtrační vrstvy odloučenými částicemi. Míru zanesení filtrační vrstvy lze vyjádřit poměrem hmotnosti zachycených částic  $M_z$  k velikosti filtrační plochy  $A$ . V případě atmosférické filtrace je běžné vyjadřovat výslednou veličinu  $M_z/A$  v jednotkách  $mg/m^2$ , u filtrace průmyslové jsou to pak  $g/m^2$ . [6] Z toho jasně vyplývá řádový rozdíl v koncentraci částic mezi průmyslovou a atmosférickou filtrací, což je ostatně jedním z hlavních rozlišovacích znaků obou typů filtrace.

Vzhledem k odlišným koncentracím částic a způsobům filtrace se kinetika atmosférické a průmyslové filtrace značně liší. V obou případech je však nutné zvolit vhodnou filtrační vrstvu, zabraňující průniku nechtěných částic, jelikož z důvodu zvýšené koncentrace částic dochází k velmi rychlému zanášení pórů na čelních stranách filtrů.

Ve filtraci známe dva způsoby odlučování částic ve filtrační vrstvě. První z nich je odlučování částic v hloubce filtrační vrstvy. Částice zde pronikají čelní stranou vrstvy, avšak s uraženou vzdáleností se zachytávají a dochází k jejich odloučení. Naproti tomu druhý způsob vzniká při zachytu částic již na čele vrstvy, kde se následně částice odloučí a dále hromadí, a dochází tak k odlučování částic na částicích již odloučených.

Z těchto dvou případů je v atmosférické filtraci běžný především případ první, kdy u filtrace atmosférického vzduchu nedochází k regeneraci filtru, ale rovnou k jeho výměně. Naproti tomu u filtrace průmyslové se setkáváme především s druhým případem, kde i vlivem výskytu větších částic a jiné struktury filtrační vrstvy dochází k tvorbě filtračního koláče. První způsob odlučování částic je zde přítomen pouze při náběhu filtru.

Tuto skutečnost lze pozorovat v grafech na obrázcích 2.1.5 a 2.1.6. V případě průmyslové filtrace zde dochází k okamžité změně tlakové ztráty i odlučivosti nastávající po regeneraci filtru, kdežto zanášení atmosférických filtrů se děje bez regenerace, a tudíž i bez takovéto okamžité změny průběhu křivky.



Obr. 2.1.5 - Průběhy změn tlakové ztráty  $\Delta p_z$  a celkové odlučivosti  $O_c$  se zanášením filtrační vrstvy v případě atmosférické filtrace. [6]

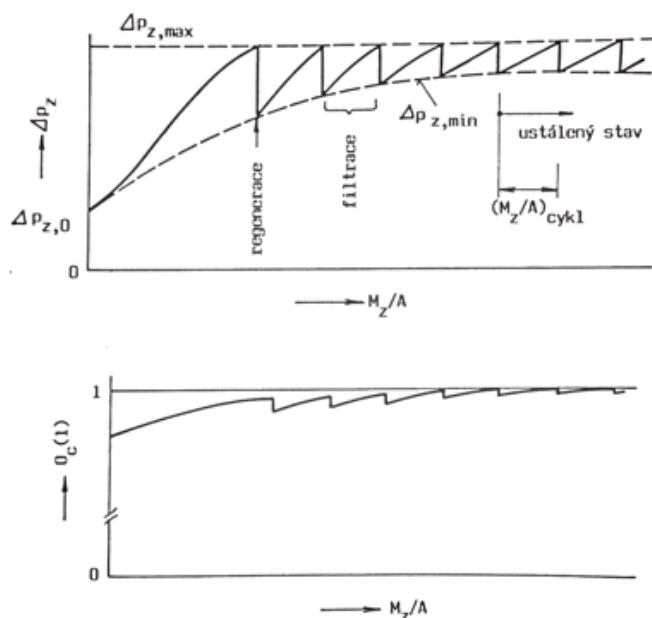
Jak již bylo zmíněno výše, v obou případech filtrace se časem filtrační materiál zanáší a roste tím tak i celková odlučivost filtrační vrstvy. U atmosférické filtrace se celková

odlučivost se zanášením filtru po jistou dobu zvyšuje. Hromaděním částic na filtrační vrstvě a zvyšujícím se objemovým zaplněním a rychlosti ve vrstvě dochází po určité době ke strhávání odloučených částic a tím i jejich postupnému průniku filtrační vrstvou.

Tento jev je znázorněn na obrázku 2.1.5 křivkou celkové odlučivosti, jež je závislá na zanášení vrstvy v daném čase. V takovou chvíli je pak nutná například výměna filtrační vložky nebo filtračního materiálu.

U průmyslové filtrace se tento proces odlišuje v tom, že se místo výměny filtru filtr cyklicky regeneruje, tedy se opakovaně odstraňuje vrstva vzniklého filtračního koláče. Po dosažení určitého počtu regeneračních cyklů vzniká tzv. blokační vrstva, která již není při následné regeneraci odstraněna. Tato vrstva brání pronikání částic dále do filtrační vrstvy a tím stabilizuje průběh celkové odlučivosti.

Tento proces je popsán na obrázku 2.1.6, kde se v pozdějších regeneračních fázích celková odlučivost i tlaková ztráta stabilizuje. Taková situace se nazývá ustálený stav. [6]



Obr. 2.1.6 - Průběh změny tlakové ztráty  $\Delta p_z$  a celkové odlučivosti  $O_c$  v průběhu zanášení a regenerace průmyslových filtračních materiálů. [6]

## 3. Základní principy separace částic

Jak již bylo popsáno v základech filtrace, podstatou všech odlučovacích procesů je separace částic z proudu plynu na takzvané odlučovací plochy, a to například na samotnou stěnu odlučovače, povrch vláken a zrnitého materiálu, či v případě průmyslové filtrace na vrstvu již odloučených částic.

Samotný odlučovací princip lze popsat za pomoci znalosti charakteru síly nebo přenosového děje podílejícího se na separaci částic z proudu plynu [1]. Tyto principy lze označit jako princip **gravitační**, **setrvačný**, **odstředivý**, **elektrický**, případně **difúzní**.

Mezi zvláštní případy je řazen **síťový** a **intercepční princip**, jejichž specifika jsou popsána dále. V praxi často dochází k souběhu dvou a více odlučovacích principů, názvy odlučovačů pak odvozujeme od principu převládajícího. [2][9]

### 3.1 Gravitační princip

Gravitační, někdy také uváděno jako tíhové, odlučovače, patří mezi nejjednodušší typy odlučovačů. Všeobecně jsou vnímány jako odlučovače s nízkou odlučivostí, uplatňující se často jako první fáze odlučování, tedy jako odlučovače, po nichž následuje další odlučování pomocí jiného, účinnějšího odlučovacího principu.

Jsou založeny na principu působení gravitační síly na pohybující se částice vyskytující se v daném proudu plynů. Průběh odlučování závisí především na pádové rychlosti částice a unášivé rychlosti plynu. Frakční odlučivost je závislá na typu proudění. V případě laminárního proudění lze hovořit o maximální frakční odlučivosti, a naopak u turbulentního proudění o minimální frakční odlučivosti.

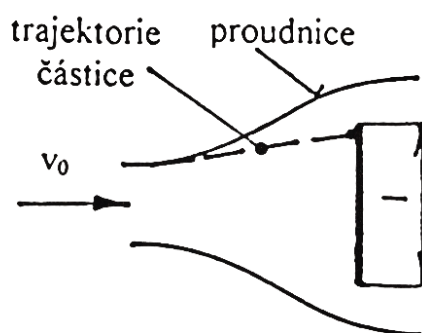
Výhodou gravitačních odlučovačů je skutečnost, že je lze používat za vyšších teplot vstupních plynů a také pro abrazivní prachy, a tedy je využívat v průmyslové filtraci. Nevýhodou jsou, mimo jejich nízkou účinnost, také značné rozměry a nevhodnost použití

v případě zachytávání lepivých a vláknitých prachů. Touto metodou lze odlučovač částice o rozměrech větších než  $100 \mu\text{m}$ . [6]

Mezi známé typy separátorů fungujících na bázi gravitačního principu lze řadit například různá provedení usazovacích komor, lapače těžkých kusů, případně odlučovače kombinující gravitační a setrvačný princip. [10]

### 3.2 Setrvačný a odstředivý princip

Jako odlučovače fungující na setrvačném principu jsou často považovány i separátory fungující na způsobu odstředivého pohybu částic [11]. Setrvačné odlučovače fungují na principu změny proudu plynu, a to takovým způsobem, že při jeho změně (pozn.: proudu plynu) dochází vlivem vlastní setrvačnosti částice k jejímu vychýlení a zachytu na odlučovací ploše separátoru (viz Obr. 3.1).



Obr. 3.1 – Setrvačný princip. [9]

Ve filtraci je setrvačný princip uplatňován při obtékání vláken ve vláknité vrstvě. Na částici v tomto případě působí setrvačná síla a vlivem nízké rychlosti obtékání vlákna i aerodynamický odpor v oblasti platnosti **Stokesova zákona**. Ten má rozhodující vliv na to, po jaké trajektorii se částice bude pohybovat.

V případě nízkých hodnot Stokesova čísla ( $Stk$ ) se částice pohybuje po proudnici. Se zvyšující se hodnotou Stokesova čísla dochází k napřímení trajektorie letu částice, která se tak liší od proudnice (viz Obr. 3.1), a zároveň s tím tak dochází i ke zvyšování **frakční odlučivosti**. Ta (pozn.: *frakční odlučivost*) je v tomto případě definována jako funkce Stokesova kritéria, Reynoldsova čísla částice a Reynoldsova čísla obtékání odlučovací plochy. [8]

Mimo filtraci se mezi nejpoužívanější typy odlučovačů fungujících na setrvačném, respektive odstředivém principu řadí například tzv. cyklóny, v některé literatuře udávány jako vírové odlučovače či separátory. V nich proud plynu vytváří vír, který způsobuje dostředivé zrychlení částic a jejich následnou separaci. Dále také žaluziové a lamelové odlučovače. [11]

### 3.3 Elektrický princip

V případě separátorů fungujících na elektrickém principu jsou částice nečistot separovány z proudu plynů za pomoci působení elektrostatických sil. Ty vznikají působením kladně a záporně nabitých elektrod a způsobují, že prachové částice jsou donuceny k pohybu směrem k usazovací elektrodě. Na té se dále tvoří pórovitá vrstva částic, která bývá periodicky odstraňována. Elektrické odlučovače se nepoužívají pouze k separaci tuhých částic, ale také pro separaci mlžného závoje v proudu plynů. [12]

Elektrický princip využívá tzv. Coulombovu sílu, tedy fyzikální princip vyvolávaný působením elektrické síly na nabitě částice s nábojem, jež se nacházejí v elektrickém poli o dané intenzitě. Na odlučování částic má vliv intenzita tohoto pole. Zvýšení odlučivosti zejména jemných částic lze dosáhnout snížením aerodynamického odporu působícího na částici, a tedy zvýšením její pohyblivosti.

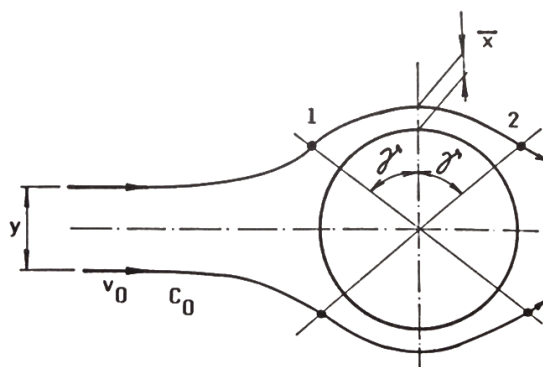
Frakční odlučivost v tomto případě závisí na provozním napětí odlučovače, jehož zvýšením je dosaženo vyšší intenzity elektrického pole a důsledkem toho i konečné odlučovací rychlosti částice, a tedy i frakční odlučivosti jako takové. [2][6][9] Frakční odlučivost lze vyjádřit následující rovnicí:

$$O_f = 1 - \exp\left(-\frac{u_k \cdot S}{V}\right) \quad , \quad (5)$$

kde  $O_f (-)$  je frakční odlučivost částic,  $u_k (m/s)$  je konečná odlučovací rychlost částice,  $S (m^2)$  celková plocha usazovacích elektrod a  $V (m^3/s)$  objemový průtok odlučovačem. [2]

### 3.4 Difúzní princip

V odlučování částic se ve filtraci difúzního principu využívá v případě průtoků plynů vláknitou vrstvou. Projevuje se při obtékání těles malou rychlostí a je založen na difúzi částic z proudu plynů a jejich odloučení právě na povrch filtračních vláken.



Obr. 3.2 - Obtékání válce a difúzní mezní vrstva  $\bar{x}$ . [6]

Tento proces je poměrně složitý, protože částice, které se v proudu plynů nacházejí, konají kromě unášivého pohybu i pohyb náhodný, způsobený nárazy okolních



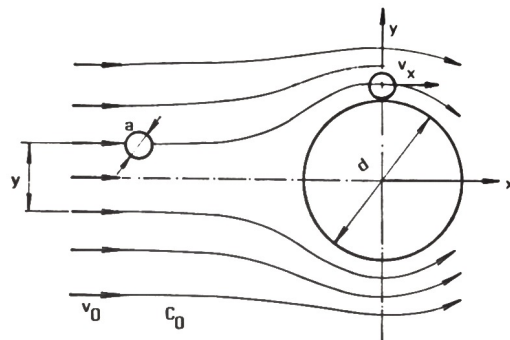
molekul plynu. V místech s rozdílnými koncentracemi je hustota toku částic daná unášením částic proudem plynu a zároveň difúzním přenosem.

V klidném prostředí laminárního proudění je náhodný pohyb částic ovlivněn tepelným pohybem molekul plynu a v takovém případě je zaváděn **součinitel tepelné difúze částic**  $D_B$  ( $m^2/s$ ). Tento pohyb molekul vede k vyrovnání koncentrace částic a při obtékání těles následně k odlučování částic na povrch daného tělesa. [6][8][13]

Ve filtraci při obtékání vlákna vláknité vrstvy lze pro zjištění frakční odlučivosti částic difúzní princip aplikovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je komplexní řešení, využívající pole koncentrace částic a proudové pole v okolí vlákna. Druhým způsobem je zjednodušená metoda, využívající řešení pomocí difúzní mezní vrstvy (viz Obr. 3.2). Tímto způsobem je možné frakční odlučivost vyjádřit pomocí kritériálních vztahů a lze ji popsat jako funkci **Pecletova kritéria**, **Reynoldsova čísla** obtékání odlučovací plochy a **porézности**. [8]

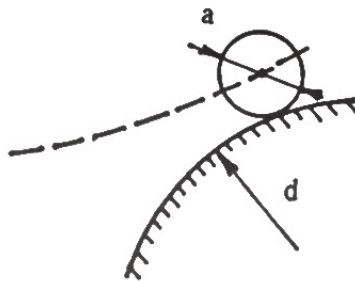
### 3.5 Intercepční princip

Intercepční metoda spočívá v přímém zachytávání částic z proudu plynů (viz Obr. 3.3) na vláknité, popřípadě zrnité vrstvě. Rozdíl mezi intercepčním a setrvačným principem spočívá ve velikosti odlučované částice, kdy v případě intercepčního principu je odlučovaná částice tak malých rozměrů, že setrvačné síly na ní nemají vliv a částice tak není vychýlena ze směru průběhu proudnice. [6][8][9]



Obr. 3.3 – Přímé zachycení částic o velikosti  $a$ . [6]

Účinnost odlučovače fungujícího na intercepčním principu je závislá na velikosti částice  $a$  ve srovnání s velikostí překážky  $d$  (viz Obr. 3.4). Na základě tohoto vzájemného vztahu lze definovat charakteristický parametr intercepce  $\alpha = a/d$ , který je dále uplatněn v případě výpočtových vztahů frakční odlučivosti částic  $O_f(a)$ , která je tak funkcí právě **parametru intercepce, Reynoldsova čísla** obtékání odlučovací plochy a **poréznosti**. [2][9]



Obr. 3.4 - Intercepční princip. [9]

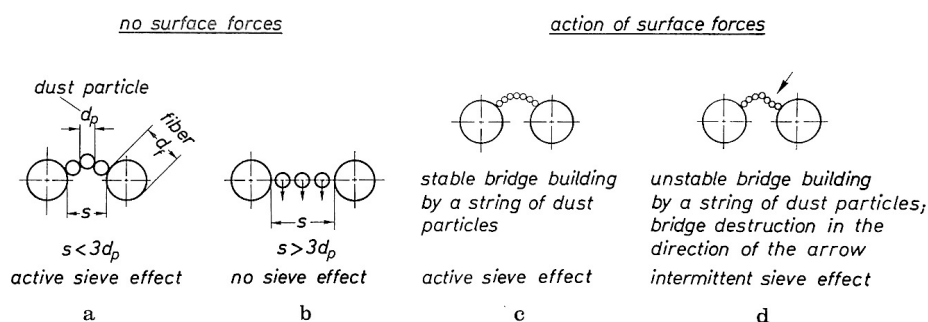
## 3.6 Síťový princip

Síťový princip se používá především při průchodu proudu plynu hustou vláknitou, popřípadě zrnitou vrstvou. Funguje v okamžiku, kdy velikost částic v proudu plynů je řádově stejná jako velikost otvorů v dané filtrační vrstvě.

Různé způsoby dosažení síťového principu jsou zobrazeny na obrázku 3.5. Části a) a b) popisují závislost síťového efektu na velikosti částice o rozměru  $d_p$  a vzdáleností  $s$  mezi překážkami (pozn.: v tomto případě vlákny) o rozměru  $d_f$ . Aby byl síťový princip účinný, musí platit, že vzdálenost mezi jednotlivými vlákny je menší než součet průměrů částic zachytávaných (viz Obr 3.5). Nebude-li tato podmínka splněna, síťový efekt bude neúčinný a částice sítím propadnou.

V části c) a d) je pak popsán síťový efekt ve vztahu k působení povrchových sil. V případě c) dochází shlukování částic na sítu a tím ke vzniku přemostění mezi překážkami tvořenými vlákny. V druhém případě d) je stabilita tohoto přemostění narušena působením vnějších sil. Částice tvořící přemostění mezi překážkami se pak hroutí ve směru působení těchto sil. Tento děj se nazývá jako střídavý síťový princip. Síťového principu je vždy dosaženo při vzniku přemostění a jeho zhroucením se proces opakuje. [12]

Dále se síťový princip uplatňuje v případě průchodu proudu plynu vrstvou již odloučených částic, v průmyslové filtraci známou pod pojmem filtrační koláč. [9]



Obr. 3.5 - Ukázka síťového principu za různých podmínek. [12]

### 3.7 Kombinace odlučovacích principů

Ve filtraci často dochází ke kombinaci více odlučovacích principů, avšak z důvodu vzájemného ovlivňování těchto procesů nelze samostatné frakční odlučivosti pouze sečíst, ale je nutné zavést dodatečný člen  $O_{f_{dod}}$  jako korekci.

Jednou z takových kombinací je například **kombinace principu difúze a intercepce**. Zde je již z důvodu korekce zaveden zmíněný dodatečný člen korigující vliv obou principů. Rovnici (6) popisující tento stav lze pak uvádět ve tvaru

$$O_{f_{dif+int}} = O_{f_{dif}} + O_{f_{int}} + O_{f_{dod}} \cdot \quad (6)$$

Bude-li uvažován namísto principu intercepce **setrvačný princip**, lze říci, že u menších částic z důvodu výrazného uplatnění difúze je vliv setrvačnosti malý, až zanedbatelný, a naopak u částic o větších rozměrech se na úkor difúze projevuje princip setrvačný a oba principy tak na sebe mají pouze minimální vliv. U částice o velikosti 0,1 až 1  $\mu m$  oba principy dosáhnou natolik nízkých hodnot, že jejich vliv současného působení je možno zanedbat. [6][8]

## 4. Provedení filtrů

Nejčastějším důvodem filtrace je ochrana zdraví člověka, respektive na to navazující ochrana ovzduší. Na způsob využití jednotlivých filtrů má stěžejní vliv dělení filtrace obecně na atmosférickou a průmyslovou filtraci.

U atmosférické filtrace se filtry mění, kdežto v případě průmyslové filtrace je takové filtry možno dále regenerovat a využívat je tak v dlouhodobějším časovém úseku, což má pozitivní dopad na jejich ekonomičnost. Druhy a různá specifika filtrů a jejich způsobů regenerace jsou popsány v následujících kapitolách.

### 4.1 Provedení atmosférických filtrů

**Atmosférické filtry** lze dle odlučovacích vlastností rozdělit do dvou základních skupin. První skupinou jsou **filtry pro všeobecné větrání**, tedy filtry prachové. Druhou skupinu tvoří **filtry vysoce účinné**, tedy filtry aerosolové. Tyto dvě skupiny lze dále rozdělit do tříd. [8]

#### 4.1.1 Třídění atmosférických filtrů

**Filtry pro všeobecné větrání** lze od roku 2012 rozdělit podle aktualizované normy ČSN EN 779 (viz Tab. 4.1), a to na **hrubé filtry** rozdělené do tříd G1 až G4 dle středního stupně odlučivosti syntetického prachu, **středně hrubé filtry** M5 a M6 (ty nahradily dřívější označení F5 a F6) rozdělené dle středního stupně účinnosti částic  $0,4 \mu\text{m}$  a **jenné filtry** třídy F7 až F9, rozdělené kromě středního stupně účinnosti částic  $0,4 \mu\text{m}$  i dle minimální účinnosti filtrace.

Tab. 4.1 – Nová mezinárodní klasifikace atmosférických filtrů pro všeobecné větrání ČSN EN 779:2012. [14]

EN 779		Střední stupeň odlučivosti (Am) syntetického prachu (%)	Střední stupeň účinnosti (Em) částic 0,4 μm (%)	Minimální účinnost (M.E. u částic 0,4 μm (%))
Skupina filtrů	Třída filtrace			
Hrubý prach	G1	50 < Am < 65	-	-
	G2	65 < Am < 80	-	-
	G3	80 < Am < 90	-	-
	G4	90 < Am	-	-
Středně hrubý prach	M5	-	40 < Em < 60	-
	M6	-	60 < Em < 80	-
Jemný prach	F7	-	80 < Em < 90	35
	F8	-	90 < Em < 95	55
	F9	-	95 < Em	70

**Vysoce účinné filtry** se dle novely normy ČSN EN 1822:2010 řadí do skupiny **E – EPA**, s třídou filtrace E10 až E12, skupiny **H – HEPA**, třídy H13 a H14 a skupiny **U – ULPA**, třídy U15 až U17. Tyto filtry jsou nejčastěji používány jako finální stádium odlučování a jedná se tak o filtry s vysokou účinností odlučování (99,95 % a více), schopné odlučovat částice až na sub-atomární úrovni. Třídí se dle účinnosti pro částice, které filtrem, respektive filtračním materiálem nejvíce pronikají. Tyto částice jsou zkráceně označovány jako **MPPS** (Most Penetrating Particle Size) a jsou stanovovány zkoušením daného filtračního materiálu. [14]

Ve filtraci se díky své vysoké účinnosti často využívají tzv. **HEPA filtry**, z anglického *high-efficiency particulate air filters*, které lze přeložit jako „vysoce efektivní částicové vzduchové filtry. HEPA filtry jsou tvořeny velmi hustou filtrační vrstvou složenou často ze syntetických vláken o rozměrech jednotek až desetin μm, případně filtračních papírů ze skelných vláken. [6][15]

Tab. 4.2 – Nová mezinárodní klasifikace atmosférických filtrů vysoce účinných filtrů ČSN EN 1822:2010. [14]

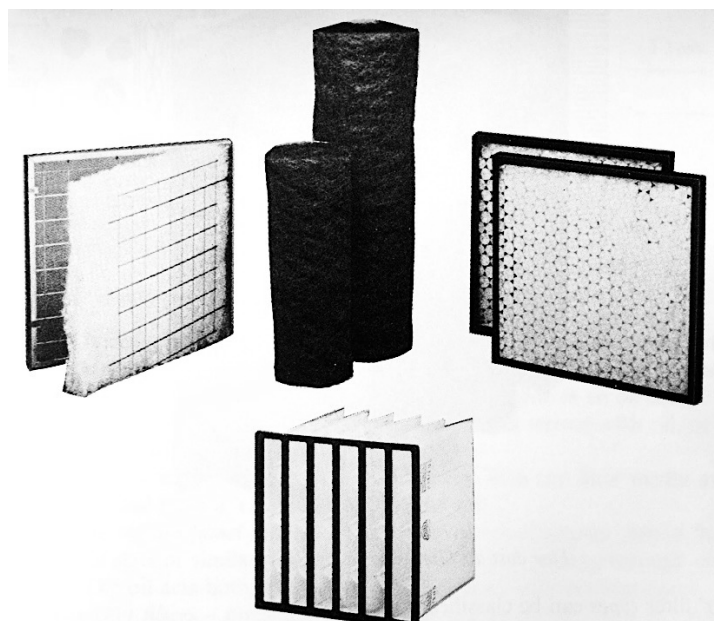
EN 1822		Celková hodnota pro MPPS částice (0.1–0.3 μm)		Integrální hodnota pro MPPS částice (0.1–0.3 μm)	
Skupina filtrů	Třída filtrace	Účinnost (%)	Průnik (%)	Účinnost (%)	Průnik (%)
Skupina E EPA	E 10	≥ 85	≤ 15	-	-
	E 11	≥ 95	≤ 5	-	-
	E 12	≥ 99.5	≤ 0.5	-	-
Skupina H HEPA	H13	≥ 99.95	≤ 0.05	≥ 99.75	≤ 0.25
	H 14	≥ 99.995	≤ 0.005	≥ 99.975	≤ 0.025
Skupina U ULPA	U 15	≥ 99.999 5	≤ 0.000 5	≥ 99.997 5	≤ 0.002 5
	U 16	≥ 99.999 95	≤ 0.000 05	≥ 99.999 75	≤ 0.000 25
	U 17	≥ 99.999 995	≤ 0.000 005	≥ 99.999 9	≤ 0.0001

#### 4.1.2 Druhy atmosférických filtrů

Podle způsobu provedení lze filtry v atmosférické filtraci rozdělit na filtry **prachové** a **aerosolové**, **filtry sorpční** a **filtry dielektrické**. Filtry prachové lze dělit na **filtry vložkové** a **pásové** s tím, že filtry aerosolové jsou obvykle právě vložkové. [8]

Samotné **vložkové filtry** lze dále rozdělovat na **filtry deskové**, kde je filtrační materiál tvořen vláknitou vrstvou filtračního materiálu umístěného do kovového či plastového rámu a u hrubé filtrace například z na sebe naskládaného pletiva, případně z děrovaných nebo prostřihávaných kovových či umělohmotných desek. **Filtry náplňové**, které jsou tvořeny náplní ve formě zrn, tělísek, třísek, případně silné vláknité vrstvy. **Filtry kapsové**, což jsou filtry složené z filtračního materiálu složeného do formy hlubokých kapes. A také **filtry skládané**, kam lze zařadit například filtry kazetové, patronové, nebo kompaktní. [6][8]

Druhou kategorií, **pásové filtry**, lze rozdělit na **oběhové** a **odvinovací**. **Odvinovací filtry** jsou složeny z materiálu ve formě pásu, který se kontinuálně, avšak nikoli nepřetržitě, odvíjí z cívky. Naproti tomu **oběhové filtry** jsou tvořeny průběžně regenerovanými na sebe navazujícími pásy tvořících „nekonečný“ pás filtračního materiálu obíhajícího ve filtračním. [6]



Obr. 4.1 - Příklad vzduchových filtrů zobrazují (vlevo) jednorázový filtr, (uprostřed) odvinovací filtr a (vpravo) deskový filtr, dole uprostřed poté kapsový filtr. [15]

**Filtry sorpční** fungují na principu adsorpce a k zachytu částic používají adsorpční látky o velkém měrném povrchu jako je aktivní uhlí, koks, saze a podobně. Odlučovací vlastnosti takových filtrů pak závisí především na použité adsorpční látce.

**Dielektrické filtry** využívají elektrických sil působících ve vláknité nevodivé filtrační vrstvě umístěné v elektrickém poli mezi dvěma a více elektrodami. Dochází k ionizaci plynu a nabití částic na náboj kladné polarity. Kladně nabitě částice se následně odlučují na elektrodách se zápornou polaritou. [8]

## 4.2 Provedení průmyslových filtrů

Průmyslové filtry existují v řadě různých provedeních od různých výrobců. Ta se obvykle liší použitou technologií, materiálem, nebo způsobem regenerace. Nejčastěji používaným typem materiálů pro průmyslové filtry jsou filtrační textilie, lišící se různou teplotní odolností a jejich odlučovacími schopnostmi a dalšími vlastnostmi. V případě



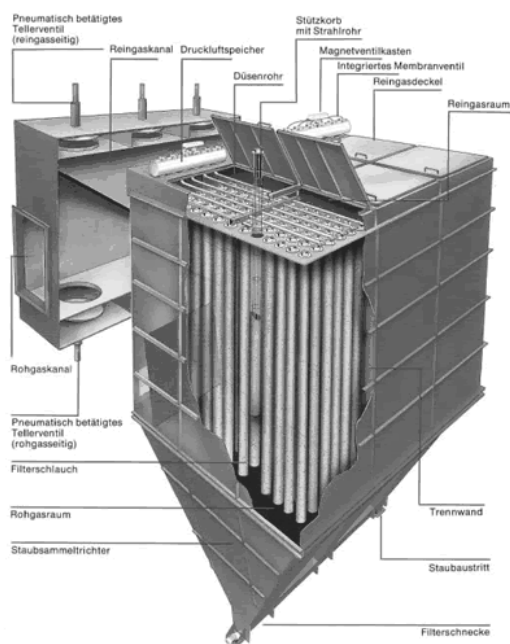
filtračních textilií pak záleží především na materiálovém složení takové textilie. Dalšími, v menší míře využívanými materiály, jsou zrnité vrstvy a porézní hmoty.

Samotné průmyslové filtry lze v zásadě rozdělit na **kapsové** a **hadicové**, a to podle uspořádání filtrační plochy. Dalším provedením průmyslových filtrů jsou filtry **patronové**, používané především při odlučování málo abrazivních jemných prachů.

Rozvoj **kapsových filtrů** nastal na území České republiky v 70. a 80. letech minulého století, a to zásluhou nově vyvinutých filtračních textilií se zvýšenou odlučivostí, lepšími regeneračními schopnostmi a teplotní odolností do 150°C. [6] V současnosti se často využívají jako druhý filtrační stupeň a patří mezi nejrozšířenější typy filtrů.

Kapsové filtry se používají například v chemickém, potravinářském, nebo strojírenském průmyslu, ale uplatňují se i při výrobě léčiv. U průmyslové filtrace jsou na filtrační materiál kladeny značně vyšší nároky, a to především nároky na schopnost odolávat vyšším teplotám a vyšším koncentracím vstupních částic, ale i různým druhům chemikálií. [16] Regenerace kapsových filtrů je podobně jako u hadicových prováděna za pomoci zpětného proplachu, nebo pulsního profuku. Tyto principy jsou dále popsány v kapitole „Regenerace“.

Technologie **tkaninových hadicových filtrů** je známa více než 120 let. V současnosti se jedná o velmi oblíbenou formu filtrace, a to především díky své vysoké účinnosti, která představuje i více než 99,9 % odloučených částic. Této vysoké účinnosti je dosaženo volbou vhodného uspořádání hadic filtrů a jejich regenerace, a především pak použitou filtrační tkaninou. [17]



Obr. 4.2 – Řadové uspořádání filtračních hadic. [18]



Obr. 4.3 – Tkaninové hadicové filtry zabírají značný obestavěný prostor. [19]

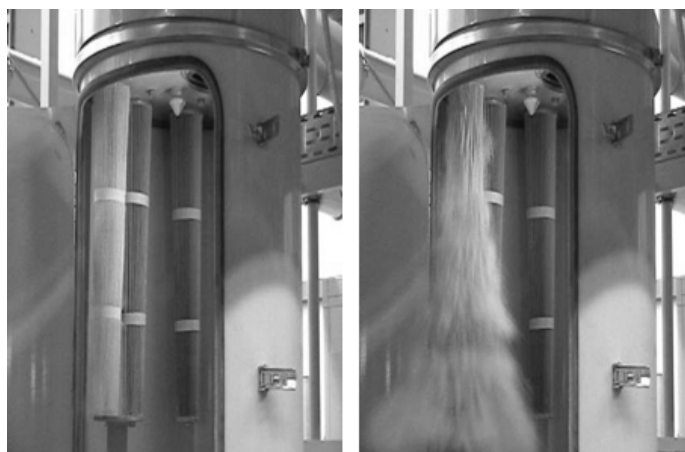
Hadicové filtry se obvykle vyskytují buď v kruhovém, nebo řadovém uspořádání (Obr. 4.2), a stejně jako u kapsových filtrů i zde lze využít regenerace zpětným proplachem, nebo pulsním profukem. V případě kruhového hadicového filtru lze uvažovat hadice uspořádané v kruhové komoře rozdělené do několika sektorů. U řadového uspořádání jsou hadice rozmístěny do několika za sebou seřazených komor o obdélníkovém,

případně čtvercovém průřezu. Velkou nevýhodou hadicových filtrů jsou pak jejich značné rozměry (viz Obr. 4.3).

**Patronové filtry** (viz Obr. 4.4 a 4.5) se vyskytují v různých tvarech a provedeních a jsou využívány především při odlučování málo abrazivních jemných prachů, například díky svým malým rozměrům ve stísněných prostorách. Z toho také vyplývá jedna z jejich výhod, kterou je právě malý rozměr filtru. Mezi další výhody dále patří velká filtrační plocha, vztažená k nárokům na obestavený prostor (pozn.: využívá se zde skládaného materiálu filtru) a jednoduchá výměna patron. U tohoto typu filtrů lze využít širokou škálu filtračních materiálů se specifickými vlastnostmi. [20]



*Obr. 4.4 – Patronový filtr značky Donaldson. [21]*



*Obr. 4.5 - Kónický patronový filtr s následnou regenerací od firmy Euromatal servis s.r.o. [22]*

## 5. Regenerace filtrů

Jak již bylo popsáno výše, filtry se v případě filtrace atmosférického vzduchu obvykle neregenerují, ale vyměňují. Naproti tomu průmyslová filtrace regeneraci ve velké míře využívá a dá se říci, že je na ní do značné míry postavena. Je to dáno skutečností, že u průmyslových filtrů dochází ke vstupu větších koncentrací částic do filtračního systému a tyto částice se následně zachytávají na filtrační vrstvě a dlouhodobým působením ji zanáší, čímž postupem času odlučováním částic na vrstvě částic již odloučených vzniká filtrační koláč. Takový filtr je pro správnou funkčnost nutno opakovaně regenerovat a tedy, zjednodušeně řečeno, filtrační koláč odstranit. Tento proces se nazývá regenerace.

Regeneraci průmyslových filtrů lze provádět více způsoby. Nejúčinnějším a zároveň finančně nejnákladnějším způsobem je **regenerace pulzním rázem** (tzv. „pulse-jet“, někdy uváděna také jako regenerace pulsním profukem). Ta se provádí za provozu a využívá se zde tlakové energie. Tento způsob se aplikuje především u hadicových a patronových filtrů.

Naopak u kapsových filtrů je obvyklá **regenerace zpětným proplachem**. V tomto případě se část filtru na krátkou dobu odstává a profukuje se externím vzduchem. Tento způsob regenerace je oproti regeneraci pulzní mechanicky šetrnější vůči použité filtrační textilií a zajišťuje tak její delší životnost. [23]

Nelze opomenout také nejjednodušší ze způsobů, a to **regeneraci mechanickou**. Ta se používá například při filtraci dřevního odpadu.

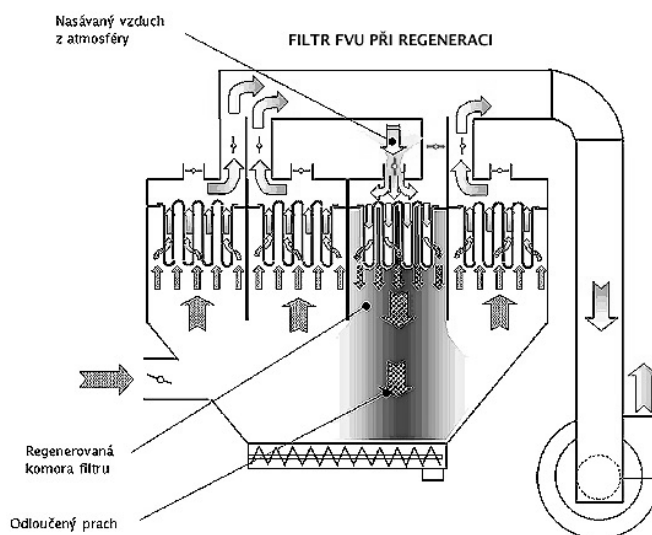
### 5.1 Regenerace zpětným proplachem

**Regenerace zpětným proplachem** (viz Obr. 5.1) je nejčastěji využívaná v případě kapsových filtrů. Její využití se však dá najít i u filtrů hadicových. Jak bylo zmíněno výše, regenerace zpětným proplachem probíhá vždy při odstávce části filtračního systému.

Například u filtru typu FVU se využívá systému dvou klapek, kdy první klapka zamezuje vstupu filtrovaného média a druhá současně otevírá přívod regeneračního vzduchu proudícího v opačném směru filtrace, čímž dochází k odstranění filtračního koláče. Po dokončení regeneračního cyklu se klapka s regeneračním vzduchem uzavře a opět se otevře přívod filtrovaného plynu. [24]

U velkých filtračních stanic probíhá proces regenerace stále, a to tím způsobem, že je vždy jedna část filtru odstavena, zatímco ostatní běží.

Při regeneraci zpětným proplachem je obvykle využíváno okolního vzduchu. Toto médium lze však nahradit, a to různými druhy čistého plynu. Takový způsob je však náročnější a je nutné k tomu filtrační systém řádně uzpůsobit. [24]



Obr. 5.1 - Schéma FVU filtru s regenerací filtračních textilií zpětným proplachem atmosférickým vzduchem. [25]

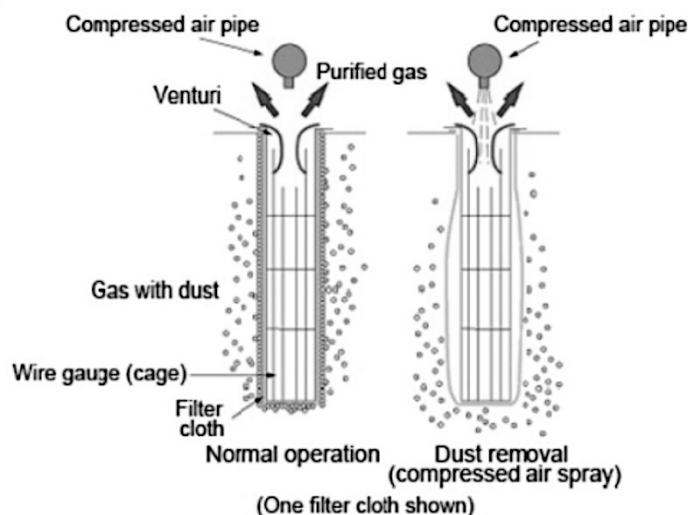
## 5.2 Regenerace pulsním rázem (*pulse-jet*)

**Pulsní regeneraci** (viz Obr. 5.2) lze s různou účinností a efektivitou provádět v případě hadicových i kapsových filtrů.

U **hadicových filtrů** se jedná o regeneraci pulsním rázem ve filtrační hadici, kdy v hadicovém filtru je regenerační zařízení uspořádáno takovým způsobem, aby mohl být

do rozvodové trubky v krátkých pulsech přiváděn tlakový vzduch. Ten pak proudí proti směru filtrace rozvodovými trubkami dále do filtračních hadic navlečených na drátěnou kostru. Při dosažení dostatečně objemného filtračního koláče dojde působením regeneračního pulsu k jeho odtržení a následnému pádu do výsyvky. Pokud se, například vlivem příliš časté regenerace, nebo velmi nízkých koncentrací jemných prachových částic, nevytvoří dostatečně objemný filtrační koláč, není regenerace úspěšná, neboť dojde k postupnému ucpávání filtrační textilie a následnému zhoršení funkce filtračního systému. [6][24]

Regenerace pulsním rázem je v případě **kapsových filtrů** o něco složitější. Tlakový vzduch je zde přiváděn rozvodovou trubkou s tryskami do regenerovaného prostoru nad čisté strany filtračních kapes. Při regeneraci proudí puls vzduchu do regenerovaného prostoru a dále do filtračních kapes v opačném směru, než v jakém probíhá samotná filtrace. Následný vznik rázové vlny způsobí, že pohybem části filtrační kapsy dojde k odstranění filtračního koláče a jeho následnému pádu do výsyvky. Díky tomuto způsobu lze regenerovat všechny filtrační kapsy umístěné v tomto prostoru najednou. [1][26]



Obr. 5.2 - Schématický popis principu regenerace pulsním rázem. [27]

## 6. Filtrační materiály

Filtrační materiály lze rozlišit na filtrační materiály pro atmosférickou a průmyslovou filtraci. Materiály určené pro průmyslovou filtraci musí být ze své podstaty výrazně odolnější. Jednou z nejsledovanějších vlastností takových materiálů je jejich tepelná a chemická odolnost.

### 6.1 Rozdělení filtračních materiálů v atmosférické filtraci

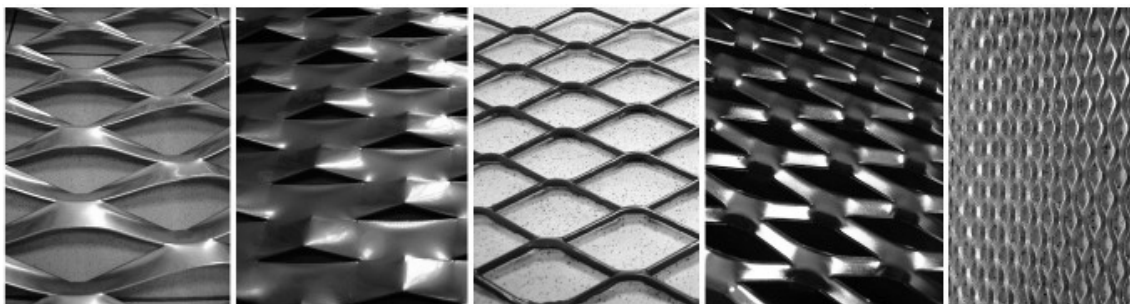
V případě atmosférické filtrace lze filtrační materiály rozdělit do tří skupin. Do **první skupiny** řadíme nejjednodušší filtrační materiály, jako je tahokov, skládané drátěné pletivo, syntetické perforované fólie, umělohmotné, případně kovové třísky atd. [6] **Druhou skupinu** tvoří vláknité filtrační materiály. Tuto skupinu lze dále rozdělit podle technologie výroby na vpichované textilie, rouna, rohože a filtrační papíry. **Poslední skupinou** jsou porézní hmoty pro sorpční filtry.

#### 6.1.1 Jednoduché filtrační materiály

Materiály řadící se do první skupiny se vyznačují nízkou tlakovou ztrátou v hodnotě desítek pascalů a vysokou filtrační rychlostí, řádově v  $m/s$ . Celková odlučivost je nízká. Mezi hlavní výhody patří snadná regenerace a odolnost v těžkých provozech. Používají se jako hrubá filtrace k zachytávání částic větších než  $10 \mu m$ . [6]

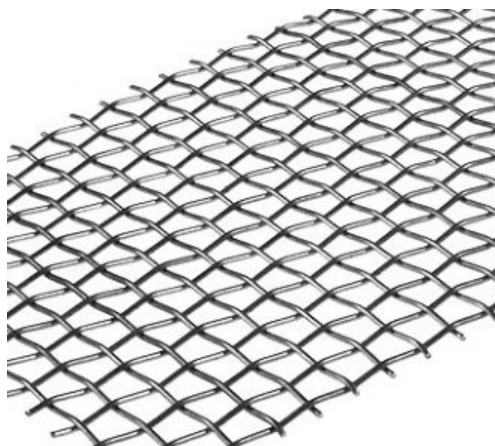
Do první skupiny filtračních materiálů v atmosférické filtraci lze zařadit **tahokov** (viz Obr. 6.1). Tahokov je zjednodušeně řečeno děrovaný plech využívaný nejen ve filtraci, ale i například ve stavebnictví, zemědělství či architektuře například ve formě sacích mřížek, nebo ochrany světel.

Ve filtraci je využíván ve formě filtračního síta. Vyrábí se prostřiháváním plného plechu válcovaného za studena speciálními prostřihávacími noži. Díky svým vlastnostem se po prostřihnutí plech natáhne, aniž by ztratil svou pevnost. Odlučovací schopnosti tahokovu jsou přímo závislé na rozměrech jeho perforace. [28][29]



Obr. 6.1 - Příklad různých typů tahokovů. [30]

Principiálně podobným filtračním materiálem jsou **drátěná pletiva** (viz Obr. 6.2). Ty lze skládat do více vrstev a tím zvýšit odlučovací schopnosti dané vrstvy. Drátěná pletiva se vyrábějí z ohýbaných drátů a mají bezpočet způsobů využití ve všech typech odvětví počínaje lesnictvím či stavebnictvím a samotnou filtrací konče. Odlučovací schopnosti se zde odvíjejí od velikosti filtračních ok. Ty v atmosférické filtraci dosahují rozměrů desítek mikrometrů až jednotek milimetrů, dle výrobce. [31] Základním materiálem pro výrobu drátěných pletiv je nerezová ocel.



Obr. 6.2 - Příklad nerezového drátěného síta. [32]

**Syntetické perforované fólie** jsou polymerové fólie vyráběné perforací povrchu prostřihávacím nožem obdobně jako u tahokovů. Lze se s nimi setkat především ve stavebnictví ve formě nopových folií a geotextilií. Ve filtraci se používají i jako jedna z vrstev v kombinaci s filtračními vláknitými vrstvami. Principiálně fungují podobně jako tahokov či



drátěná pletiva. U polymerových folií lze však dosáhnout menších rozměrů perforace, což k vede ke schopnostem odlučovat částice o velikosti až jednotek mikrometrů.

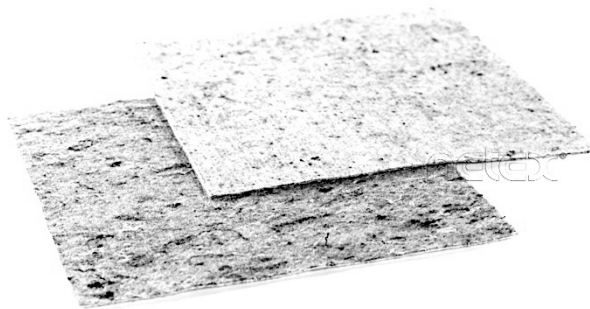
Mezi další způsoby vhodné pro hrubou filtraci atmosférického vzduchu se řadí například **filtrace pomocí kovových** či **umělohmotných třísek**, kde dochází k dalšímu využití jinak běžného odpadního materiálu. Dále pak **conidur**, což je specifický způsob perforace plechů trojúhelníkovým až poloeliptickým způsobem, díky kterému lze dosáhnout velice jemného děrování, případně různé druhy **gumových, štěrbinových**, či **polyuretanových sít**.

### 6.1.2 Vlákenné filtrační materiály

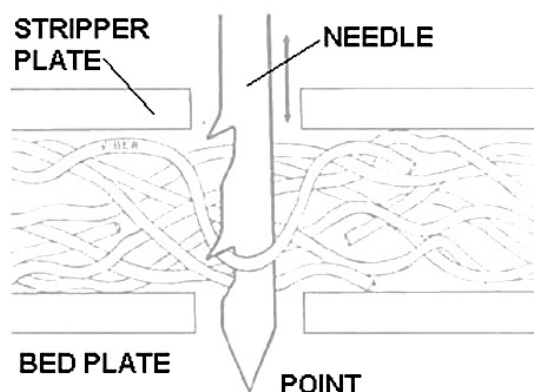
Do druhé skupiny filtračních materiálů pro průmyslovou filtraci řadíme vláknité filtrační materiály. Ty se od sebe vzájemně odlišují především průměrem vláken, ale také použitým materiálem vlákna a technologií výroby. Právě podle technologie výroby je lze rozdělit na **vpichované textilie, rouna, rohože a filtrační papíry**.

Vláknité materiály se vyznačují vyšší tlakovou ztrátou v řádu desítek až několika set pascalů a nižšími filtračními rychlostmi v řádu jednotek  $m/s$  až  $cm/s$ . Uplatňuje se zde setrvačný a intercepční princip, v některých případech i princip difúze, nastávajícího vlivem neuspořádaného pohybu částic v proudu plynu. Používají se například v klimatizačních jednotkách jako první i finální stupeň. [6]

**Vpichované netkané textilie** (viz Obr. 6.3) jsou tvořeny obvykle syntetickými vlákny propojených technologií vpichování na vpichovacím stroji. Mezi dvě perforované desky je přivedeno vláknité rouno, které je následně propichováno jehlami opatřenými ostny (viz Obr. 6.4), které při průchodu vrstvou zachytávají vlákna dané textilie a protahují je rounem. Při zpětném pohybu jsou tyto vlákna z jehly uvolněna a zachytávají se na vlákních okolních. Tím dochází ke zpevnování materiálů a zároveň dochází také k jeho ztenčení. Jedná se pravděpodobně o nejstarší technologii výroby netkaných textilií využívanou v mnoha průmyslových oborech.



Obr. 6.3 - Vpichovaná netkaná textilie od společnosti Netex. [33]



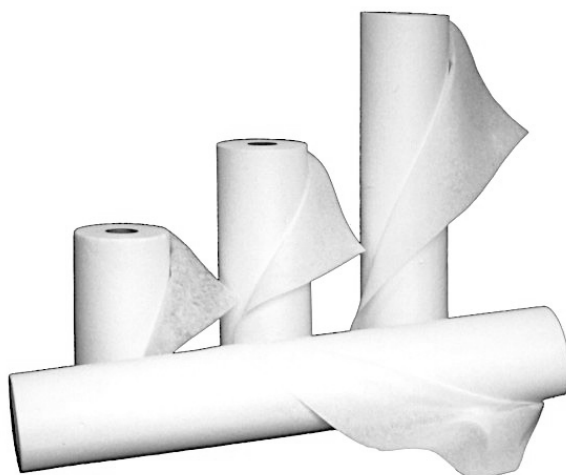
Obr. 6.4 – Schématické znázornění principu vpichovací technologie. [34]

Vpichované textilie se prodávají v mnoha provedeních od nehořlavých po textilie ze skelného vlákna či textilie opatřené koženkou. Jejich tloušťka se liší v závislosti na použití. Materiálem je polypropylen, polyester, bavlna, ale také například sklo a další. Je možné setkat se i s různými variacemi, kdy každá ze stran je opatřena jiným materiálem od papíru po syntetické materiály atd.

**Rouna a rohože** jsou filtrační materiály složené ze silnějších, v případě roun jemnějších, syntetických, minerálních či skelných vláken spojených impregnačním pojivem a v případě syntetických vláken i tepelným zpracováním. Na výstupní stranu rohoží se obvykle umísťuje tenká pojená vrstva tvořená materiálem různé struktury, fyzikálních vlastností či složení, sloužící ke zlepšení mechanických a odlučovacích vlastností materiálu, často však za cenu vyšší tlakové ztráty. [8]

Nejčastější je jejich použití ve vzduchotechnice jako součást klimatizačních jednotek, k filtraci vzduchu od ventilátorů a kompresorů, v tepelných výměnících, nebo v teplovzdušných ohřivačích. Existují v mnoha provedeních a tloušťkách, řádově jednotek milimetrů. Běžná jsou rouna spadající do třídy filtrace G2, G3, G4 i dalších.

**Filtrační papíry** (viz Obr. 6.5) se skládají z jemných skleněných, nebo organických vláken vyráběných papírenskou technologií. Jsou vhodné k filtraci emulzí a olejů. V atmosférické filtraci se pro své vlastnosti využívají ve skládaných filtrech. Mezi jejich největší výhody patří nízká cena a schopnost odolávat kapalinám. Díky své chemické odolnosti jsou hojně využívány v chemickém průmyslu, především pak v laboratorní filtraci. Vyskytují se ve vysoce účinných filtračních vložkách (EPA, HEPA filtry). Jsou schopny odolávat i teplotám okolo 80°C a jejich odučivost dosahuje i více jak 99,9 %.



*Obr. 6.5 - Role filtračního papíru. [35]*

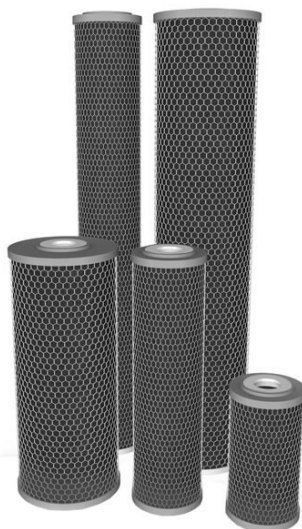
### 6.1.3 Porézní hmoty pro sorpční filtry

Do třetí skupiny lze zařadit **porézní hmoty pro sorpční filtry**. Sorpční filtry pracují na principu adsorpce. Využívají proto adsorpčních látek s velkým měrným povrchem, a tedy materiálů s velkým počtem pórů a trhlin. Jako nejběžnější sorpční látky se uplatňuje aktivního uhlí. Dále lze využít aktivní koks, silikagel atd. V atmosférické filtraci se sorbent

plní do filtračních patron (viz Obr. 6.6), případně kazetových filtrů. Z důvodu vysoké citlivosti sorbentu se předsazují filtry třídy F7.

V případě výroby sorbentu je snaha o dosažení co největšího měrného povrchu, například v případě aktivního uhlí až  $1250 \text{ m}^2/\text{g}$ . Hodnota měrného povrchu je z důvodu účinnosti u sorpčních filtrů klíčová. Aktivní uhlí je navíc schopno zachytit až 30 % hmotnosti náplně filtru, a to při zachování vysoké účinnosti odlučování a zároveň minimálních tlakových ztrát. [8] Účinnost lze dále zvýšit dobou zdržení plynu na sorpční vrstvě. Po delším časovém úseku je nutno filtr vyměnit, případně regenerovat. [36]

Aktivní uhlí je vhodné k zachytu organických látek jako je toluen, benzín, benzen, chloroform a další. [8] Často se využívá pro zachyt rozpuštěných ropných látek, a tedy k filtraci vody při ropných haváriích. Dalším způsobem využití jsou různé typy ochranných masek pro zaměstnance v jaderné energetice, armádě a u záchranných složek.



Obr. 6.6 – Filtrační patrona s lisovaným uhlím v kovové mřížce. [37]

## 6.2 Rozdělení filtračních materiálů v průmyslové filtraci

V průmyslové filtraci jsou na použité filtrační materiály kladeny vysoké požadavky, a to ať již kvůli působení vysokých teplot a koncentrací částic řádově v  $\text{g}/\text{m}^3$ , tak i kvůli

kyselému, zásaditému, případně jinak agresivnímu prostředí, značně ovlivňujícího vlastnosti dané filtrační vrstvy. Neméně důležitá je také nutnost regenerace filtračních materiálů, na kterých se tvoří filtrační koláč. Samotný proces regenerace filtru může filtrační materiál potřhat či jinak poškodit.

Filtrační materiály lze rozdělit do tří základních skupin a těmi jsou **filtrační textilie**, **zrnité vrstvy** a **porézní hmoty**. Při rozhodovacím procesu ohledně volby dané filtrační textilie je nutno zohlednit tři charakteristické skupiny vlastností [6]:

- **Fyzikálně-chemické:**
  - průměr vláken
  - poréznost
  - tloušťka
  - plošná hmotnost
  - pevnost v tahu
  - tažnost
  - teplotní odolnost
  - rozměrová stálost
  - prodyšnost
  - stupeň nehořlavosti
  - měrný elektrický odpor
  - navlhavost
  - voděodolnost

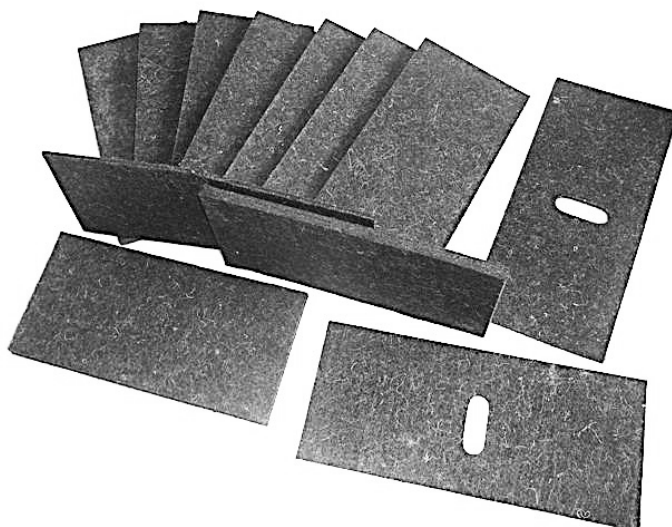
- **Filtrační:**

Odlučovací vlastnosti stanovené laboratorními zkouškami. Měří se především celková odlučivost filtračního materiálu  $O_c$  (%) a výstupní koncentrace  $C_v$  ( $mg/m^3$ ). V současné době lze u vysoce kvalitních materiálů dosáhnout celkové odlučivosti vyšší, než 99,99 % a výstupních koncentrací menších než  $1 mg/m^3$ .

- **Chemické:**

Chemické vlastnosti popisují odolnost filtračních materiálů vůči plynným znečišťujícím látkám, jakou jsou páry kyselin, zásad, nebo rozpouštědel. Chemickou odolnost lze hodnotit na základě úbytku pevnosti v tahu, a to například pěti stupni, kdy stupněm 5 (vynikající) je hodnocen materiál s úbytkem v tahu maximálně 5 % a stupněm 1 (nedostatečné) materiál s úbytkem v tahu vyšším, než 60 %. V některé literatuře či u některých výrobců se lze setkat i s tří nebo čtyř stupňovým hodnocením.

**Filtrační textilie** jsou nejrozšířenějším filtračním materiálem v průmyslové filtraci. Vyrábějí se dvěma způsoby a to tkaním, nebo vpichováním. V současné době se uplatňuje zejména technologie vpichování a tkaní slouží spíše pro výrobu filtračních textilií ze skelných, nebo kovových vláken. Princip výroby textilií vpichováním se v průmyslové filtraci od atmosférické nijak neliší a byl již popsán výše. Rozdíl spočívá především v použití odlišného materiálu pro výrobu vláken.



*Obr. 6.7 - Příklad plstěného filtračního materiálu. [38]*

Mezi netkané textilie vyráběné vpichováním patří plsti (viz Obr. 6.7). Plsti lze vyrábět i valchováním, ovšem tento způsob výroby se v současnosti příliš nevyužívá. Rozvoj plstěných filtračních materiálů je úzce spjatý s rozvojem syntetických vláken a dnes se používají u hadicových filtrů a šíjí se také ve formě kapes a vložek. Jejich vlastnosti lze zlepšit různými povrchovými úpravami či přidáním dalších filtračních vrstev.

Při výrobě filtračních textilií je nutno dbát na dostatečnou prodyšnost daného materiálu. Prodyšnost je specifickou vlastností filtračních textilií vyjádřenou v  $l/m^2s$ . Jedná se o hodnotu měrného průtoku filtrační vrstvou při dosažení předem dané tlakové ztráty. Čím nižší je tato hodnota, tím vyšší bude i provozní tlaková ztráta. Druhou významnou veličinou je teplotní odolnost. Ta je v případě průmyslové filtrace zvláště důležitá.

Tab. 6.1 – Teplotní a chemická odolnost základních filtračních materiálů. [39]

**FIGURE 1. Filter Media - Performance Characteristics**

Based on increasing temperature conditions

Fiber Type	Polypropylene	Polyester	Homopolymer Acrylic	Aramid	Polyphenylene Sulphide	Polyimide	PTFE	Spunbond Polyester		
Tradename			Dralon **	Nomex††	Ryton®	P84®				
Temperature F° (C°)	Media	Continuous Operating Temperatures (Dry) *	194 (90)	275 (135)	266 (130)	374 (190)	356 (180)	356 (180)	464 (240)	140 (60)
		Continuous Dry	212 (100)	302 (150)	284 (140)	392 (200)	374 (190)	500 (260)	482 (250)	140 (60)
		Continuous Moist	212 (100)	212 (100)	257 (125)	356 (180)	374 (190)	356 (180)	482 (250)	140 (60)
		Peak	230 (110)	356 (180)	302 (150)	482 (250)	446 (230)	572 (300)	536 (280)	176 (80)
		Melting Point or Decomposition	320 (160)	482 (250)	482 (250)	752 (400)	545 (285)	842 (450)*	554 (290)	464 (240)
Supports Combustion	YES	YES	YES	NO	NO	NO	NO	YES		
Abrasion Resistance	Very Good	Excellent	Good	Excellent	Good	Very Good	Moderate	Moderate		
Resistance to Hydrolysis	Excellent	Poor	Good	Good	Excellent	Very Good	Excellent	Poor		
Resistance to Acids	Excellent	Good	Good	Very Good	Excellent	Very Good	Excellent	Very Good		
Resistance to Alkalies	Excellent	Good	Very Good	Very Good	Very Good	Very Good	Excellent	Good		
Resistance to Oxidizing Agents	Moderate	Very Good	Very Good	Very Good	Poor	Very Good	Excellent	Very Good		
Resistance to Organic Solvents	Good	Very Good	Very Good	Excellent	Excellent	Very Good	Excellent	Very Good		
Relative Cost vs. Polyester	x2.0 – 2.5	x1	x2.5 – 3.0	x5	x7	x10	x25	x0.85		

\* Begins to carbonize above this temperature

\*\* Dralon is the only true 100% Homopolymer Acrylics

† Nomex is a registered trademark of E.I. DuPont de Nemours & Co., Inc.

Ve filtraci obecně platí, že do teploty 120 °C lze využít prakticky jakéhokoli syntetického či přírodního filtračního materiálu s patřičnou úpravou [40]. U některých syntetických materiálů lze například dosáhnout teplotní odolnosti i vyšší než 200 °C. U filtračních textilií ze skelných vláken je běžná teplotní odolnost do 300 °C a v případě kovových vláken dokonce vyšší. Teplotní a chemická odolnost, ale i další specifické vlastnosti, včetně případných obchodních názvů různých filtračních materiálů jsou obecně znázorněny v tabulce 6.1. [39].

Dnes se ve filtraci uplatňují především polymery jako je polypropylen, nebo polyester a různé jejich deriváty. Za posledních třicet let tak odstranily monopol skelných vláken, kterým dnes zůstává přibližně 40 % podíl na trhu. Hlavním důvodem této změny je zvýšení účinnosti a snížení tlakové ztráty polypropylenových vláken. Dále jejich lepší



mechanické vlastnosti, především pevnosti v tahu, která v kombinaci s pružností vláken zabraňuje jejich lámání [41]. Dalšími nezanedbatelnými důvody úspěchu polymerů jsou jejich schopnosti odolávat mikroorganismům a teple. Jako v současnosti pravděpodobně nejkvalitnější materiál z hlediska odolnosti je hodnocen Polytetrafluorethylen, zkráceně PTFE. [41]

Nelze opomenout i skelná a uhlíková vlákna. Skelná vlákna (viz Obr. 6.8) jsou vyráběna tkaním na speciální tkacích strojích. Vynikají především díky svým chemickým schopnostem odolávat různým formám kyselých par a podobně. Díky specifickým výroby lze pomocí postupné změny průměru vláken dosáhnout rozdílné hustoty na obou stranách filtrační tkaniny [15]. Rozměry skelných vláken závisí na typu jejich použití. Jsou známy pod obchodními názvy jako Fiber-glass, nebo Vetrotex. Jejich největší nevýhodou je křehkost a nízká schopnost odolávat abrazivním materiálům [42].



*Obr. 6.8 - Struktura skelného vlákna. [43]*

Uhlíková, někdy též karbonová vlákna se pak ve filtraci využívají pouze v malé míře, a to mimo jiné kvůli jejich příliš vysoké ceně oproti skelným vláknům a polymerům. Jejich výhodou je vysoká tepelná a chemická odolnost.

U **porézních hmot** je základním ukazatelem dosažení co největšího možného měrného povrchu, na kterém probíhá odlučování částic. Nejznámějším porézním materiálem využívaným ve filtraci je aktivní uhlí. V případě **zrnitých vrstev** se využívá například písků a podobně. Zrnité vrstvy se uplatňují především ve vodárenské filtraci a méně již v průmyslové filtraci plynů.

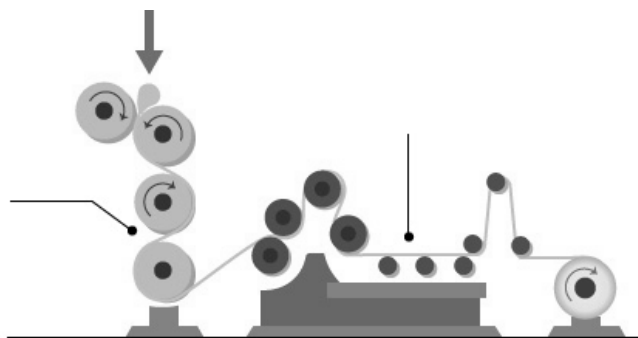
## 6.3 Povrchové úpravy

Povrchové úpravy filtračních materiálů se provádí s cílem zlepšit jejich filtrační vlastnosti, tedy především zvýšit jejich odlučivost, a to s ohledem na co nejmenší tlakovou ztrátu, ale také například pro zlepšení regenerace a zvýšení jejich tepelné a chemické odolnosti a vylepšení dalších fyzikálně-chemických vlastností.

Způsobů povrchových úprav je více, patří sem například různé způsoby **tepelného ošetřování povrchů**, **kalandrování**, **tepelné kladení**, **impregnace**, **povlakování** a různé **antistatické úpravy**, ale také **ochrana proti jiskrám**. [40]

V případě **tepelného ošetření povrchu** lze hovořit o čtyřech způsobech provedení, a to zažehlováním, tedy propojením vrstev působením tepla, opalováním plamenem, popřípadě infrazářičem, nebo glazováním, tedy tepelným nanášením povlaku.

V případě **kalandrování** dochází působením válců na danou vrstvu k jejímu stlačení a tím i změně tloušťky a hustoty vrstvy. Obvykle se jedná o stroje s třemi a více válci nad sebou, kterými prochází filtrační textilie. Princip kalandrování je zobrazen na obrázku 6.9.



Obr. 6.9 – Princip kalandrování. [z46]

Při **tepelném kladení** dochází k odstranění sraženin ve vláknité vrstvě a zvyšování objemnosti a stálosti vláken a v některých případech i ke zvyšování tepelné odolnosti vláknité vrstvy. Tohoto efektu je dosaženo za pomoci působení ohřátých par, případně působením suchého tepla. Používá se na syntetická, ale i přírodní vlákna jako je bavlna.

**Impregnace** (viz Obr. 6.10) je rozšířeným způsobem úprav povrchů filtračních materiálů, především pak syntetických vláknitých vrstev. Spočívá v sycení materiálu jinou, obvykle chemickou látkou za účelem zlepšení jeho vlastností. Impregnace lze obecně rozdělit podle způsobu poskytované ochrany danému materiálu.

V první řadě se jedná o hydrofobní úpravy, tedy úpravy zabraňující vniknutí par a kapalin, především pak olejů, které by měly za následek poškození filtračního materiálu, respektive filtru, případně zhoršení jeho odlučovacích vlastností. Hydrofobní úpravy lze provádět smáčením filtračního materiálu v lázni obsahující voděodolné látky, jako je například pryskyřice. Dále se jedná o poskytování chemické ochrany před působením kyselých a zásaditých par a proti hydrolýze způsobující například rozklad celulózových vláken.

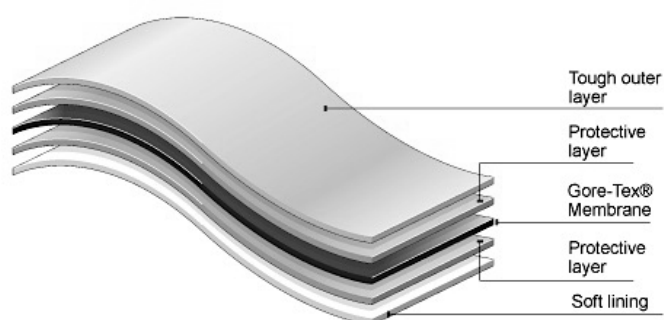


*Obr. 6.10 – Impregnovaný povrch zabraňující vniknutí kapaliny. Kapalina se na povrchu vysráží ve formě malých kapek. [44]*

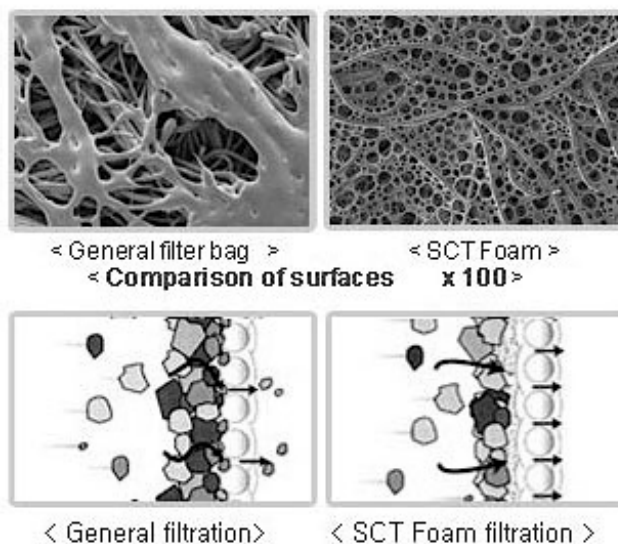
Dalším způsobem povrchových úprav je **povlakování**. To je hojně užívané především pro schopnost zachytávat prach a kvůli vylepšení regeneračních vlastností materiálu.

Povlakování se děje nanášením vrstvy specifického materiálu na filtrační vrstvu. Povlakovou vrstvu může tvořit například teflonová membrána. Ta, podobně jako u impregnace, zabraňuje vnikání kapalin a par, odpuzuje oleje a chrání před kyselinami a zásaditými roztoky. Znamé jsou například membrány Gore-Tex (viz Obr. 6.11) od firmy Gore.

Dalším způsobem je nanášení mikroporézního pěnového povlaku, který stejně jako v případě teflonových membrán odpuzuje oleje a zároveň, díky svému velkému měrnému povrchu zlepšuje odlučovací vlastnosti filtračního materiálu. Mikroporézní pěnový povlak se obvykle aplikuje na polyesterová, případně akrylová vlákna. [40] Na obrázku 6.12 je mikroskopické porovnání běžné filtrační vrstvy s vrstvou tvořenou mikroporézní pěnou.



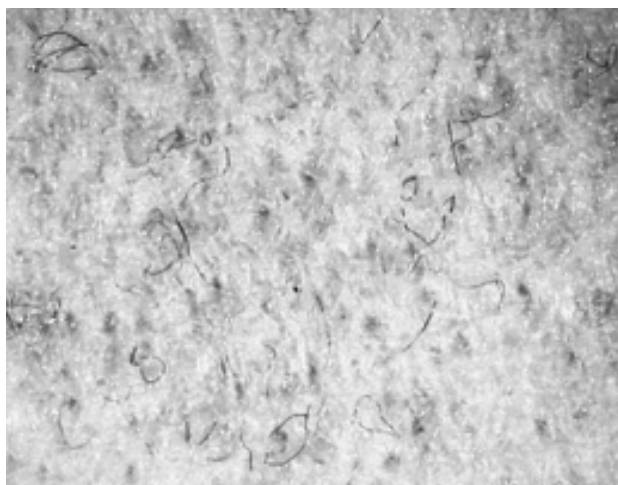
Obr. 6.11 – Filtrační materiál skládající se z houževnaté svrchní vrstvy, ochranné vrstvy, Gore-Textové membrány, druhé ochranné vrstvy a měkké podšívky. [45]



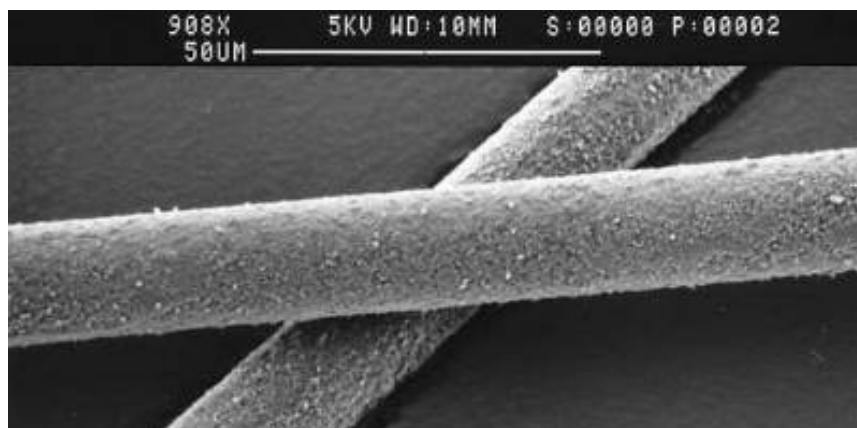
Obr. 6.12 – Struktura běžné filtrační vrstvy a mikroporézní pěnové vrstvy a jejich vliv na odlučivost. [46]

**Antistatické úpravy** (viz Obr. 6.13) se používají v případě ochrany materiálu před výbušnými a vysoce vodivými prachy. Toto nebezpečí často vzniká použitím syntetických materiálů, které shromažďují elektrický náboj vedoucí k výboji způsobujícího výbuchy.

Z toho důvodu se do filtrační vrstvy přidávají vysoce vodivá vlákna z mědi. Lze využít i nerezových vláken, popřípadě vláken s vodivou vrstvou skládající se například z částic uhlíku (viz Obr. 6.14).



Obr. 6.13 - Struktura vláknité vrstvy opatřené antistatickou úpravou. [47]

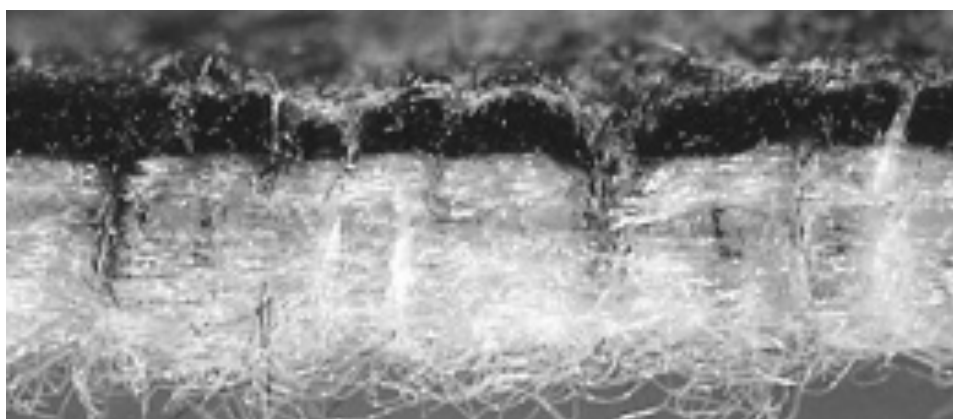


Obr. 6.14 - Struktura vlákna Epitropic, skládajícího se z polyesterového vlákna obsahujícího vodivé uhlíkaté částice. [48]

Poslední zde jmenovaná úprava je **ochrana proti jiskrám** (viz Obr. 6.15). Ta se používá za účelem chránění textilního filtračního materiálu před poletavými žhavými

částicemi a tím i jako ochrana před jeho vzplanutím, či případným poškozením vlivem vysoké teploty těchto částic.

Ochrana proti jiskrám zajišťuje, že nedojde ke kontaktu žhavých částic s odlučovací vrstvou, to lze zajistit například nánosem nehořlavé vrstvy materiálu, případně vrstvy zpomalující hoření. Další možnosti jsou různé formy povlakování či chemická impregnace zabraňující hoření. Důležité je vždy zachovat správnou funkčnost a dostatečnou odlučivost filtračního materiálu. [40][47]



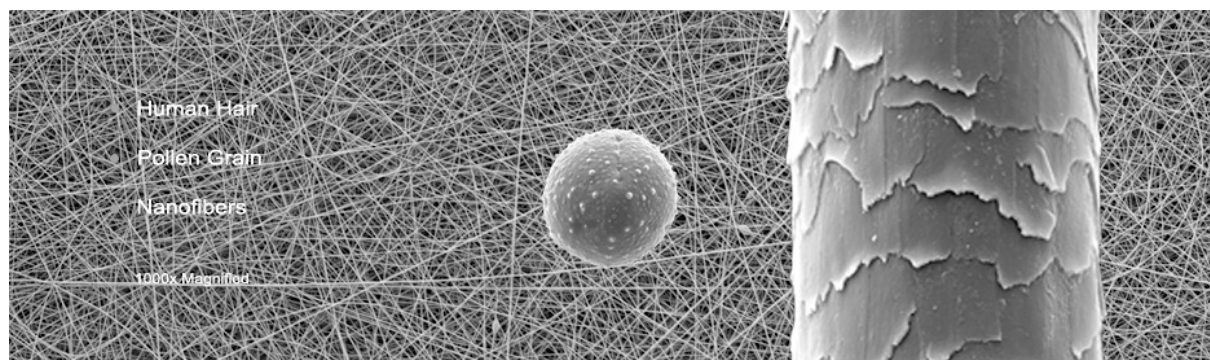
*Obr. 6.14 - Vlákenná filtrační vrstva opatřená ochranou proti jiskrám od společnosti Kayser Filtertech GMBH. [47]*

## 7. Technologie nanovláken

Technologie výroby nanovláken byla zkoumána od počátku minulého století. Ve 40. a 50. letech 20. století proběhly první pokusy o jejich výrobu. Reálné využití a pokrok výzkumu nanovláken ve filtraci však nastal až v novém tisíciletí. Od té doby obor velice rychle roste a věnují se mu desítky pracovišť po celém světě. [49][50]

Například studie z května 2016 informuje o tom, že globální trh s nanovláknou dosáhl obratu 203,2 milionů dolarů v roce 2013 a 276,8 milionů dolarů v roce 2014. Předpokládá se růst z 383,7 milionů dolarů v roce 2015 na téměř dvě miliardy dolarů v roce 2020. To představuje průměrný roční růst o 38,6 %. [51]

Nanovlákná používaná ve filtraci jsou obecně vlákna o průměru menší než  $1 \mu\text{m}$  (viz. Obr 7.1). Obvykle se pohybují v rozsahu 100 až 800 nm. [50] Díky svým vlastnostem jsou schopna zachytávat submikronové částice, které mají negativní vliv na naše zdraví. Další výhodou nanovláken je jejich velký měrný povrch, malé rozměry pórů, malá tloušťka vrstvy a v poměru s jinými materiály i nízký růst tlakové ztráty. [40]



Obr. 7.1 – Porovnání velikosti lidského vlasu, zrnka pylu a nanovláken. [52]

### 7.1 Charakteristika a vlastnosti nanovláken

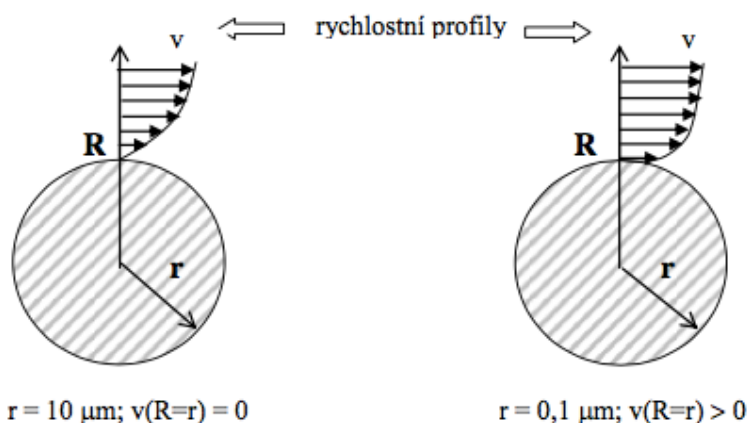
Jako základní charakteristika nanovláknitých struktur je uváděna [50]:

- tloušťka vrstvy (a její změny ve vrstvě)
- průměr vlákna (a jejich rozložení)

- rozměry pórů (a jejich rozložení)
- poréznost
- faktor křivosti (který je indikátorem geometrie a propojenosti pórů)

V pracích zabývajících se problematikou nanovláknitých vrstev a jejich hodnocením se obvykle využívá znalosti tloušťky vrstvy, průměru vláken, plošné hmotnosti a poréznosti, případně prodyšnosti vrstvy. Často se lze také setkat s tzv. faktorem kvality  $Q$  vyjadřujícího poměr mezi průnikem částic a tlakovou ztrátou, tedy  $\ln P / \Delta p_z$ . Vzhledem ke skutečnosti, že kvalitní filtry mají nízký průnik škodlivých částic, a tedy vysokou účinnost filtrace a zároveň nízkou tlakovou ztrátu, představuje právě vysoká hodnota  $Q$  filtr vyšší kvality a naopak.

Specifikem nanovláken jsou jejich okrajové podmínky proudění, kdy při obtékání vlákna dochází ke skluzu. To se projevuje tím, že na povrchu vlákna je nenulová rychlost a plyn proudící vrstvou je díky nízké aerodynamické odporové síle méně brzděn, což má vliv na výslednou nízkou hodnotu tlakové ztráty. Tento jev je zobrazen na obrázku 7.2, kde je oproti běžnému vláknu patrná právě nenulová rychlost na povrchu nanovlákná. Dále se nanovlákná projevují zvýšenou odlučivostí v oblasti záchytu velmi malých částic o velikostech menších než  $1 \mu m$ . [40][50][53]

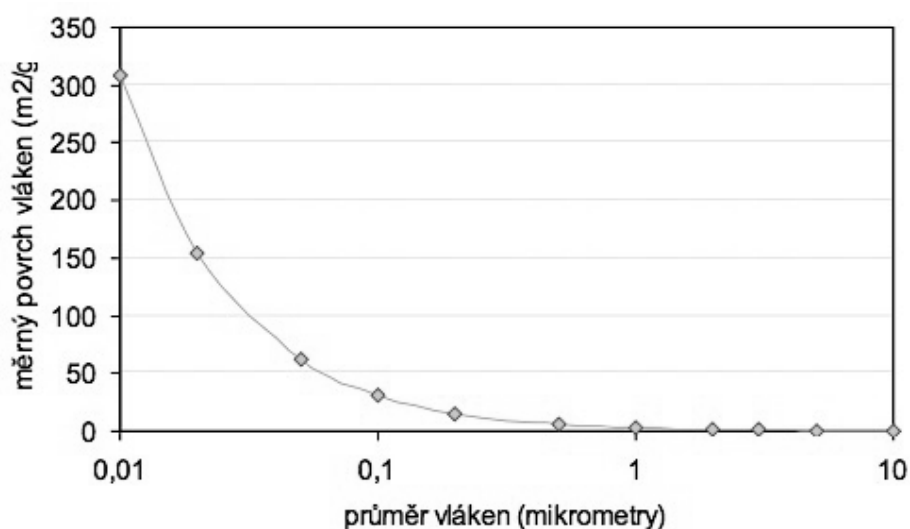


Obr. 7.2 – Porovnání rychlostního povrchu běžného vlákna (vlevo) a rychlostního profilu nanovlákná (vpravo). [53]



V běžných podmínkách dochází ke skluzu molekul na povrchu vlákna až při průměru vlákna menším než  $528 \text{ nm}$ . Tento rozměr je dán **Knudsenovým kritériem**  $Kn [-]$ , které je podílem **molekulové dráhy nosného plynu**  $\lambda_l$  a **poloměrem filtračního vlákna**  $R$ . Skluzu molekul plynu na povrchu nanovláken odpovídá velikost Knudsenova kritéria  $Kn = 0,25$ . Zohledněním volné molekulové dráhy vzduchu  $\lambda = 6,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  lze dojít právě k výsledné hodnotě průměrů vlákna  $528 \text{ nm}$ . Z toho vyplývá, že hodnota nanovláken by měla být vždy menší, než přibližně  $500 \text{ nm}$ , a tedy  $0,5 \mu\text{m}$ . V současné době je v jemné filtraci jako nejvhodnější velikost vlákna udáván rozměr  $200$  až  $300 \text{ nm}$ . [40][54][55]

Na obrázku 7.3 je vyobrazena závislost měrného povrchu vrstvy na průměru vláken. Z grafu je patrná jedna z hlavních výhod nanovláken, a tedy že měrný povrch vláken se snižujícím se průměrem vlákna roste. Skutečné hodnoty měrného povrchu budou vzhledem k mezivlákněným kontaktům pravděpodobně nižší. [53]



Obr. 7.3 – Vztah mezi měrným povrchem kruhových vláken a jejich průměrem. [53]

## 7.2 Výroba nanovláken

V případě nanovláken lze hovořit o dvou základních způsobech výroby a těmi je metoda **elektrospinning** (electrospinning, případně electrostatic spinning), tedy způsob výroby nanovláken pomocí elektrostatického zvlákňování a technologie „**melt-blown**“, tedy výroba zvlákňováním z taveniny.

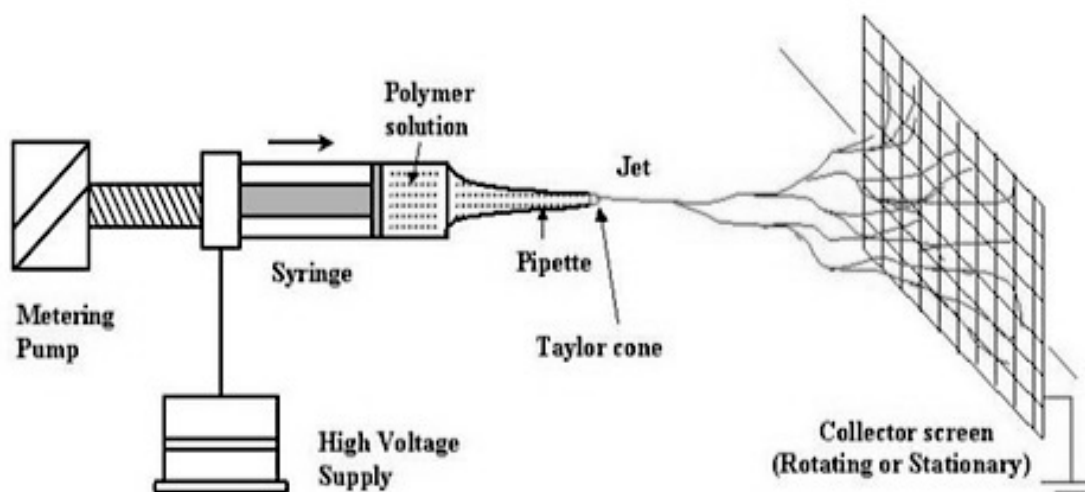
Dalšími způsoby výroby nanovláken jsou různé variace na předchozí metody jako například **elektroblowing** a technologie **nanospider**. Dále například **forcespinning** a další. [52][53][56]

### 7.2.1 Elektrospinning

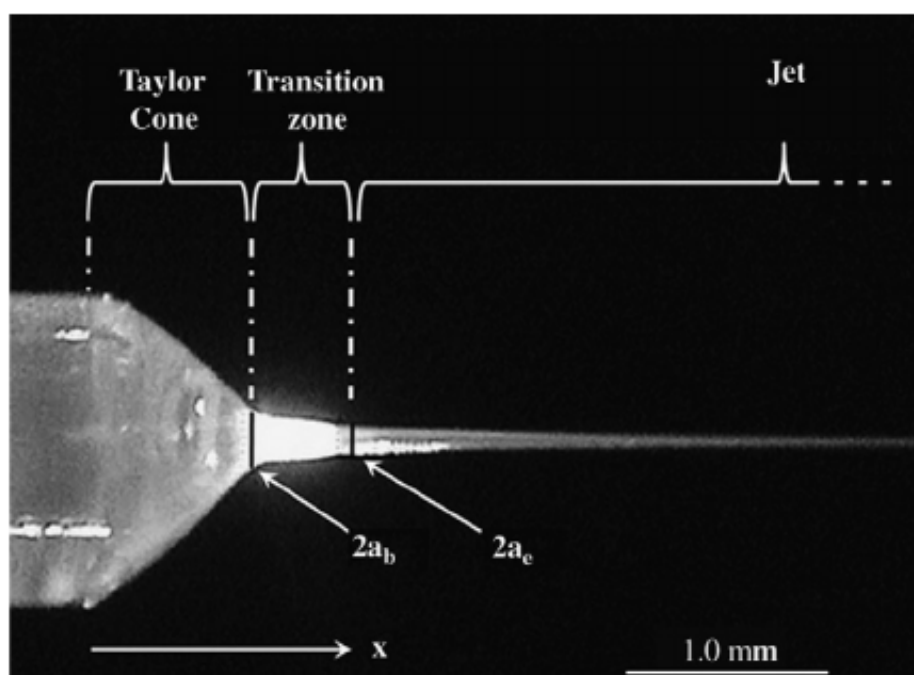
Nejběžnější metodou výroby nanovláken je technologie **elektrostatického zvlákňování**. Princip této technologie je znám od počátku minulého století a svého experimentálního ověření se dočkala v polovině třicátých let minulého století. Reálného uplatnění při výrobě nanomateriálů se však dočkala až v novém tisíciletí objevením způsobu uplatnění této metody v průmyslové výrobě nanovláken.

Metoda **elektrospinningu** (viz Obr. 7.4) využívá elektricky nabitých částic v roztoku polymerů, který je následně působením silného **elektrostatického pole** vytlačován z elektrody a tryskán na uzemněný kolektor. Při tomto procesu dochází ke tvorbě nanovláken a zároveň působením trysek a díky velkému měrnému povrchu vláken k vypařování rozpouštědel ve vlákne, jehož výsledkem je zachycení suchých vláken na podkladovém sběrači. [53][54][57]

Samotné **elektrostatické pole** je nehomogenní a jeho intenzita je závislá na geometrii elektrod, kdy při nižším poloměru křivosti elektrody intenzita elektrostatického pole roste, a naopak při vyšším poloměru klesá. Vytlačení roztoku polymeru na vrcholek elektrody dochází především působením Coulombovy síly k deformaci této hladiny roztoku a zároveň k růstu působení intenzity elektrostatického pole na roztok. Tažením tohoto vrcholku hladiny roztoku k protější elektrodě dochází ke strhávání zbylého roztoku polymeru a tím ke tvorbě tzv. **Taylorova kuželu** (viz Obr. 7.5). [53]



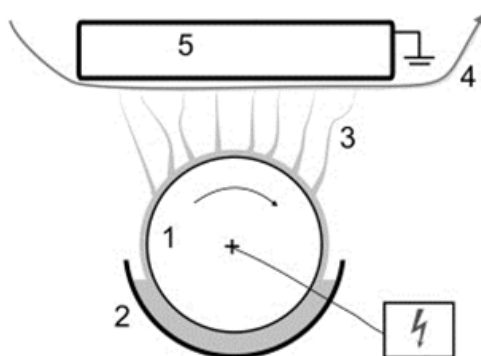
Obr. 7.4 – Schématický popis výroby nanovláken za pomoci elektrostatičkého zvlákňování. Dávkořač je napojen na zdroj vysokého napětí, který působí na roztok polymeru, který je následně působením Coulombových sil vytlačován z vrcholku elektrody a tryskán na uzemněný kolektor. [57]



Obr. 7.5 – Popis tvorby Taylorova kuřele na vrcholku elektrody s následnou přechodovou fází a polymerní tryskou. [58]

Rozměry nanovláken vyráběných touto metodou dále závisí na použitém napětí a volbě vhodného roztoku. Právě vhodný polymerický roztok a rozpouštědlo jsou určující pro tvorbu různých variant nanovláken o velikosti průměru vlákna 40 *nm* a více. Z důvodu malé tloušťky výsledného filtračního materiálu a nevhodným mechanickým vlastnostem se obvykle nanovláknitá filtrační vrstva nanáší na podkladový materiál. Tím dojde ke zlepšení celkové odlučivosti filtru a zároveň i jeho mechanických vlastností. [57]

Nevýhodou této metody výroby nanovláken při použití trysky ve formě jehly je velice nízká produktivita výroby a nestejněměrnost vyrobené filtrační vrstvy. Často také dochází k ucpávání trysky a ke spirálovitému pohybu vláken. Z tohoto důvodu se objevily pokusy o vylepšení této technologie, například tryskáním více jak jednoho vlákna současně. Aktuálně nejúspěšnější je nahrazení vstříkovací jehly válečkem, které se uplatňuje například v metodě **Nanospider** (viz Obr. 7.6 a 7.7) od libereckého výrobce Elmarco. [53][59]



Obr. 7.6 - Schématický popis metody nanospider. Na rotující váleček (1) je nanášen roztok (2), následně dochází ke vzniku Taylorových kuželů a vznikají vlákna (3) tryskající směrem na uzemněný kolektor (5) a tvořící netkaný substrát (4). [60]

Kuželová elektroda je v tomto případě nahrazena elektrodou ve formě válečku, pod kterým je umístěn polymerový roztok. Za pomoci otáčení válečku dochází k nanášení roztoku a jeho posouvání směrem k proti ležící elektrodě. V místech nejmenší vzdálenosti obou elektrod dále dochází ke tvorbě většího počtu **Taylorových kuželů**. Zbytek metody je již shodný s technologií využívající dávkovací jehlu. [52][53]

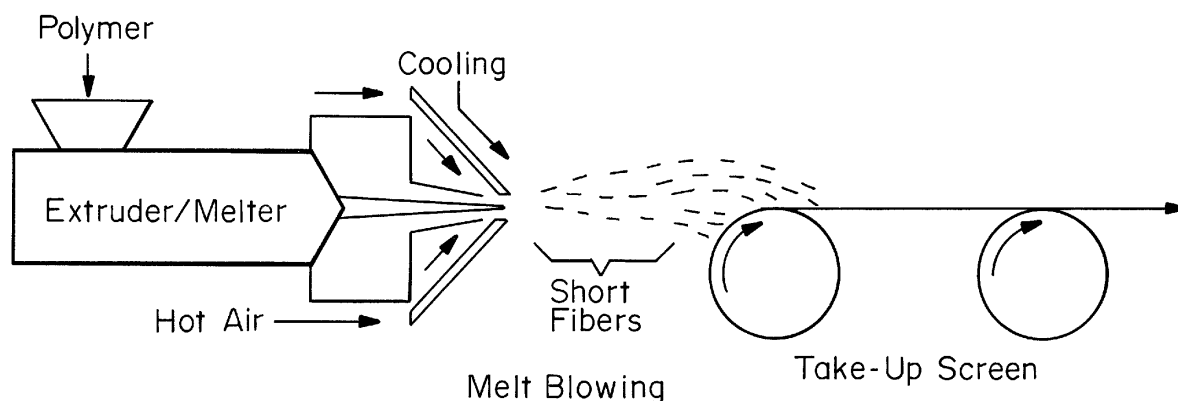


*Obr. 7.7 - Reálná aplikace roztoku polymerů při tvorbě nanovláken v případě metody nanospider od výrobce Elmarco. [52]*

## 7.2.2 Metoda „melt-blown“

Metoda **melt-blown** (melt blown, melt blowing, MB) (viz Obr. 7.8), tedy tavné zvlákňování, je technologií výroby nanovláken za pomoci vytlačování polymeru skrze extrudér (pozn.: vytlačovací lis) působením ohřátého proudu plynu, obvykle vzduchu, o vysoké rychlosti (viz Obr. 7.8). Vlákna jsou postupně zeslabována na konečný rozměr a následně zachytávána na substrátu, jenž je nanesen na sběrném kolektoru. Touto metodou lze dosáhnout průměru vláken až  $0,1 \mu\text{m}$ . Obvyklé rozměry jsou však podstatně větší a dosahují 2 až  $4 \mu\text{m}$ . [61]

Výhodou **tavného zvlákňování** je využití pouhého působení proudu plynů na roztavený materiál a také nízká cena výroby, nevýhodou jsou však zmíněné větší rozměry vláken než u konkurenční technologie **elektrostatického zvlákňování**.



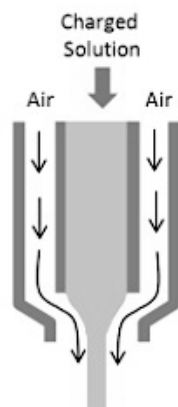
Obr. 7.8 - Princip výroby nanovláken zvlákňováním z taveniny. Do extruderu je přiveden polymer, který se působením horkého vzduchu začne tavit a následným tryskáním vznikají tenká vlákna, která dále ulpívají na kolektoru, jenž je opatřen vrstvou substrátu. [62]

### 7.2.3 Ostatní metody

Další metody jsou obvykle různými variacemi na metody předchozí. Takovými metodami jsou například metoda **nanospider** popsaná výše, případně metoda „**elektroblowing**“.

„**Elektroblowing**“ (electroblowing) je podobný metodě **melt-blown**. Obě metody využívají proudy plynu ke zvlákňování, avšak s tím rozdílem, že zatímco v případě metody melt-blown je vlákno taženo výhradně působením proudy plynu, v případě elektroblowingu (viz Obr. 7.9) je vlákno taženo působením elektrostatického pole a tažná síla tvořená působením proudy plynu je využita pouze v prvotních fázích tažení vlákna.

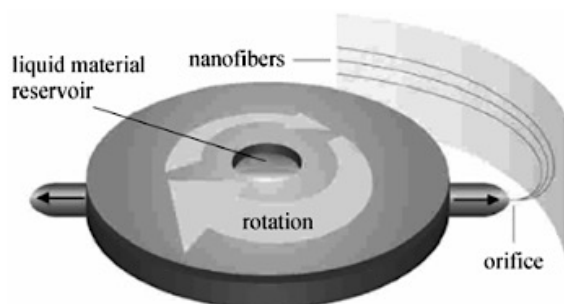
Využitím působení elektrostatického pole dochází až k 60 % redukci průměru vlákna oproti metodě melt-blown a tím k tvorbě vláken menších než  $1 \mu\text{m}$  oproti obvyklým 2 až  $4 \mu\text{m}$  dosahovaných standardním tavným zvlákňováním. [56]



Obr. 7.9 - Zjednodušené schéma trysky při elektroblowingu. [56]

Další zde zmíněnou technologií výroby je tzv. „**Forcespinning**“ (viz Obr. 7.10). Jedná se o poměrně novou metodu, jejíž princip spočívá ve využití odstředivé síly, kdy polymerní roztok, případně tavenina je působením odstředivé síly vytlačován z rychle se otáčejícího ústí zvlákňovací trysky, kde následně tvoří vlákna. Tato vlákna dále ulpívají na kolektoru umístěném v okolí rotujících trysek a dochází tak k tvorbě tenké vláknité vrstvy. [63]

Uspořádání a velikost vláken závisí na použitém polymerním roztoku, případně na druhu použité taveniny. Na výslednou filtrační vrstvu má dále vliv rychlost otáčení trysek, vzdálenost ústí trysky od kolektoru a další. Touto metodou lze dosáhnout nanovláken o průměru 100 až 600 nm, avšak technologie je stále ve vývoji. [63]



Obr. 7.10 - Schéma popisující metodu Forcespinning, kdy rotací kotouče opatřeného zvlákňovacími tryskami a následnému vypuzování materiálu z ústí těchto trysek a jejich dopadání na kolektor dochází k tvorbě filtračního materiálu. [63]

## 7.3 Použití nanovláken

S technologií nanovláken se lze setkat jak v atmosférické, tak v menší míře i průmyslové filtraci. Ve filtraci je obvykle používán ve formě vícevrstvého filtračního materiálu s podkladovým substrátem, kdy větší počet vrstev filtr zpevňuje a dále zlepšuje vlastnosti filtrační vrstvy. Nanovláknna se uplatňují například v medicíně jako součást ochranných pomůcek (respirátory, roušky atd.), ale také jako obvazový materiál, nebo materiál využívaný ve tkáňovém inženýrství. Dalším příkladem uplatnění nanovláken jsou akustické izolační materiály, bateriové separátory, automobilový průmysl, filtrace paliv nebo výroba funkčních oděvů. [52]

### 7.3.1 V atmosférické filtraci

V atmosférické filtraci jsou filtry tvořené nanovláknny často využívány jako součást ochranných pomůcek (viz Obr. 7.11). Sem patří například ochranné prostředky dýchacích orgánů, běžně známých pod pojmem respirátory a souhrnně popsáných v EN 143, 2000.

V případě těchto filtrů je nutné zachytit co největší množství malých částic při co nejnižší tlakové ztrátě zajišťující komfort při dýchání. Z toho plyne vhodnost použití nanovláken jako jedné z vrstev filtračního materiálu. Filtrační materiál lze použít například ve formě skládaného filtru umístěného v kontejneru (typicky u polomasek), případně vrstvy ve formě ochranné roušky. [53][64]





Obr. 7.11 – Použití vícevrstvého filtračního materiálu obsahující vrstvu nanovláken v případě ochranných masek vyvinutých na Hong Kong Polytechnic University. [64]

U ochranných masek lze při výrobě nanomateriálu kromě běžného elektrostatického zvlákňování využít i metodu elektroblowing, která však vlivem přítomnosti vlhkosti v lidském dechu není pro tyto účely nejvhodnější. [53]

Dalším využitím nanovláken v atmosférické filtraci jsou jemné částicové filtry třídy H (HEPA) a U (ULPA) popsané v ČSN EN 1822:2010. Tyto filtry se používají například ve filtraci vnitřních prostor jako součást klimatizačních jednotek, ventilací a podobně (souhrnně označováno jako HVAC aplikace).

Využití nanovláken a zkoumání jejich charakteristik se podrobněji věnovaly například studie [65] zkoumající průnik částic v závislosti na velikosti částice při dané rychlosti a porovnávající nanovlákný materiál s filtračním materiálem ze skelných vláken, studie [66] zkoumající vliv rozměrů nanovláken z materiálu Nylon 6 na tlakovou ztrátu a účinnost a porovnávající tyto hodnoty s běžným HEPA filtrem a práce [53], kde byl porovnáván vliv různých kombinací skládaných vrstev na odučování a tlakovou ztrátu.

V práci [65] bylo využito faktoru kvality  $Q$  pro posouzení čtyř různých filtrů, skládajících se z vrstvy nanovláken a z důvodu zvýšení odolnosti filtru i podkladového substrátu. Tyto filtry zachytávaly částice stříbra o velikosti 3 – 20 nm, částice NaCl o

velikosti 20 – 300 nm a částice PSL o velikosti 780 nm (viz Obr. 7.12). Dále proběhlo porovnání vzorku C s běžnými filtračními materiály ze sklených vláken (HE 1073, 1021 a HF 0031, 0012) (viz Obr. 7.13). Čelní rychlost proudu částic byla 10 cm/s.

V tabulce 7.1 se nachází naměřené hodnoty objemového zaplnění, účinnosti a tlakové ztráty filtrů včetně substrátu. Parametry běžných filtračních materiálů ze skelných vláken jsou zobrazeny v tabulce 7.2.

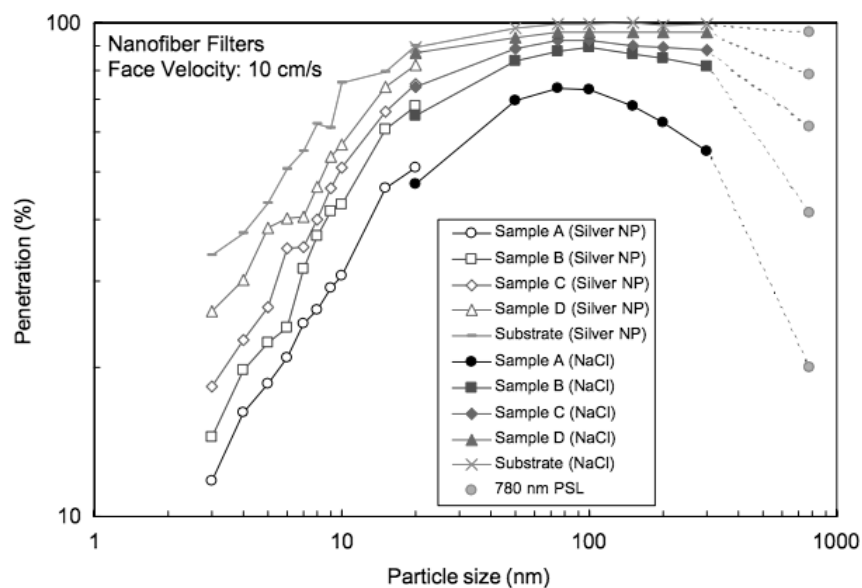
Výsledky tohoto experimentu ukázaly, že účinnost filtrace i tlaková ztráta se zvyšují s růstem poréznosti vrstvy složené z nanovláken. Celkové hodnocení dle faktoru kvality Q při porovnání filtračních materiálů ze skelných vláken se vzorkem C opatřeným vrstvou z nanovláken ukázalo, že při velikosti částic menších než 100 nm se rozdíl mezi nanovláknitými filtry a běžnými filtračními materiály stírají a že nejefektivnější využití nanovláken je při velikosti částic v rozmezí 100 až 1000 nm. [40][65]

Tab. 7.1 – Objemové zaplnění, účinnost a tlaková ztráta při rychlosti 10 cm/s. [65]

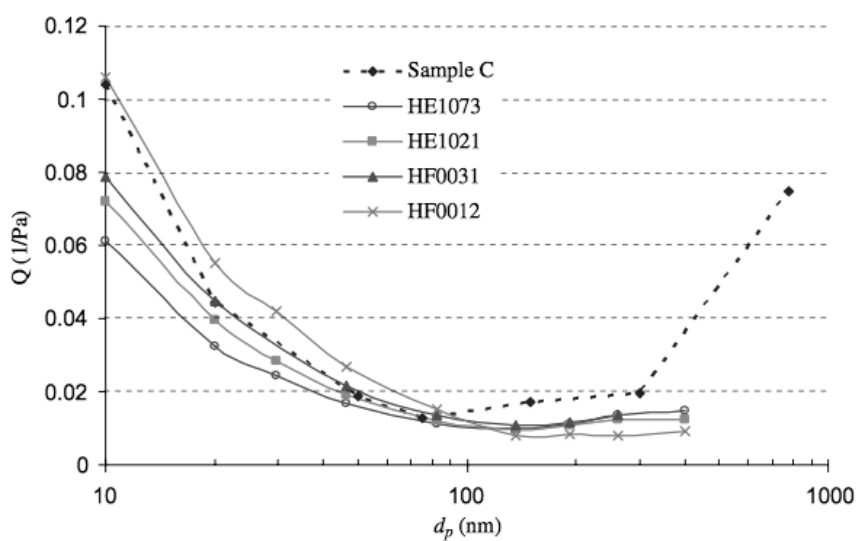
Vzorek	A	B	C	D	Substrát
Objemové zaplnění nanovrstvy $\alpha$	0,134	0,104	0,059	0,034	0
Účinnost (%)	80,01	58,84	38,4	21,36	4,28
Tlaková ztráta (Pa)	29,4	14,7	7,7	4,0	2,2

Tab. 7.2 – Parametry běžných filtračních materiálů ze skelných vláken. [65]

Vzorek	HE1073	HE1021	HF0031	HF0012
Tloušťka (cm)	0,053	0,069	0,074	0,074
Objemové zaplnění	0,05	0,049	0,047	0,039
Střední průměr vlákna ( $\mu\text{m}$ )	1,9	2,9	3,3	4,9
Průnik (%) pro částice DOP 0,3 $\mu\text{m}$ při 5,3 cm/s	12,8	39	45,8	79,9
Tlaková ztráta při čelní rychlosti 5,3 m/s (Pa)	82	46	34	13



Obr. 7.12 – Porovnání průniku částic v závislosti na velikosti částice při čelní rychlosti 10 cm/s. [65]

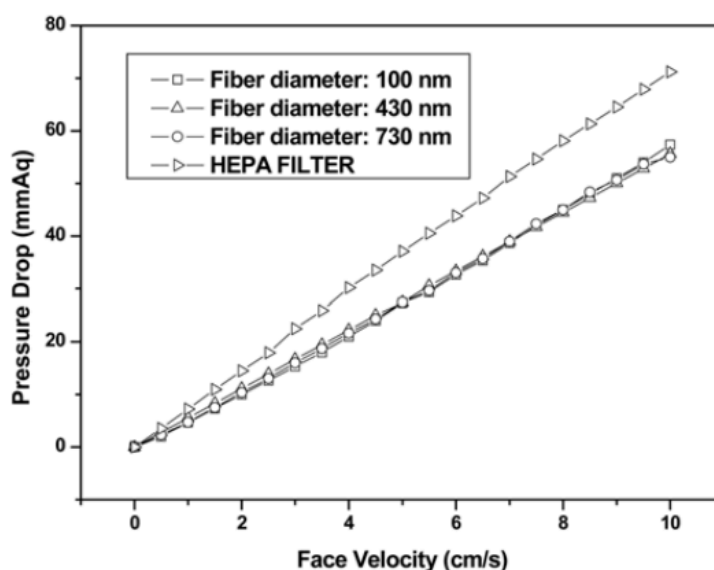


Obr. 7.13 – Porovnání faktoru kvality v závislosti na velikosti částic běžných filtračních materiálů ze skelných vláken a filtračního materiálu opatřeného vrstvou z nanovláken. [65]

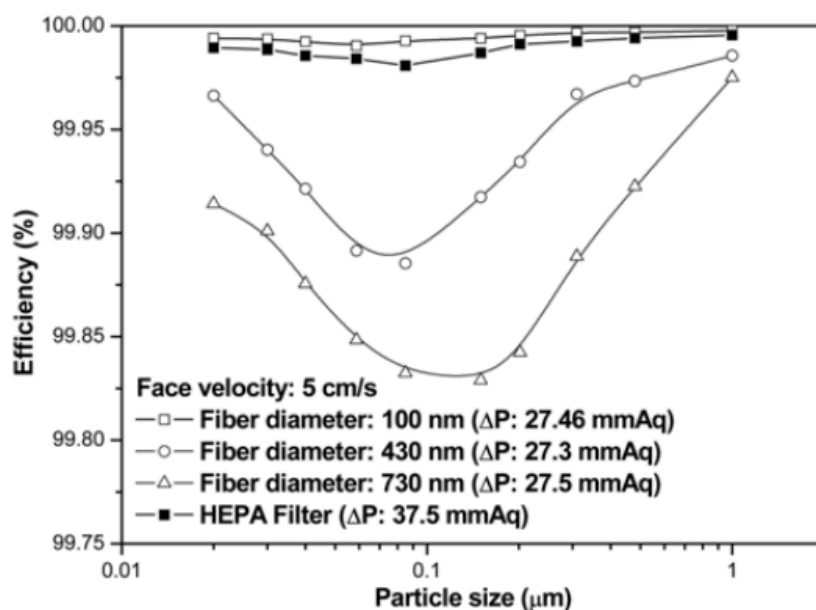
Ve studii [66] z roku 2006 byly například zkoumány filtračních schopnosti nanofiltru ze syntetického polymeru „Nylon 6“ (polycaprolactam) vyrobeného pomocí metody elektrostatického zvlákňování. Touto metodou bylo dosaženo vláken o průměrech

100, 430 a 730 nm, které v průběhu experimentu zachytávaly částice o velikosti 0,02 až 1  $\mu\text{m}$ . O případném materiálu podkladové vrstvy filtračního materiálu se práce nezmiňuje.

Při zkoumání vlivu filtrační rychlosti na tlakovou ztrátu bylo zjištěno, že filtry z materiálu Nylon 6 mají nižší tlakovou ztrátu než běžně používané HEPA filtry (viz Obr. 7.14). V případě zjišťování účinnosti odlučování (viz Obr. 7.15) při čelní rychlosti 5 cm/s vyšlo porovnáním výsledků dále najevo, že použitý nanofiltr s vlákny o průměr 100 nm dosahuje mírně vyšší účinnosti než běžný HEPA filtr, avšak naproti tomu nanofiltr z Nylonu 6 o průměru vláken 430 a 730 nm dosahuje účinnosti nižší, a to především v oblasti záchytu částic o velikosti 0,1  $\mu\text{m}$ . Účinnost filtrace u 100 nm filtru z Nylonu 6 byla v případě částic o velikosti 58 nm 99,991 %.



Obr. 7.14 – Tlaková ztráta jako funkce čelní rychlosti. Porovnání různých průměrů nanovláken s běžným HEPA filtrem. [66]



Obr. 7.15 – Účinnost filtrace filtračního materiálu Nylon 6 s nanovlákný v porovnání s běžným HEPA filtrem. [66]

V rámci práce [53] byl proveden test filtračních vlastností několika nanovláknenných materiálů, a to s využitím dvou aerosolů, NaCl a parafínového oleje. Tyto filtrační materiály byly posuzovány z hlediska jejich vhodnosti použití jako součást ochranných masek.

Jako první byla zvolena pro respirátorové filtry komerčně běžně využívaná vrstva elektrizovaného meltblownu o plošné hmotnosti  $100 \text{ g/m}^2$ . Tento filtr však splňoval pouze požadavek na záchyt částic aerosolu NaCl, nikoliv částic parafínového oleje. Dále se tato vrstva laminovala vrstvou PVAL (polyvinylalkohol) nanovláken, jež byla nanesena na podkladu spunbond. Řazení vrstev bylo ve směru k proudu plynu následovné: elektrizovaný meltblown, nanovlákná, spunbond. Testovány byly různé plošné hmotnosti nanovláken připravených pomocí jak plošného, tak i objemového nanospideru.

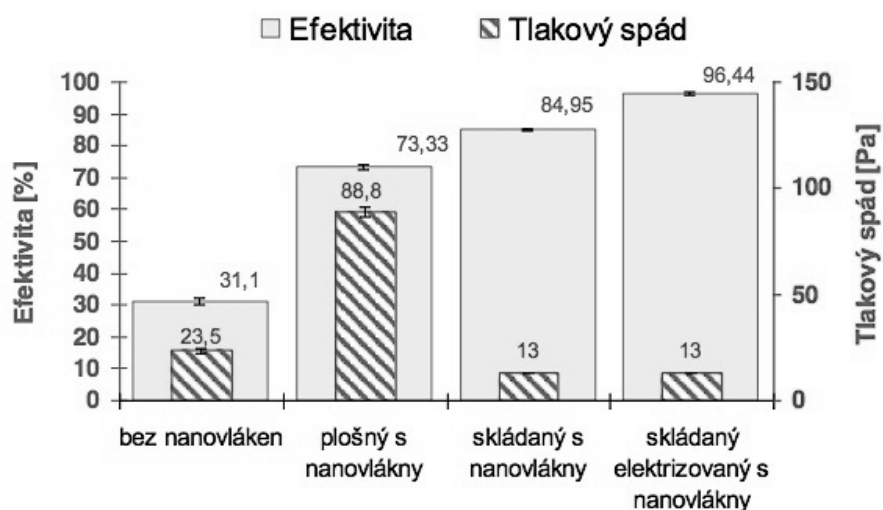
Výsledkem tohoto měření bylo zjištění, že využitím nanovláken je možné upravit filtrační vlastnosti respirátorového filtru tak, aby zároveň nedošlo k výraznému růstu tlakové ztráty. Dále se vrstva nanovláken osvědčila při záchytu parafínového oleje. Zkouška odolnosti vůči vodě však poukázala na nevhodnost použití PVAL nanovláken.

Nanovlákná z polyvinylalkoholu je však možné nahradit vhodnějšími polyamidovými nanovláknami a výrazně tak zlepšit filtrační vlastnosti respirátorových filtrů. [53]

Dále byl v rámci práce [53] proveden test filtračních vlastností čtyř různých vícevrstvých filtračních materiálů, kdy tři z nich byly opatřeny vrstvou s nanovláknem. Jednalo se o složení vrstev spunbond (S) - nanovlákná (N) – meltblown (M) a to v různých kombinacích, kdy první byla vždy vrstva vyrobená pomocí tavného zvlákňování a poslední vrstva vyrobená metodou spunbond, sloužící zároveň jako podkladový materiál. Kombinace byly následující: SM, plochá vrstva SNM, skládaná vrstva SNM a skládaná elektrizovaná vrstva SNM. Filtrovaným médiem byl aerosol NaCl a k výrobě filtrační nanovrstvy byl z důvodu větších rozměrů filtru použit plošný Nanospider.

Jak je vidět na obrázku 7.16, při použití vrstvy nanovláken došlo k výraznému nárůstu účinnosti. V případě skládaných filtrů docházelo také ke snížení tlakové ztráty. Dále nabitím vlákenné vrstvy bylo dosaženo vyšší účinnosti při zachování stejné tlakové ztráty.

Z obou měření vyplývá výhoda nanovláknité vrstvy, kdy vlivem schopnosti odlučovat dochází ke zvýšení celkové odlučivosti. Dalším důležitým aspektem je také skutečnost, že ač obecně přidáním další filtrační vrstvy dochází ke zvýšení tlakové ztráty, děje se tak u nanovláken, oproti jiným běžně používaným filtračním materiálům, pouze v omezené míře. Další možností je nahrazení méně vhodných filtračních vrstev způsobujících vysokou tlakovou ztrátu právě účinnější vrstvou z nanovláken, čímž zároveň dojde k zachování, případně zvýšení celkové odlučivosti při současném snížení tlakové ztráty.

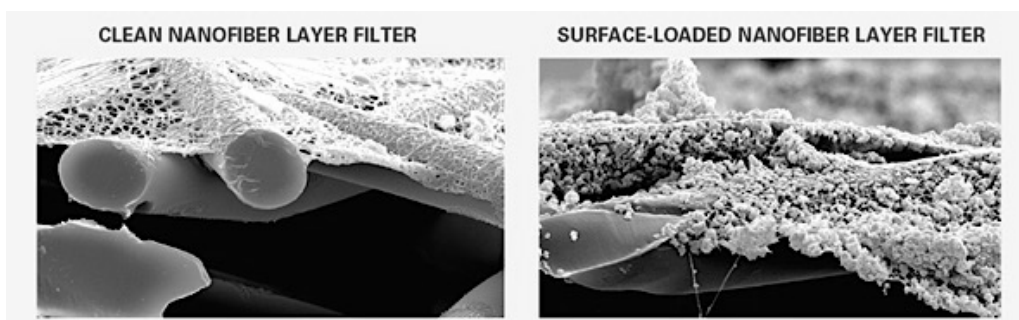


Obr. 7.16 – Vlastnosti filtru spunbond/meltblown bez nanovláken, s nanovlákný, skládaných vrstev s nanovlákný a skládaných elektrizovaných vrstev s nanovlákný. [53]

### 7.3.2 V průmyslové filtraci

Technologie nanovláken není v současné době v průmyslové filtraci příliš rozšířená. Jedním z hlavních důvodů je citlivost vrstvy nanovláken na mechanické opotřebování. Z důvodu specifických podmínek průmyslové filtrace jako jsou vyšší teploty a vysoké koncentrace částic, ale především z důvodu následné regenerace filtru, může dojít k poškození vrstvy z nanovláken, a tedy ke ztrátě jejích odlučovacích schopností. [67]

Mezi výhody použití nanovláknitých materiálů v průmyslové filtraci patří vyšší účinnost, díky které je možno filtr méně často regenerovat (viz Obr. 7.17), a tím zároveň dochází i k jeho nižšímu opotřebení a prodloužení životnosti. V případě vrstvy z nanovláken je dále výhodou nižší potřeba stlačeného vzduchu na regeneraci filtru (zpětným proplachem, pulzem) než v případě filtrů běžných. To je dáno usazováním částic především na povrchu filtrační vrstvy oproti usazování částic i uvnitř filtru v případě běžných filtračních vrstev s nižší odlučivostí. Poslední výhodou je stejně jako v případě atmosférické filtrace nižší tlaková ztráta. [67][68]



Obr. 7.17 – Čistá vrstva nanovláken a vrstva nanovláken pokrytá jemným prachem. Díky zachytávání částic na povrchu vrstvy je snazší následná regenerace filtru oproti běžným filtračním vrstvám, kdy dochází k zachytu částic i uvnitř dané vrstvy. [66]

Jednou z mála oblastí využití nanovláknitých vrstev jsou patronové a hadicové filtry a jedním z mála výrobců vyrábějící tyto filtry je firma Donaldson, s technologií Ultra-Web a Fibra-Web (viz Obr. 7.18). Tyto filtry slibují vyšší výkon, účinnost a prodloužení životnosti filtrační vrstvy. Dle slov výrobce, technologie Ultra-Web a Fibra-Web využívá vrstvu vláken o průměru 0,2 až 0,3  $\mu\text{m}$  k zachytu částic o jednom mikronu. Díky využití vrstvy nanovláken se částice zachytávají již na povrchu vrstvy, kde tvoří tenkou vrstvu (filtrační koláč) zabráňující průniku částic. I díky tomu lze docílit vysoké účinnosti až 99,999 %. [69]

		Filter Cartridge Performance Scale				
Micron Scale		0.1	1.0	10.0	100	1000
CAN BE SEEN BY:		SCANNING ELECTRON MICROSCOPE	OPTICAL MICROSCOPE	VISIBLE TO THE NAKED EYE		
Torit-Built Filter Efficiency	Ultra-Web <sup>1</sup>	[Bar chart showing efficiency from 0.1 to 1000 microns]				
	Fibra-Web <sup>1</sup>	[Bar chart showing efficiency from 0.1 to 1000 microns]				
	Torit-TEX <sup>2</sup>	[Bar chart showing efficiency from 0.1 to 1000 microns]				
	Kevlar/Nomex	[Bar chart showing efficiency from 1.0 to 1000 microns]				
	Thermo-Tek	[Bar chart showing efficiency from 1.0 to 1000 microns]				
	Dryfilo	[Bar chart showing efficiency from 1.0 to 1000 microns]				
	Cellulex	[Bar chart showing efficiency from 1.0 to 1000 microns]				

Obr. 7.18 – Porovnání různých technologií a jejich odlučovacích schopností v závislosti na velikosti částic při využití filtračních patron. Technologie Ultra-Web a Fibra-Web jsou schopny odloučit i částice o velikosti 0,1  $\mu\text{m}$ . [69]



## 8. Praktická část

Praktická část se zabývá měřením tlakové ztráty a frakční odlučivosti částic u několika vzorků opatřených vrstvou z nanovláken. Toto měření probíhalo na experimentální trati umístěné v laboratořích **Ústavu techniky prostředí ČVUT v Praze**.

Měření v rámci této bakalářské práce probíhalo na čtyřech vzorcích označených písmeny E, F, G a H. Vzorky A, B, C a D byly testovány v diplomové práci [70]. Měření všech vzorků probíhalo v červnu 2016 v jedné etapě v rámci experimentální části této bakalářské práce a diplomové práce [70].

Všechny tyto vzorky filtračních materiálů byly opatřeny nanovlákenou membránou. Poskytly je firma AC Technologies s.r.o. a Elmarco s.r.o. a jednalo se o filtry určené k výrobě ochranných pomůcek (filtrační masky apod.). Materiálové složení těchto filtrů nebylo v známo.



Obr. 8.1 – Použité experimentální vzorky od firem AC Technologies s.r.o. a Elmarco s.r.o.

## 8.1 Cíle měření

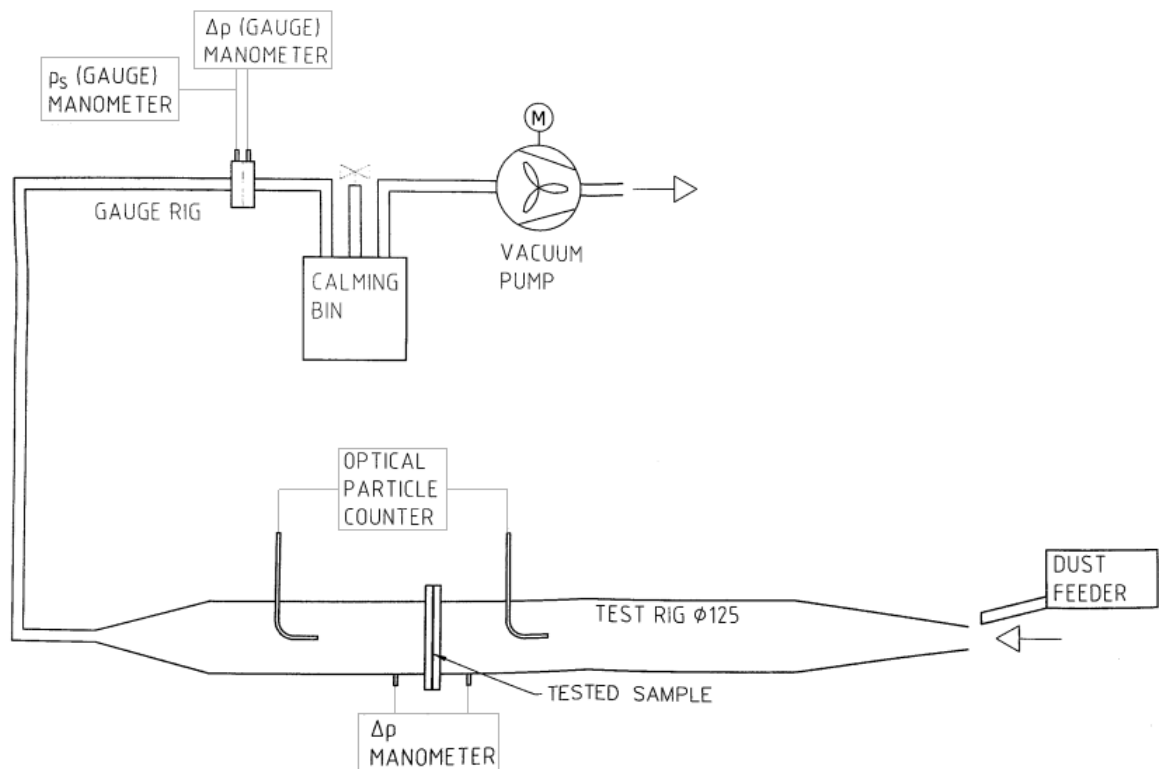
Cílem měření bylo **zjištění tlakové ztráty a frakční odlučivosti částic** daného filtračního materiálu. Filtr byl umístěn vždy vrstvou nanovláken čelem k proudu vzduchu. Zkušebním aerosolem byl atmosférický prach. Měření probíhalo při pěti různých filtračních rychlostech a to 2, 4, 6, 8 a 10 *cm/s*. Data získaná pro příslušný vzorek při různých filtračních rychlostech byla vožena do jednoho společného grafu. Grafy frakční odlučivosti pro jednotlivé rychlosti jsou součástí přílohy.

## 8.2 Popis měření

### 8.2.1 Popis experimentální trati

Na vstupu do měřicí trati byl nasáván vzduch se zkušebním prachem, který dále procházel filtrem uchyceným v přírubě o vnitřním průměru 125 *mm*. Před a za přírubou byly v ose trati umístěny odběrové sondy napojené na analyzátor prachových částic GRIMM s jehož pomocí byl měřen počet prachových částic obsažených ve vzduchu před a po průchodu filtračním materiálem. Dále zde byly umístěny odběrové otvory pro měření tlakové ztráty filtru, na něž byl dále napojen manometr MEDM 500 UP.

Na výstupu z potrubí byla pomocí hadice napojena měřicí soustava, která sloužila k měření průtoku. Na konci experimentální tratě byla umístěna vývěva, která zajišťovala požadovaný podtlak a rychlost proudění. Schéma experimentální trati se nachází na obrázku 8.2.



Obr. 8.2 – Schéma experimentální trati.

## 8.2.2 Optický analyzátor GRIMM model 1.109

GRIMM je přenosný optický analyzátor prachových částic určený k měření kvality vnitřních i vnějších prostor. Obsahuje integrovaný gravimetrický filtr určený ke sběru prachových částic po jejich vlastním měření. Tyto odebrané částice lze dále analyzovat. [71]

Data naměřená analyzátozem GRIMM lze zobrazit v jednotkách částice na litr ( $N/l$ ), případně jako hmotnostní koncentraci v  $\mu g/m^3$ . Příklad je schopen měřit až v 31 frakcích. Velikosti jednotlivých frakcí spolu s dalšími parametry jsou zobrazeny v tabulce 8.1. [71][72]

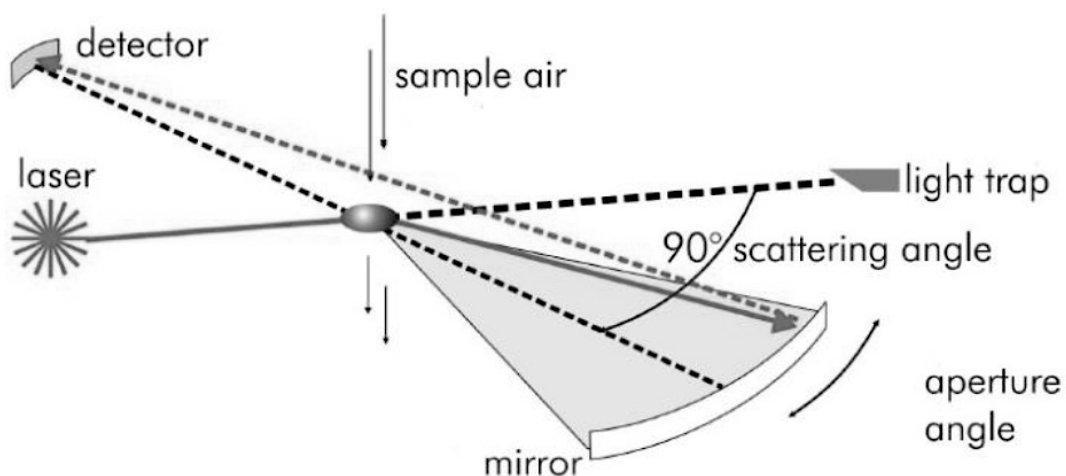
Tab. 8.1 – Specifikace prachoměru GRIMM model 1.109. [71]

Rozsah měření	0,25 až 32 $\mu\text{m}$ ve 31 frakcích
Rozsah počtu částic	1 až 2 000 000 $N/l$
Jednotlivé frakce	0.25 / 0.28 / 0.3 / 0.35 / 0.4 / 0.45 / 0.5 / 0.58 / 0.65 / 0.7 / 0.8 / 1 / 1.3 / 1.6 / 2.0 / 2.5 / 3.0 / 3.5 / 4 / 5 / 6.5 / 7.5 / 8.5 / 10 / 12.5 / 15 / 17.5 / 20 / 25 / 30 / 32 $\mu\text{m}$
Hmotnostní koncentrace	0,1 až 100 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Průtok	1,2 $l/\text{min}$
Reprodukovatelnost	$\pm 3 \%$ v maximálním rozsahu
Rozměry	24 x 12 x 6 $\text{cm}$
Hmotnost	2,5 $\text{kg}$

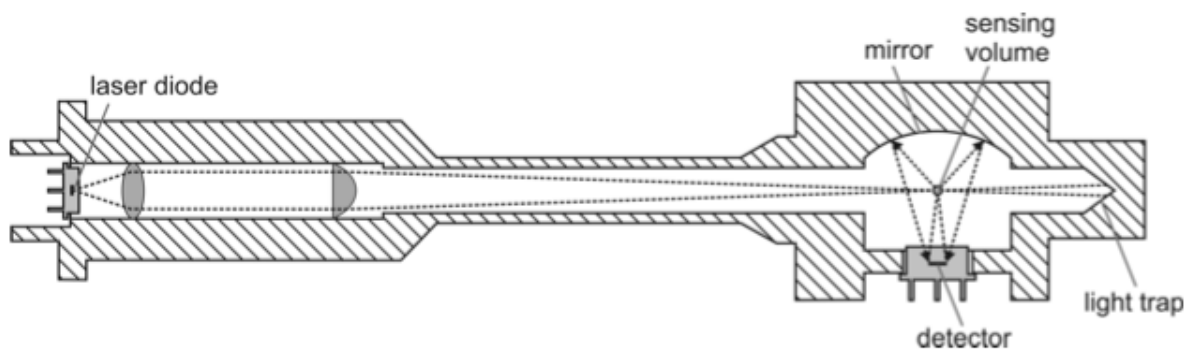
### 8.2.2.1 Princip spektrometru

**Spektrometr Grimm model 1.109** využívá jako zdroj světla laserovou diodu fungující v oblasti viditelného spektra o vlnové délce 655 nm. Paprsek laseru je za pomoci optiky zaměřen na proud vzduchu obsahující měřené částice a je následně odražen na plochý eliptický zrcadlový pás nacházející se uvnitř přístroje. Zbytek světla je zachycen ve „světelné pasti“ (viz Obr. 8.3 a 8.4).

Při průchodu částic paprskem je vytvářen signál, který je následně pomocí zrcadla přiveden na detektor. Pomocí tohoto signálu je následně změřena velikost částice a částice je přiřazena k příslušné frakci. [72]



Obr. 8.3 – Proud vzduchu je přiváděn do prostoru měření, kde za pomoci rozptylu světla dochází k detekci jednotlivých částic. [72]



Obr. 8.4 – Laserová měřicí komora přenosného spektrometru GRIMM model 1.109. [72]

Pro správnou funkci přístroje je nutné zajistit průtok vzduchu 1,2 l/min. Tento vzorkovací objem ovlivňuje přeměnu surových dat na skutečný průtok ve zvolených jednotkách a dále je nutný pro zajištění dané rychlosti částic. Z toho důvodu je průtok vzduchu nepřetržitě sledován. [72]

### 8.3 Postup měření

Na počátku měření byly připraveny jednotlivé vzorky A až H, a to vystřížením kruhových filtrů o průměru 121 mm z filtračního materiálu. Před každým započatým měřením daného vzorku byl stanoven příslušný objemový průtok a požadovaná výška

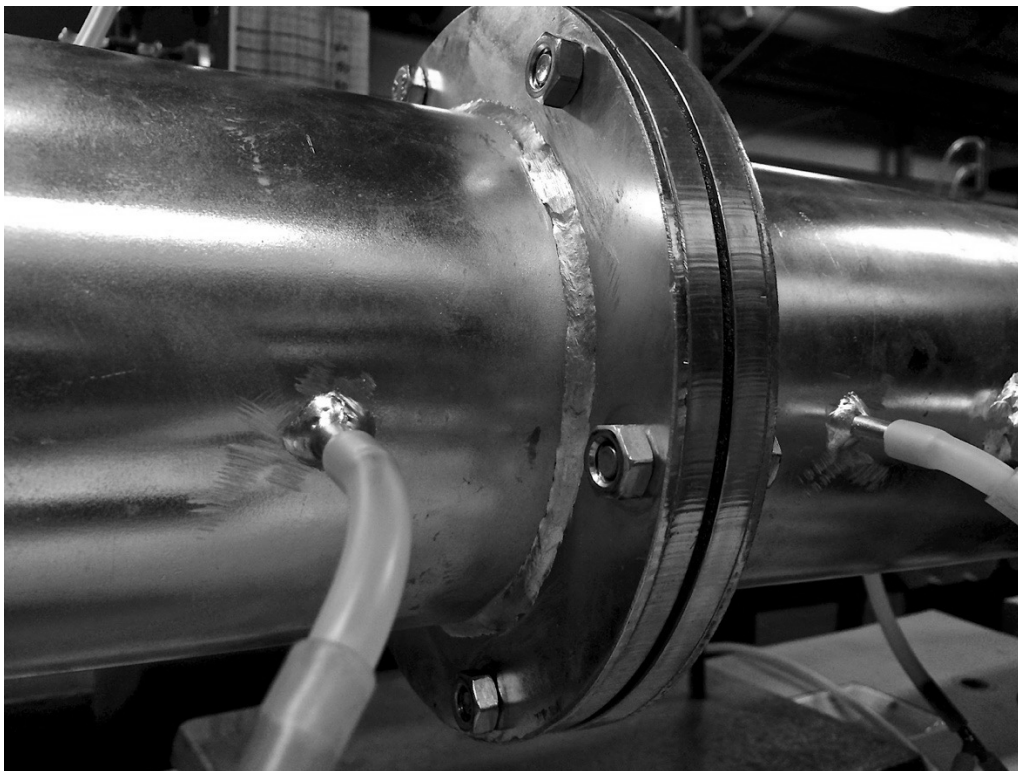
sloupce rtuti (viz Tab. 8.2), nutná pro nastavení počátečních podmínek měření na experimentální trati. Příklad takového výpočtu pro filtr H s filtrační rychlostí 2 cm/s je zobrazen v tabulce 8.2.

Tab. 8.2 – Ukázka výpočtu sloupce rtuti filtru H použitého při měření.

Název	označení	jednotka	hodnota
Datum		<i>dd.mm.rrrr</i>	10.06.16
Použitý filtrační materiál	--	--	H
Číslo měření	č.měř	--	1
Průměr filtračního materiálu	$D_{fil}$	<i>mm</i>	121
Plocha filtračního materiálu	$S_{fil}$	<i>cm<sup>2</sup></i>	114,99
Plocha filtračního materiálu	$S_{fil}$	<i>m<sup>2</sup></i>	0,01150
Filtrační rychlost	$v_{fil}$	<i>cm/s</i>	2
Objemový průtok vzduchu	$V$	<i>m<sup>3</sup>/s</i>	0,0002300
Objemový průtok vzduchu	$V$	<i>l/s</i>	0,2300
Objemový průtok vzduchu	$V$	<i>m<sup>3</sup>/h</i>	0,82793
Průměr clony	$d_{cl}$	<i>mm</i>	4,035
Součinitel alfa	$\alpha$	--	0,7371
Součinitel epsilon	$\epsilon$	--	0,995
Redukovaný průřez clony	$K_{cl}$	<i>m<sup>2</sup></i>	9,38E-06
Teplota vzduchu v laboratoři ( manometrů )	$t_{lab}$	<i>°C</i>	27,3
Hustota lihu	$\rho_{lihu}$	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	799,4769
Hustota rtuti	$\rho_{Hg}$	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	13528,115
Výška rtuti na barometru	$h_{Hg}$	<i>mmHg</i>	742,6
Teplota barometru	$t_{bar}$	<i>°C</i>	29
Oprava na vrchlík	$h_{Hg,vrch}$	<i>mmHg</i>	0,95
Barometrický tlak	$p_b$	<i>Pa</i>	98701,0
Výška sloupce rtuti U-trubice na cloně	$\Delta h_{s,cl}$	<i>mmHg</i>	1
Statický tlak na cloně	$\Delta p_{s,cl}$	<i>Pa</i>	98568,3
Hustota vzduchu na cloně	$\rho_{cl}$	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	1,144
Tlakový rozdíl na cloně	$\Delta p_{cl}$	<i>Pa</i>	344,1
Konstanta MM na cloně	$k_{cl}$	--	1
Požadovaná výška sloupce lihu na cloně	$\Delta l_{d,cl}$	<i>mm</i>	43,9
Požadovaná výška sloupce rtuti U-trubice na cloně			2,592491983

Dále byla připravena experimentální trať, kam byl umístěn příslušný vzorek filtračního materiálu. Po upnutí vzorku mezi příruby (viz Obr. 8.5) a zapojení všech měřících

přístrojů byla trať nastavena na počáteční podmínky měření. Škrcením ventilu se dle vypočtené výšky sloupce rtuti nastavovala zvolená filtrační rychlost.



*Obr. 8.5 – Mezi příruby na experimentální trati byl umístěn měřený filtrační materiál.*

Prachoměrem GRIMM byla při průchodu vzduchu filtrem po dobu 3 minut před a 3 minut za filtračním materiálem měřena příslušná koncentrace částic ve frakcích. Po dokončení této části měření byla zvýšena filtrační rychlost a měření se opakovalo. Výsledkem každého měření byly naměřené hodnoty částic v daných frakcích (viz Obr. 8.6) nacházejících se před a za filtrem a následně použité pro výpočty a tvorbu grafu znázorňujícího závislost frakční odlučivosti částic na velikosti částice pro danou filtrační rychlost. Při každém měření byla manometrem Airflow MEDM 500 UP změřena tlaková ztráta materiálu.

File name: C:\Program Files\Gr1mmDustMonitor\_v330\data\Maly\_Janousek\ecko.txt Factor C = --- Mode: Count (particle/litre) Sample interval: 6 seconds Calculation: Differenti

Date/time	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
10.6.2016 13:02:06	4330.0	3685.0	2185.0	1260.0	490.0	150.0	100.0	50.0	20.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:02:12	4450.0	3660.0	2180.0	1425.0	565.0	165.0	75.0	25.0	45.0	50.0	50.0
10.6.2016 13:02:18	4840.0	3665.0	2250.0	1355.0	585.0	165.0	205.0	55.0	45.0	35.0	40.0
10.6.2016 13:02:24	2840.0	2530.0	1600.0	865.0	380.0	110.0	135.0	55.0	25.0	30.0	35.0
10.6.2016 13:02:30	2895.0	2375.0	1595.0	850.0	265.0	145.0	300.0	40.0	15.0	40.0	25.0
10.6.2016 13:02:36	2900.0	2435.0	1425.0	935.0	325.0	100.0	105.0	70.0	15.0	15.0	0.0
10.6.2016 13:02:42	1905.0	1535.0	895.0	590.0	165.0	70.0	100.0	50.0	20.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:02:48	675.0	420.0	265.0	135.0	35.0	10.0	15.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:02:54	585.0	475.0	265.0	160.0	60.0	15.0	20.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:00	570.0	405.0	295.0	200.0	80.0	15.0	25.0	5.0	10.0	30.0	0.0
10.6.2016 13:03:06	535.0	530.0	300.0	135.0	65.0	20.0	35.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:12	500.0	455.0	305.0	160.0	85.0	10.0	15.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:18	585.0	505.0	240.0	175.0	35.0	5.0	15.0	15.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:24	505.0	490.0	240.0	120.0	70.0	10.0	15.0	10.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:30	555.0	425.0	285.0	180.0	50.0	25.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:36	645.0	445.0	250.0	215.0	55.0	15.0	20.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:42	525.0	415.0	235.0	185.0	45.0	15.0	30.0	0.0	50.0	60.0	20.0
10.6.2016 13:03:48	685.0	410.0	235.0	145.0	45.0	25.0	20.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:03:54	545.0	470.0	360.0	200.0	70.0	35.0	15.0	0.0	100.0	50.0	0.0
10.6.2016 13:04:00	600.0	295.0	275.0	190.0	55.0	10.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:06	600.0	390.0	300.0	125.0	75.0	10.0	0.0	15.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:12	545.0	450.0	325.0	160.0	185.0	50.0	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:18	580.0	425.0	180.0	185.0	80.0	5.0	20.0	15.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:24	600.0	385.0	210.0	175.0	60.0	35.0	0.0	10.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:30	625.0	495.0	235.0	160.0	50.0	20.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:36	560.0	435.0	190.0	180.0	70.0	15.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:42	605.0	490.0	255.0	170.0	70.0	15.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:48	590.0	430.0	300.0	170.0	60.0	50.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:04:54	565.0	410.0	255.0	155.0	60.0	15.0	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:00	660.0	320.0	275.0	215.0	75.0	15.0	20.0	0.0	0.0	20.0	0.0
10.6.2016 13:05:06	500.0	375.0	250.0	120.0	55.0	25.0	30.0	5.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:12	535.0	355.0	315.0	170.0	90.0	20.0	50.0	0.0	0.0	30.0	20.0
10.6.2016 13:05:18	600.0	420.0	240.0	165.0	55.0	50.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:24	485.0	395.0	260.0	155.0	60.0	25.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:30	515.0	500.0	250.0	130.0	90.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:36	500.0	430.0	265.0	125.0	55.0	25.0	50.0	0.0	130.0	20.0	0.0
10.6.2016 13:05:42	540.0	360.0	250.0	165.0	50.0	35.0	0.0	0.0	50.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:48	605.0	425.0	270.0	160.0	55.0	15.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:05:54	450.0	490.0	285.0	125.0	80.0	30.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:00	450.0	490.0	285.0	125.0	80.0	30.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:06	685.0	480.0	270.0	135.0	85.0	5.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:12	640.0	450.0	285.0	140.0	85.0	15.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:18	645.0	550.0	250.0	155.0	70.0	10.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:24	530.0	505.0	315.0	165.0	35.0	10.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:30	560.0	420.0	340.0	145.0	50.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:36	550.0	485.0	240.0	125.0	55.0	5.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:42	595.0	510.0	340.0	190.0	55.0	10.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:48	695.0	480.0	305.0	160.0	65.0	15.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:06:54	755.0	550.0	325.0	200.0	75.0	0.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:00	625.0	550.0	240.0	115.0	80.0	25.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:06	655.0	490.0	370.0	195.0	45.0	20.0	25.0	0.0	0.0	20.0	10.0
10.6.2016 13:07:12	680.0	565.0	305.0	240.0	60.0	30.0	35.0	0.0	0.0	30.0	30.0
10.6.2016 13:07:18	770.0	545.0	285.0	240.0	90.0	10.0	30.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:24	635.0	585.0	285.0	170.0	50.0	20.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:30	675.0	550.0	360.0	175.0	60.0	30.0	35.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:36	610.0	490.0	370.0	205.0	65.0	15.0	15.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:42	730.0	485.0	315.0	180.0	70.0	15.0	50.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10.6.2016 13:07:48	645.0	560.0	320.0	170.0	80.0	40.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Obr. 8.6 – Ukázka části záznamu z měření vzorku E. Použitá data byla využita k tvorbě výsledného grafu.

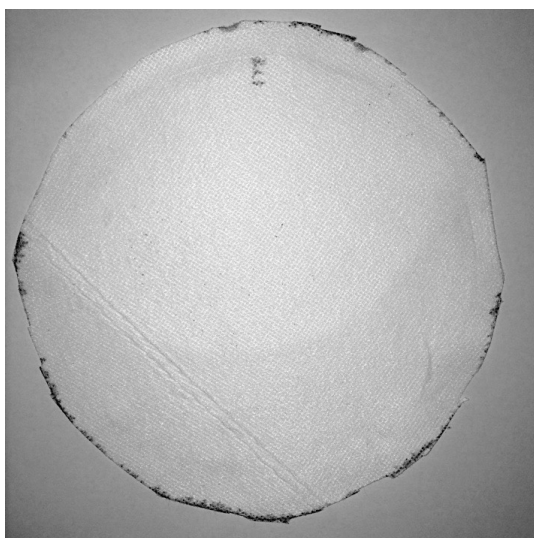
## 8.4 Naměření hodnoty

Pro každý z naměřených vzorků byly naměřené a vypočtené hodnoty shrnuty do výsledné tabulky popisující filtrační rychlost a k ní příslušející průměrnou tlakovou ztrátu, objemový průtok vzduchu a celkovou odlučivost částic. Vedle názvu vzorku je vždy uvedena jeho tloušťka.

### 8.4.1 Vzorek E

Vzorek E o tloušťce 0,31 mm a průměru 121 mm je zobrazen na obrázku 8.7. Jeho vlastnosti jsou dále popsány v tabulce 8.3. Závislost frakční odlučivosti na velikosti částic pro filtrační rychlosti 2 až 10 cm/s je graficky zobrazena na obrázku 8.8.

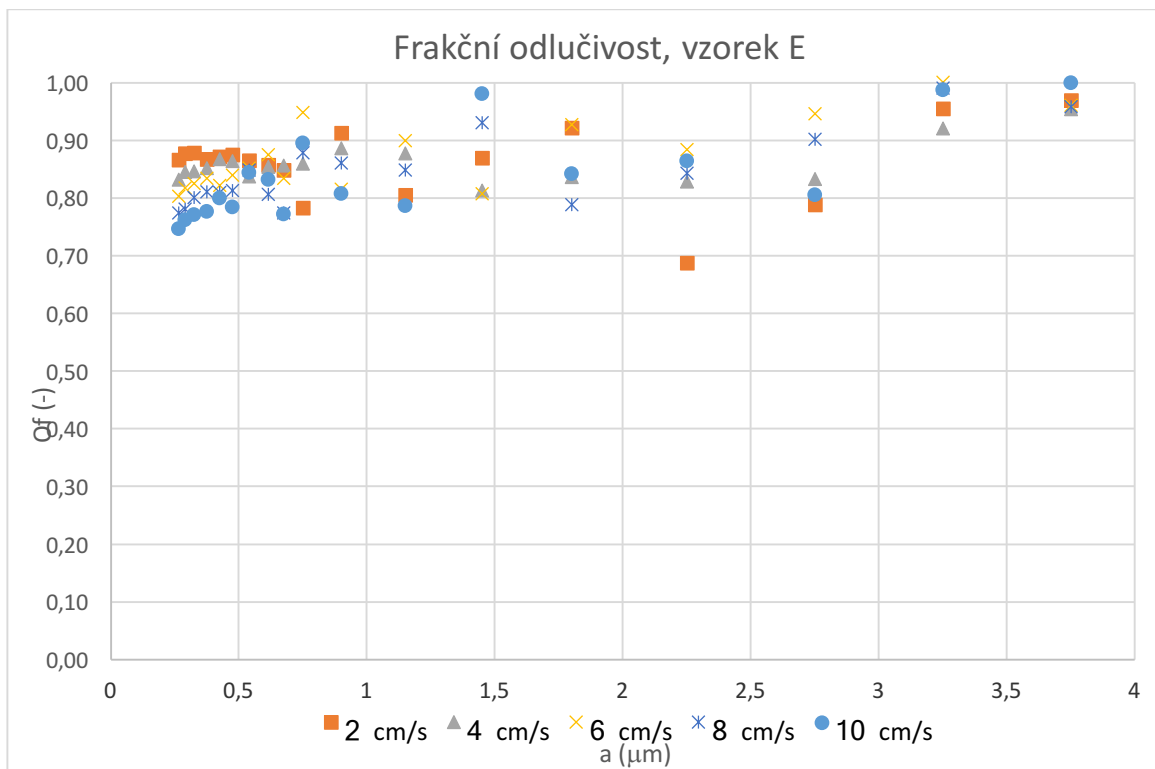




Obr. 8.7 – Vzorek filtru E.

Tab. 8.3 – Souhrn hodnot naměřených na vzorku E.

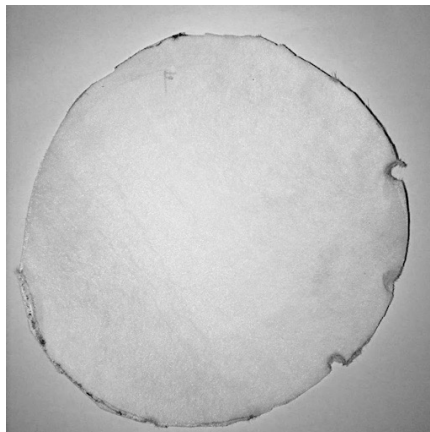
Vzorek E		h = 0,31 mm	10.06.16
Filtrační rychlost $v$ [cm/s]	Průměrná tlaková ztráta $\Delta p_z$ [Pa]	Objemový průtok vzduchu $V$ [m <sup>3</sup> /h]	Celková odlučivost $O_c$ [%]
2	39,1	0,828	87,159
4	61,6	1,656	84,232
6	92,0	2,484	81,702
8	116,1	3,312	78,812
10	153,1	4,140	76,356



Obr. 8.8 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku E.

### 8.4.2 Vzorek F

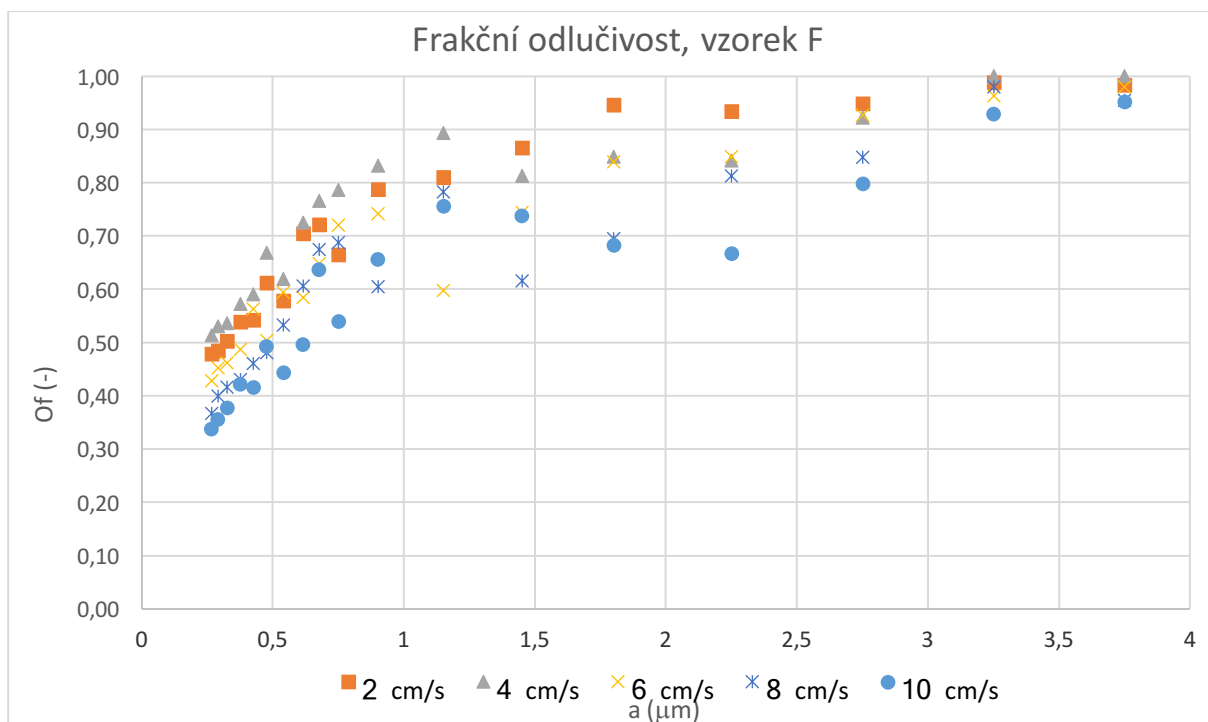
Vzorek F o tloušťce 0,90 mm a průměru 121 mm je zobrazen na obrázku 8.9. Jeho vlastnosti jsou dále popsány v tabulce 8.4. Závislost frakční odlučivosti na velikosti částic pro filtrační rychlosti 2 až 10  $\text{cm/s}$  je graficky zobrazena na obrázku 8.10.



Obr. 8.9 – Vzorek filtru F.

Tab. 8.4 – Souhrn hodnot naměřených na vzorku F.

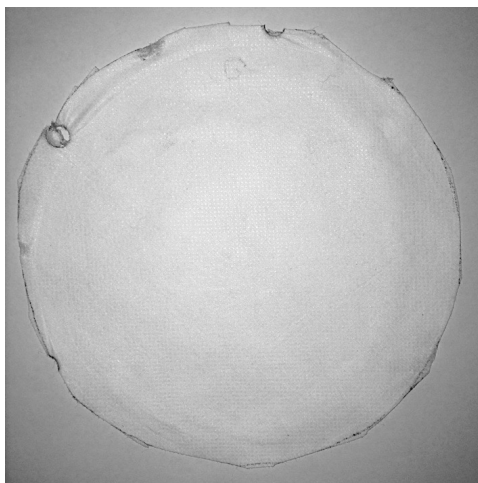
Vzorek F		h = 0,90 mm	10.06.16
Filtrační rychlost $v$ [cm/s]	Průměrná tlaková ztráta $\Delta p_z$ [Pa]	Objemový průtok vzduchu $V$ [m <sup>3</sup> /h]	Celková odlučivost $O_c$ [%]
2	4,1	0,828	50,148
4	5,1	1,656	53,852
6	8,2	2,484	45,935
8	10,3	3,312	40,286
10	12,7	4,140	36,782



Obr. 8.10 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku F.

### 8.4.3 Vzorek G

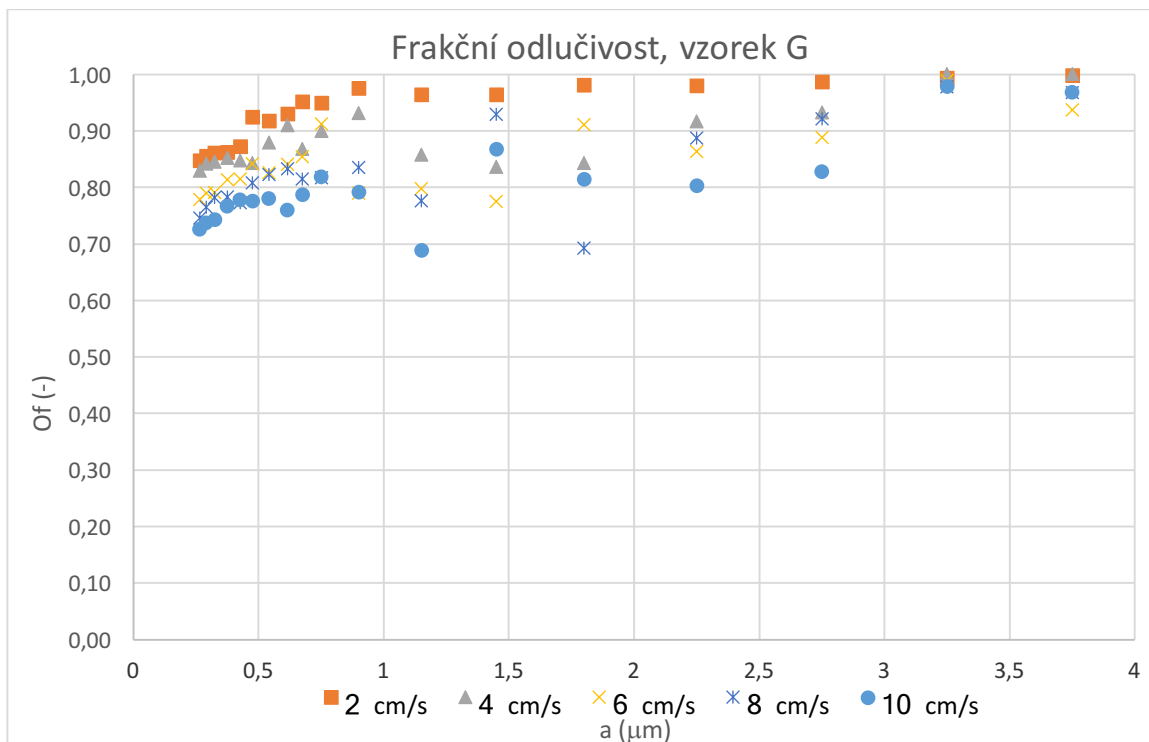
Vzorek G o tloušťce 0,30 mm a průměru 121 mm je zobrazen na obrázku 8.11. Jeho vlastnosti jsou dále popsány v tabulce 8.5. Závislost frakční odlučivosti na velikosti částic pro filtrační rychlosti 2 až 10 cm/s je graficky zobrazena na obrázku 8.12.



Obr. 8.11 – Vzorek filtru G.

Tab. 8.5 – Souhrn hodnot naměřených na vzorku G.

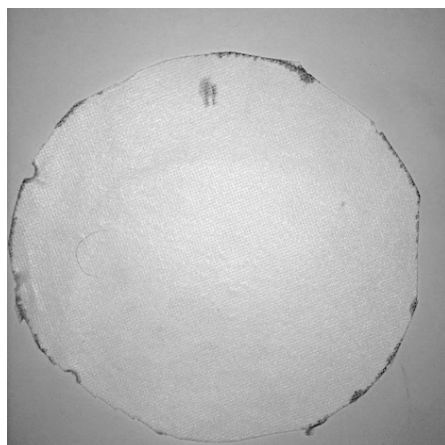
Vzorek G		h = 0,30 mm	10.06.16
Filtrační rychlost $v$ [cm/s]	Průměrná tlaková ztráta $\Delta p_z$ [Pa]	Objemový průtok vzduchu $V$ [m <sup>3</sup> /h]	Celková odlučivost $O_c$ [%]
2	48,2	0,828	86,164
4	69,2	1,656	84,058
6	112,2	2,484	79,137
8	142,5	3,312	76,508
10	174,4	4,140	74,032



Obr. 8.12 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku G.

#### 8.4.4 Vzorek H

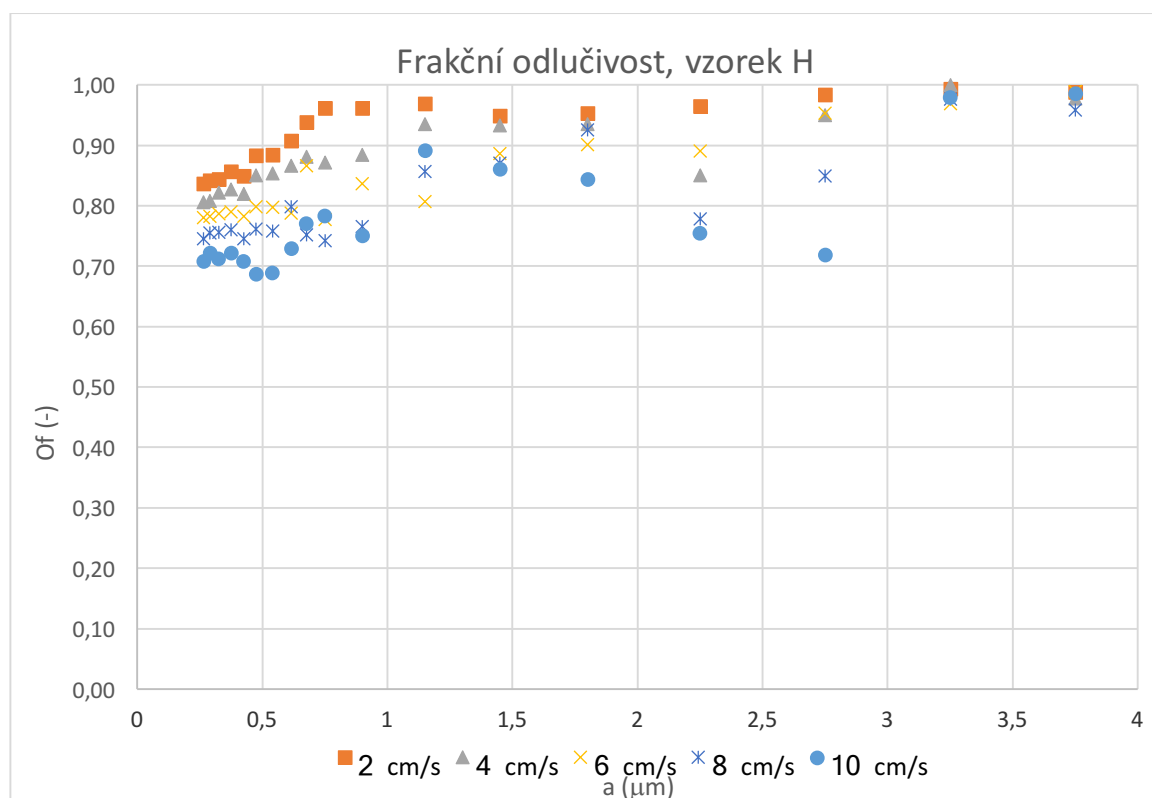
Vzorek H o tloušťce 0,40 mm a průměru 121 mm je zobrazen na obrázku 8.13. Jeho vlastnosti jsou dále popsány v tabulce 8.6. Závislost frakční odlučivosti na velikosti částic pro filtrační rychlosti 2 až 10  $\text{cm/s}$  je graficky zobrazena na obrázku 8.14.



Obr. 8.13 – Vzorek filtru H.

Tab. 8.6 – Souhrn hodnot naměřených na vzorku H.

Vzorek H		h = 0,40 mm	10.06.16
Filtrační rychlost $v$ [cm/s]	Průměrná tlaková ztráta $\Delta p_z$ [Pa]	Objemový průtok vzduchu $V$ [m <sup>3</sup> /h]	Celková odlučivost $O_c$ [%]
2	56,8	0,828	84,834
4	93,4	1,656	81,513
6	129,0	2,484	78,446
8	169,8	3,312	75,303
10	212,8	4,140	71,471



Obr. 8.14 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku H.

### 8.4.5 Výstupy z měření vzorků A, B, C a D

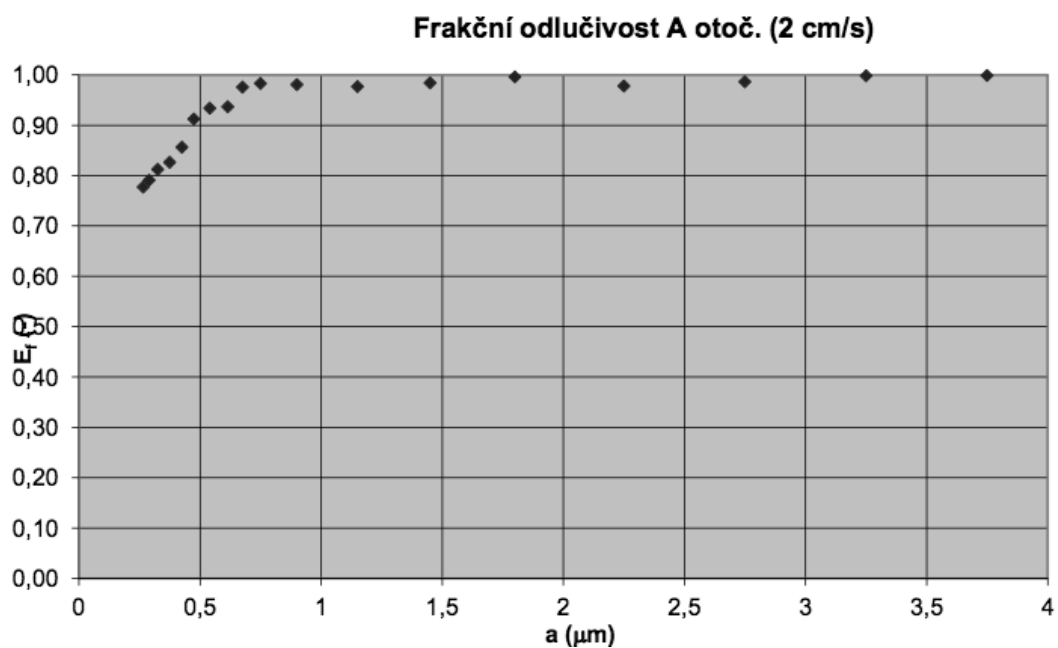
Z důvodu možnosti porovnání a zhodnocení všech zkoumaných vzorků A až H jsou zde uvedeny i výsledky měření vzorků A až D z práce [70].

V rámci práce [70] byla naměřena nejnižší tlaková ztráta na **vzorku C** (viz Tab. 8.7) a to  $7,2 Pa$  při filtrační rychlosti  $2 cm/s$  a frakční odlučivosti  $0,5$  až  $0,7$  (viz Obr. 8.17), což jsou hodnoty lepší než v případě **vzorku F** porovnatelného z hlediska tlakové ztráty. Nejvyšší tlaková ztráta pak byla naměřena na **vzorku D** (viz Tab. 8.7) při rychlosti  $10 cm/s$  a to  $159,25 Pa$  a frakční odlučivosti v rozmezí  $0,7$  až  $0,95$  (viz Obr. 8.18).

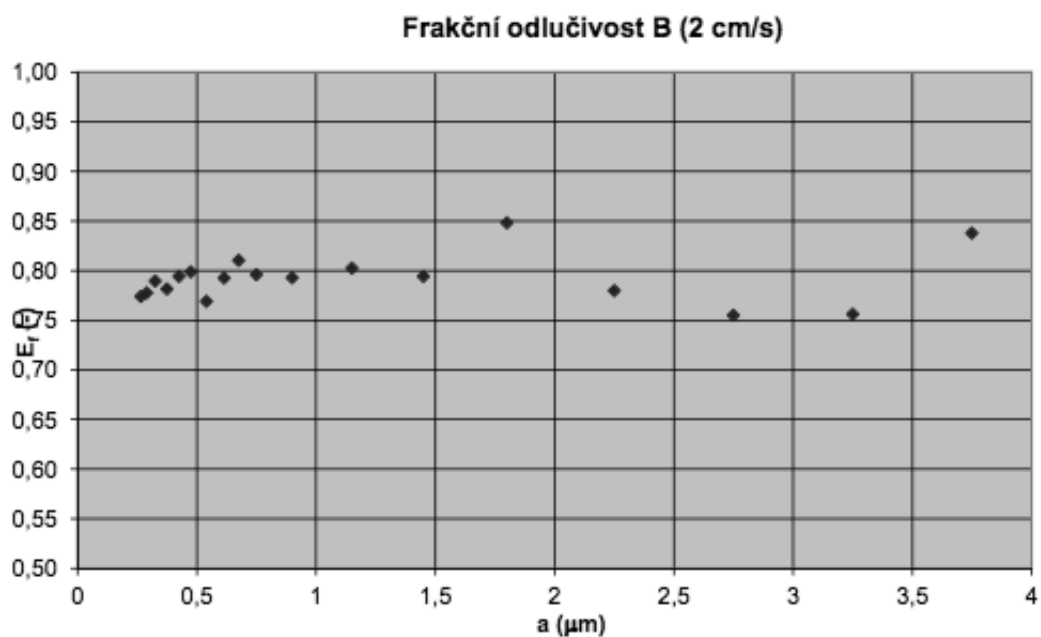
Grafy frakčních odlučivostí vzorků A, B, C a D v závislosti na velikosti částice při filtrační rychlosti  $2 cm/s$  jsou uvedeny na obrázcích 8.15 až 8.18.

Tab. 8.7 – Tabulka naměřených tlakových ztrát vzorků A až D. [70]

Filtrační rychlost	Vzorek A	Vzorek B	Vzorek C	Vzorek D
	$\Delta p_z [Pa]$	$\Delta p_z [Pa]$	$\Delta p_z [Pa]$	$\Delta p_z [Pa]$
$2 cm/s$	27	10	7	43
$4 cm/s$	37	15	12	64
$6 cm/s$	63	23	17	98
$8 cm/s$	77	30	21	127
$10 cm/s$	97	37	26	160

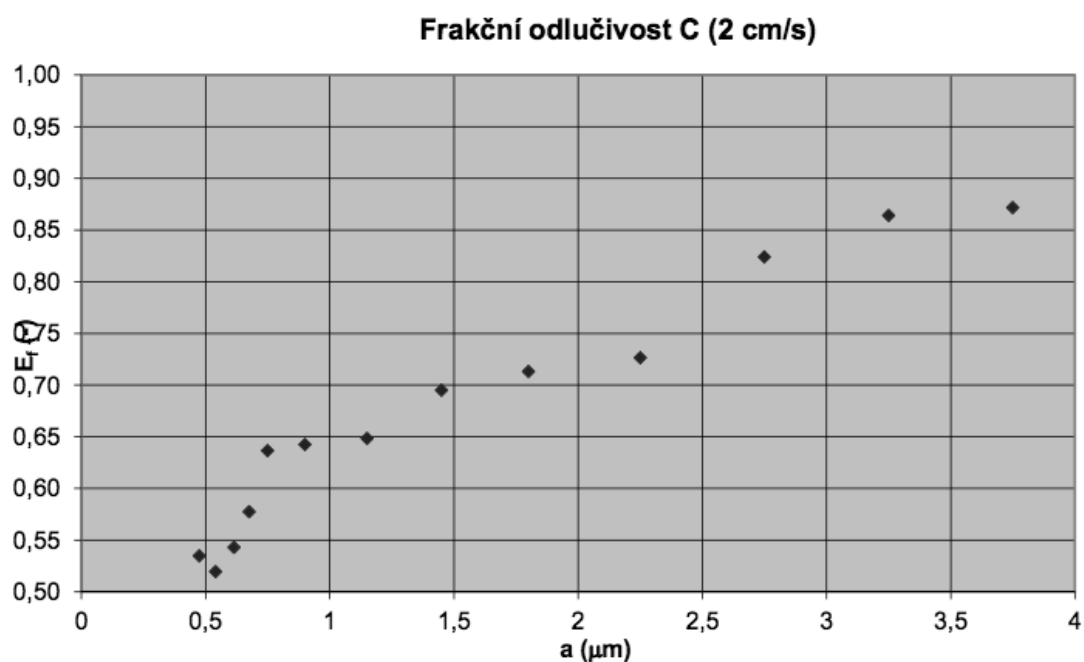


Obr. 8.15 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku A při rychlosti 2 cm/s. [70]

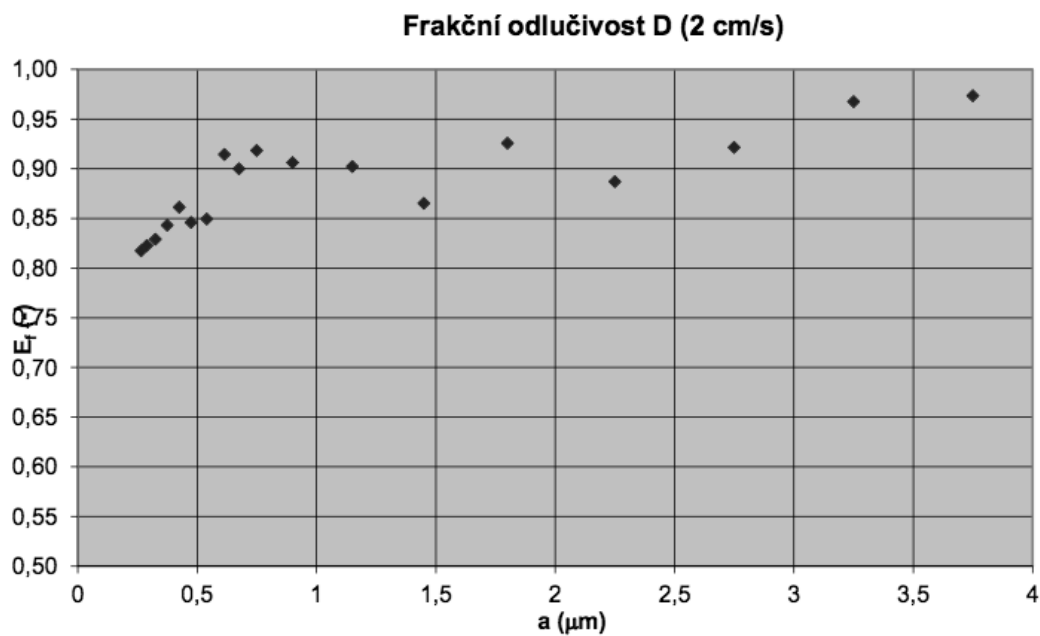


Obr. 8.16 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku B při rychlosti 2 cm/s. [70]





Obr. 8.17 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku C při rychlosti 2 cm/s. [70]



Obr. 8.18 – Grafická závislost frakční odlučivosti na velikosti částic vzorku D při rychlosti 2 cm/s. [70]

## 8.5 Vyhodnocení

V rámci této bakalářské práce byly hodnoceny vzorky E až H. V případě **vzorku E** o tloušťce 0,90 mm byly v závislosti na velikosti filtrační rychlosti naměřeny hodnoty tlakových ztrát od 39,1 do 153,1 Pa. Celková odlučivost vzorku E se v závislosti na filtrační rychlosti pohybovala od 76,36 % do 87,16 %.

Nejnižší tlaková ztráta z těchto čtyř vzorků byla naměřena na **vzorku F** o tloušťce 0,90 mm, kdy průměrná tlaková ztráta tohoto vzorku byla 4,1 Pa při filtrační rychlosti 2 cm/s a 12,7 Pa při rychlosti 10 cm/s. Vzorek F měl zároveň nejnižší celkovou odlučivost ze všech zde zkoumaných vzorků, a to 36,782 % při filtrační rychlosti 10 cm/s.

U **vzorku G** o tloušťce 0,30 mm byla naměřena průměrná tlaková ztráta 48,2 Pa při rychlosti 2 cm/s a 174,4 Pa při rychlosti 10 cm/s. Celková odlučivost filtru se pohybovala v rozmezí od 74,03 % do 86,16 % v závislosti na filtrační rychlosti.

V rámci testování **vzorku H** o tloušťce 0,40 mm byla při filtrační rychlosti 2 cm/s naměřena průměrná tlaková ztráta 56,8 Pa. Při rychlosti 10 cm/s byla naměřena nejvyšší hodnota tlakové ztráty v rámci této práce a to 212,8 Pa. Celková odlučivost vzorku se pohybovala od 71,47 % do 84,83 %.

Obecně lze konstatovat, že při vyšších filtračních rychlostech došlo v případě všech zde měřených vzorků k většímu rozptylu naměřených hodnot frakční odlučivosti a dle předpokladů i ke zhoršení odlučovacích vlastností použitého filtračního materiálu. To je patrné při porovnání grafů jednotlivých vzorků při rychlostech od 2 do 10 cm/s a zároveň porovnáním příslušných tabulek **vzorků E, F, G a H** (viz Tab. 8.3 až 8.6).

**Vzorky E, G a H** dosahovaly přibližně stejné celkové odlučivosti, avšak vzhledem k průběhům frakční odlučivosti se jako nejlepší filtrační materiál jevil **vzorek G**, kde se odlučivost ve frakci 0,25 až 0,5  $\mu\text{m}$  pohybovala v rozmezí 0,71 až 0,92 a ve frakci 0,5 až 1  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,78 až 0,98. Rovněž **vzorek E** se ukázal jako filtrační materiál s dobrou odlučivostí při vcelku příznivé tlakové ztrátě. Naopak jako nejhorší filtrační materiál byl vyhodnocen **vzorek F** s celkovou odlučivostí 36,782 % při filtrační rychlosti 10 cm/s

a odlučivostí ve frakci 0,25 až 0,5  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,33 až 0,68 a ve frakci 0,5 až 1  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,44 až 0,83.

S přihlédnutím k výsledkům práce [70] lze při zhodnocení všech testovaných vzorků jako nejhorší filtrační materiál z hlediska odlučivosti částic hodnotit **vzorek F** s odlučivostí 36,8 až 50,2 % v závislosti na filtrační rychlosti. Jako materiál s nejvyšší celkovou odlučivostí lze hodnotit **vzorek A** (viz Tab. 8.7 a Obr. 8.15), který dosahoval celkové odlučivosti částic 93 až 98 %, avšak průběhy frakčních odlučivostí byly v tomto případě jen mírně lepší než u **vzorků G** a **E**. Na **vzorku A** byla zároveň naměřena nejnižší tlaková ztráta. **Vzorek H** dosahoval mírně nižších hodnot odlučivosti, avšak při nejvyšší tlakové ztrátě. **Vzorky B** až **D** vykazovaly horší odlučivosti než **vzorky A, G, E** a **H**. Z těchto důvodů se ze všech testovaných vzorků jeví být nejvhodnějším filtračním materiálem pro výrobu obličejových masek **vzorek A**.

## 9. Závěr

První část této práce se zabývala popisem atmosférické a průmyslové filtrace a popsáním jejich základních rozdílů. Dále zde byly uvedeny základní pojmy týkající se dané problematiky a také základní principy separace částic používaných ve filtraci plynů i s následným popisem běžně používaných druhů filtrů a obvyklých způsobů jejich regenerace.

Další část byla věnována v současné době používaným filtračním materiálům a jejich rozdělení jak pro atmosférickou, tak i průmyslovou filtraci včetně různých způsobů jejich povrchových úprav. Zvláštní pozornost byla věnována technologii nanovláken.

V současné době se lze s nanovláčnými filtračními materiály setkat především v atmosférické filtraci, a to díky jejich schopnosti zachytávat velmi malé částice při vzniku poměrně nízké tlakové ztráty, což je předurčuje k využití především v oblasti filtrace jemných částic, a tedy jako součást jemných částicových filtrů třídy H (HEPA) a U (ULPA) využívaných například ve vysoce účinné filtraci v oblasti čistých prostor.

V případě průmyslové filtrace není technologie nanovláken příliš rozšířená, což je dáno především vyšší citlivostí vrstvy nanovláken na mechanické opotřebení. Z důvodu specifických podmínek vyskytujících se v průmyslové filtraci jako jsou vyšší teploty a vysoké koncentrace částic, ale především z důvodu následné regenerace filtru, může dojít k poškození tenké vrstvy nanovláken, a tedy ke ztrátě jejich odlučovacích schopností. V případě vyřešení těchto aspektů lze očekávat zvýšený zájem o aplikaci technologie nanovláken i v rámci průmyslové filtrace.

V rámci experimentální části této práce byly testovány čtyři vzorky filtračních materiálů opatřených nanovláčnou membránou, určených k výrobě obličejových masek. Testované vzorky byly označeny písmeny E, F, G a H. Vzorky A, B, C a D byly testovány v diplomové práci [70]. Měření probíhalo na experimentální trati skládající se z potrubí o vnitřním průměru 125 mm. Před a za filtračním materiálem byly v ose trati umístěny odběrové sondy napojené na analyzátor prachových částic GRIMM s jehož

pomocí byl měřen počet prachových částic obsažených ve vzduchu před a po průchodu filtračním materiálem. Dále zde byla pomocí manometru Airflow MEDM 500 UP měřena tlaková ztráta filtru.

V případě vzorků E, G a H byly naměřeny přibližně stejné hodnoty celkové odlučivosti, avšak s ohledem na průběhy závislosti frakční odlučivosti se jako nejlepší vzorek jevil vzorek G, kde se odlučivost ve frakci 0,25 až 0,5  $\mu\text{m}$  pohybovala v rozmezí 0,71 až 0,92 a ve frakci 0,5 až 1  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,78 až 0,98 s tlakovou ztrátou 48,2 až 174,4 Pa v závislosti na filtrační rychlosti. Podobně jako vzorek G lze hodnotit i vzorek E, u kterého byly naměřeny podobné hodnoty frakční odlučivosti při vcelku příznivé tlakové ztrátě. Jako nejhorší filtrační materiál byl vyhodnocen vzorek F s celkovou odlučivostí 36,782 % při filtrační rychlosti 10 cm/s a odlučivostí ve frakci 0,25 až 0,5  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,33 až 0,68 a ve frakci 0,5 až 1  $\mu\text{m}$  v rozmezí 0,44 až 0,83.

Pro vyhodnocení všech zkoumaných vzorků byly vzorky E až H porovnány se vzorky A až D z práce [70]. V rámci obou prací byl z hlediska odlučivosti částic jako nejhorší filtrační materiál vyhodnocen vzorek F s odlučivostí 36,8 až 50,2 % v závislosti na filtrační rychlosti. Jako materiál s nejvyšší celkovou odlučivostí byl vyhodnocen vzorek A, který dosahoval celkové odlučivosti částic v rozmezí 93 až 98 %. Průběhy frakčních odlučivosti vzorku A byly jen mírně lepší než u vzorků G a E, avšak na vzorku A byla zároveň naměřena nejnižší tlaková ztráta. Z těchto důvodů se ze všech testovaných vzorků jevil být nejvhodnějším filtračním materiálem pro výrobu obličejových masek vzorek A.

Třebaže mezi testovanými vzorky byly poměrně značné rozdíly, provedené orientační zkoušky ukázaly možnost použití vybraných vzorků jako filtračního materiálu do ochranných roušek a masek. Závěrem lze říci, že filtrační materiály s nanovlákný představují perspektivní a využitelný materiál, v současné době zejména v oblasti filtrace atmosférického vzduchu.

## 10. Seznam použité literatury

- [1] NOVÁK, Ivan. Ochrana ovzduší v ČSR. 1. vyd. Praha: SZN, 1983. Lesnictví, myslivost a vodní hospodářství.
- [2] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. Ochrana ovzduší. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 978-80-01-04646-3.
- [3] Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2012: grafická ročenka. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2013. ISBN 978-80-87577-20-2.
- [4] ČHMÚ [online]. In: *Portál ČHMÚ* [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/groc/gr12cz/kap11.html>
- [5] ČR. NAŘÍZENÍ VLÁDY ze dne 12. prosince 2007: Stanovení podmínek ochrany zdraví při práci. In: 361/2007 Sb. Praha, 2007. Dostupné také z: <http://portal.gov.cz/app/zakony/zakonPar.jsp?idBiblio=65267&nr=361~2F2007&rpp=15#local-content>
- [6] HEMERKA, Jiří. Odlučování tuhých částic. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995, 138 s. ISBN 80-010-1088-0
- [7] HEMERKA, Jiří. Filtrace atmosférického vzduchu I. TZB-info [online]. Praha, 2009, 3. 8. 2009 [cit. 2015-12-14]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/5815-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-i>
- [8] HEMERKA, Jiří a Pavel VYBÍRAL. Filtrace atmosférického vzduchu. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 110 s. ISBN 978-80-01-04902-0.
- [9] NOVÝ, Richard. Technika prostředí. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2000, 267 s. ISBN 80-010-3492-5.
- [10] Physical separation in science and engineering. Oxfordshire [England]: Taylor, 2003. ISBN 1478-6486.
- [11] EDITED BY J.P.K. SEVILLE. Gas cleaning in demanding applications. 1st ed. London: Blackie Academic, 1997. ISBN 978-940-0914-513.

- [12] BRAUER, H. a Y.B.G. VARMA. Air pollution control equipment: with 53 tables. Berlin [u.a.]: Springer, 1981. ISBN 35-401-0463-1.
- [13] FILTRAČNÍ VLOŽKY PRO VYSOCE ÚČINNOU FILTRACI VZDUCHU: HEPA/EPA. DencoHappel [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.dencohappel.com/cs/products/systemy-filtrace/filter-media/hepa-filters>
- [14] Mezinárodní klasifikace vzduchových filtrů: ČSN EN 779:2012 a ČSN EN 1822:2010. 2010 resp. 2012. Dostupné také z: <http://www.ksklimaservice.cz/cz/mezinarodni-klasifikace-vzduchovych-filtru>
- [15] DICKENSON, T. Filters and filtration handbook. 3rd ed. Oxford, U.K.: Elsevier Advanced Technology, c1992, xi, 778 p. ISBN 18-561-7078-0.
- [16] AirFilters: Kapsové filtry [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://airfilters.cz/filtry/kapsove-filtry/>
- [17] KUBICKI, dr. Ing. Gregorz. VARŠAVSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA, INSTITUT PRO VYTÁPĚNÍ A VENTILACI. 1Filter: Tkaninové hadicové filtry – volba optimálního řešení [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://1filter.cz/cz/uzitecne-informace/odpraseeni/tkaninove-hadicove-filtry-volba-optimalniho-reseni.html>
- [18] Suchý hadicový filtr. SCHIESTL [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.schiestl.cz/upload/images/suchy\\_hadicovy\\_filter.gif](http://www.schiestl.cz/upload/images/suchy_hadicovy_filter.gif)
- [19] Mittalsteel. Majesticairfiltration.com [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://majesticairfiltration.com/images/mittalsteel.png>
- [20] Patronové filtry. Donaldson [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www2.donaldson.com/toritdce/cs-cz/replacement-parts-services/pages/filters-donaldson-units/cartridge-filters.aspx>
- [21] UltraWeb. BIGCOMMERCE [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://cdn2.bigcommerce.com/n-nr1m3w/fih84z/products/123/images/346/UltraWeb\\_3\\_\\_38212.1398800329.1280.1280.jpg?c=2](http://cdn2.bigcommerce.com/n-nr1m3w/fih84z/products/123/images/346/UltraWeb_3__38212.1398800329.1280.1280.jpg?c=2)
- [22] Dodávky technologie tryskání: Jak funguje kónický patronový filtr. EUROMETAL servis s.r.o. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.eurometalservis.cz/36-dodavky-technologie-tryskani.html>
- [23] Průmyslové filtry. DEPURO s.r.o. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.depuro.cz/pr367mysloveacute-filtry.html>

- [24] HEJMA, CSc, Ing. Jiří. Odprášení malých kotelen průmyslovým filtrem. In: TLAKinfo [online]. 2005 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=868>
- [25] Regenerace zpětným proplachem atmosférickým vzduchem. APF [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.apf.cz/img/proplach\\_big.html](http://www.apf.cz/img/proplach_big.html)
- [26] DOUBEK, P., HEMERKA, J., HEJMA, J.: Pulzní regenerace průmyslových filtrů, Ochrana ovzduší, 1997, č. 4, s. 19-22.
- [27] Regenerace pulsním rázem [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://csmres.co.uk/cs.public.upd/article-images/Fig-2-15949.jpg>
- [28] Tahokov. DĚROVANÉPLECHY.cz [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.tahokovy.cz/tahokov/>
- [29] Tahokov: děrované plechy. KONDOR Hutní materiály [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.kondor.cz/tahokov-tabule/c-1628/>
- [30] Tahokov. DĚROVANÉPLECHY.cz [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.tahokovy.cz/graf/taho\\_graf.jpg](http://www.tahokovy.cz/graf/taho_graf.jpg)
- [31] NEREZOVÁ DRÁTĚNÁ SÍTA. EuroSitex [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.eurositex.cz/nerezova-dratena-sita/76/44/detail/>
- [32] DRÁTĚNÉ SÍTO JEMNÉ. EuroSitex [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.eurositex.cz/commonimages/produkt/fotogalerie/{DC7874BC-633E-4624-A840-7A9E47DA354D}\\_dratene\\_sito\\_jemne1.JPG](http://www.eurositex.cz/commonimages/produkt/fotogalerie/{DC7874BC-633E-4624-A840-7A9E47DA354D}_dratene_sito_jemne1.JPG)
- [33] Vpichovaná netkaná textilie. Netex [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.netex.cz/wp-content/uploads/2016/08/si-40-40-d.jpg>
- [34] KAMATH, M. G., Atul DAHIYA, Raghavendra R. HEGDE, Praveen JANA a Xinli LIU. NEEDLE PUNCHED NONWOVENS. In: The University of Tennessee [online]. Knoxville, 2004 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Needle%20Punched%20Nonwovens.htm>
- [35] Papírový filtr. Filtration.cz [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.filtration.cz/wp-content/uploads/2011/08/Papirovy-filtr-h.jpg>
- [36] Sorpční filtry: záchyt plyných škodlivin. Klimafil Praha s.r.o. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.klimafil.cz/sorpncni-filtry.php>
- [37] Filtrační vložka: lisované aktivní uhlí. Změkčeni vody.cz [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.zmekceni-vody.cz/673-thickbox\\_default/filtracni-vlozka-fccbl-5-lisovane-aktivni-uhli.jpg](http://www.zmekceni-vody.cz/673-thickbox_default/filtracni-vlozka-fccbl-5-lisovane-aktivni-uhli.jpg)



- [38] Chlupová plst. Filc.cz [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.filc.cz/img/chlupova-plst01.jpg>
- [39] GODBEY, Tom. Ensuring Effective Dust Collection in Challenging Environments. In: Donaldson [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www2.donaldson.com/torit/en-us/pages/technicalinformation/challenging-environments.aspx>
- [40] VYBÍRAL, Ing. Pavel. Použití nanovláken v průmyslové filtraci v oblasti spalovacích procesů a porovnání s dosavadním stavem. Praha, 2014. Literární rešerše. ČVUT v Praze - Fs ústav 12116.
- [41] BESEDA, Ing. Jiří a Lenka PAVROVSKÁ. Syntetická filtrační média pro výrobu kapsových filtrů. KS KLIMA - Service s.r.o. , 4 s.
- [42] HUTTEN, Irwin M. Handbook of nonwoven filter media. Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, c2007. ISBN 9781856174411.
- [43] Fiberglass. BIGCOMMERCE [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://cdn1.bigcommerce.com/server700/c00a0/products/75/images/191/Fiberglass-Mat1\\_\\_76827.1280355983.1280.1280.jpg?c=2](http://cdn1.bigcommerce.com/server700/c00a0/products/75/images/191/Fiberglass-Mat1__76827.1280355983.1280.1280.jpg?c=2)
- [44] Impregnace povrchu. Albarrie [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.albarrie.com/wp-content/uploads/2015/10/img11.jpg>
- [45] Gore-Tex. BBC [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.bbc.co.uk/staticarchive/4965f5c6b4db5de06ec988d6b61391a5cfa8b108.gif>
- [46] Struktura běžné filtrační vrstvy a mikroporézní pěnové vrstvy a jejich vliv na odlučivost. Ec21.com [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://scttex.en.ec21.com/co/s/scttex/upimg/02\\_01.jpg](http://scttex.en.ec21.com/co/s/scttex/upimg/02_01.jpg)
- [47] Dry filtration: KAYSER Filtertech GmbH [online]. Einbeck [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.kayser-filtertech.com/en/products/dry-filtration.html>
- [48] Epitropic fibers: anti-static solution. SWICOFIL [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.swicofil.com/epitropicfibers.html>
- [49] WANG, J., KIM, S. CH. a PUI, D. Y. H. Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on substrate. Journal of Aerosol Science [online], 2007, roč. 39, č. 4, s. 323-334 [vid. 5.10.2015]. ISSN 0021-8502. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>

- [50] Ramakrishna S., Fujihara K, Teo W.: An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, Word Scientific Publishing 2005, pp.3, ISBN 981-256-415-2
- [51] GAGLIARDI, Margareth. Global Markets and Technologies for Nanofibers. BBC Research [online]. 2016 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.bccresearch.com/market-research/nanotechnology/nanofibers-techs-markets-report-nan043d.html>
- [52] Charakteristika nanovláken. Elmarco [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/nanovlakna/>
- [53] HRŮZA, Jakub. ZLEPŠOVÁNÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ. Liberec, 2005. Kandidátská disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [54] BARHATE, R. S., LOONG, CH. K. a RAMAKRISHNA, S. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. Journal of Membrane Science [online], 2006, roč. 283, č. 1, s. 209-218 [vid. 1.10.2015]. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [55] GRAHAM, K., OUYANG, M., RAETHER, T., GRAFE, T., MCDONALD, B. a KNAUF, P. Polymeric nanofibers in air filtration applications In: Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society [online]. Galveston. 2002. ISBN 978- 1-61804-065-7
- [56] Electroblowing: Gas-assisted/Gas jet Electrospinning. In: ElectrospinTech.com [online]. 2014 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://electrospintech.com/electroblowing.html#.WHlwALFOCu5>
- [57] GRAFE, Timothy a Kristine GRAHAM. Polymeric Nanofibers and Nanofiber Webs: A New Class of Nonwovens [online]. INTC 2002: International Nonwovens Technical Conference (Joint INDA – TAPPI Conference). Atlanta, Georgia, USA, 2002, 13 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.thefutureisnear.org/student\\_research/current\\_research/documents/filtration/052025\(Filtration\).pdf](http://www.thefutureisnear.org/student_research/current_research/documents/filtration/052025(Filtration).pdf)
- [58] KHALIL, Abdullah, Boor Singh LALIA a Marwan HASHAIKEHA. Electrospun metallic nanowires: Synthesis, characterization, and applications. Journal of Applied Physics [online]. 2013 [cit. 2017-01-08]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4822482>. ISSN 1931-9401. Dostupné z:

[https://www.researchgate.net/figure/259439266\\_fig2\\_FIG-2-Image-showing-formation-of-Taylor-cone-Reproduced-by-permission-from-Han-et-al](https://www.researchgate.net/figure/259439266_fig2_FIG-2-Image-showing-formation-of-Taylor-cone-Reproduced-by-permission-from-Han-et-al)

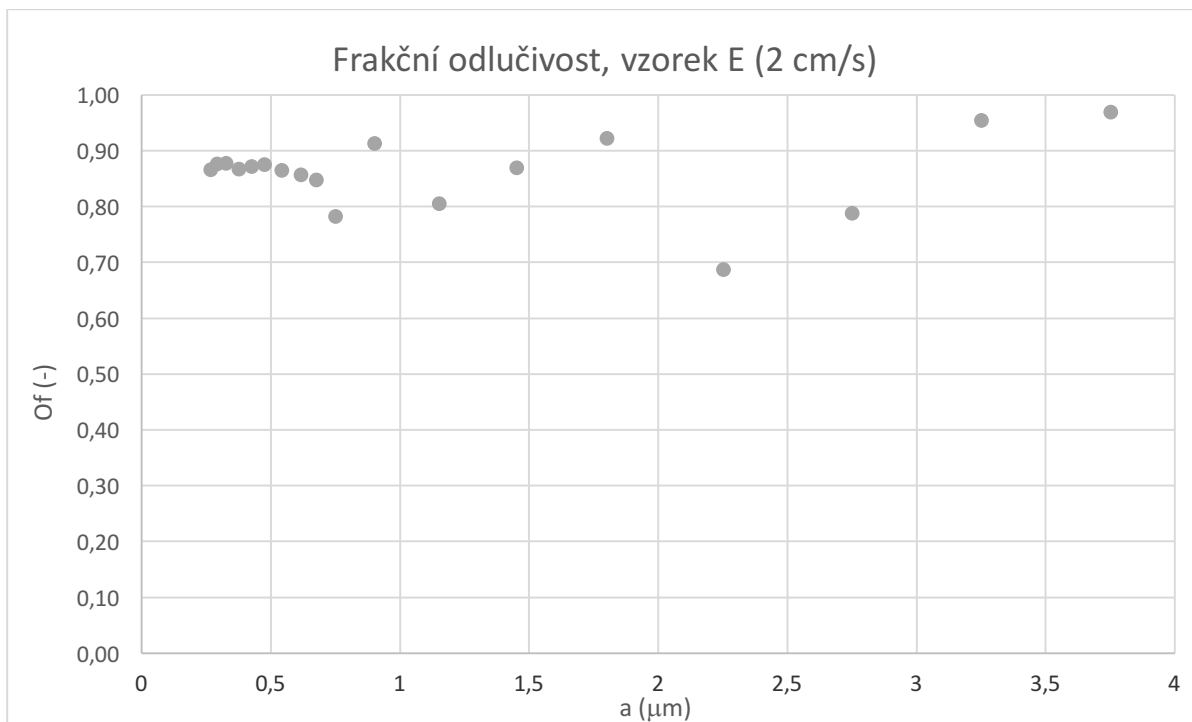
- [59] Nanozázrak z Liberce oslnil svět, ale zisky nepřinesl. Aktuálně.cz [online]. 2014 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/nanozazrak-z-liberce-oslnil-svet-ale-zisky-nepřinesl/r~bff1ac5299f311e3bef50025900fea04/?redirected=1483879186>
- [60] HOLBA, Ing. Marek a Ing. Jaroslav LEV. APLIKACE NANOTECHNOLOGIÍ VE VODNÍM HOSPODÁŘSTVÍ. In: ASIO.cz [online]. 2015 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.asio.cz/cz/361.aplikace-nanotechnologii-ve-vodnim-hospodarstvi>
- [61] DAHIYA, Atul, M. G. KAMATH, Raghavendra R. HEDGE, Ramaiah KOTRA a Haoming RONG. MELT BLOWN TECHNOLOGY. Knoxville, 2004. Dostupné také z: <http://web.utk.edu/~mse/Textiles/Melt%20Blown%20Technology.htm>. The University of Tennessee.
- [62] MARTIN, David P., Said RIZK, Kicherl HO a Simon F. WILLIAMS. Medical devices containing melt-blown non-wovens of poly-4-hydroxybutyrate and copolymers thereof. USA. US 12/336,755. Přihlášeno 17. prosinec 2008. Zapsáno 25. května 2009. Dostupné také z: <http://appft1.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PG01&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&s1=20090162276.PGNR>.
- [63] YANG, Chuanfang. Aerosol Filtration Application Using Fibrous Media: An Industrial Perspective [online]. In: . Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 9 s. [cit. 2017-01-08]. DOI: 10.1016/S1004-9541(12)60356-5. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1004954112603565>
- [64] Multilayer nanofiber face mask helps to combat pollution. Science Daily [online]. The Hong Kong Polytechnic University, 2014 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/2014/05/140512142213.htm>
- [65] Wang, J., Kim, S.C., Pui, D.Y.H.: Investigation of the figure of merit for filters with a single nanofiber layer on a substrate, Journal of Aerosol Science 39, 2008, 323-334
- [66] KIM, Gil Tae, Young Chull AHN a Jae Keun LEE. Characteristics of Nylon 6 nanofilter for removing ultra fine particles [online]. Busan, Jižní Korea, 2008 [cit.

- 2017-01-08]. Dostupné z: <https://www.cheric.org/PDF/KJChE/KC25/KC25-2-0368.pdf>. Department of Mechanical Engineering, Pusan National University.
- [67] WOOLEVER, John. Top 5 Reasons a Nanofiber Performance Layer Filter is Worth It. Donaldson Torit [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www2.donaldson.com/torit/en-us/pages/technicalinformation/top-5-reasons-a-nanofiber-performance-layer-filter-is-worth-it.aspx>
- [68] Ultra-Web® Nanofiber Technology: Advanced, proven nanofiber air technology [online]. In: Donaldson Filtration, 2 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.donaldsonoemfiltration.com/library/files/documents/pdfs/063312.pdf>
- [69] Donaldson® Filter Cartridges: Ultra-Web® Filters Have No Equal [online]. In: Donaldson, 7 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.donaldson.co.kr/material/pdf/catalog/cartridgefilter.pdf>
- [70] FILTRAČNÍ SYSTÉMY A MATERIÁLY. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze - Fs ústav 12116. Vedoucí práce Ing. Pavel Vybíral, Ph.D.
- [71] Portable Laser Aerosolspectrometer and Dust Monitor: Model 1.108/1.109. In: GRIMM AEROSOL [online]. Německo: GRIMM Aerosol Technik, Ainring, 2010, 81 s. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.wmo-gaw-wcc-aerosol-physics.org/files/OPC-Grimm-model--1.108-and-1.109.pdf>
- [72] Portable Aerosol Spectrometer: Model 1.109. Dustmonitor.com [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: <http://www.dustmonitor.com/Research/1109.htm>

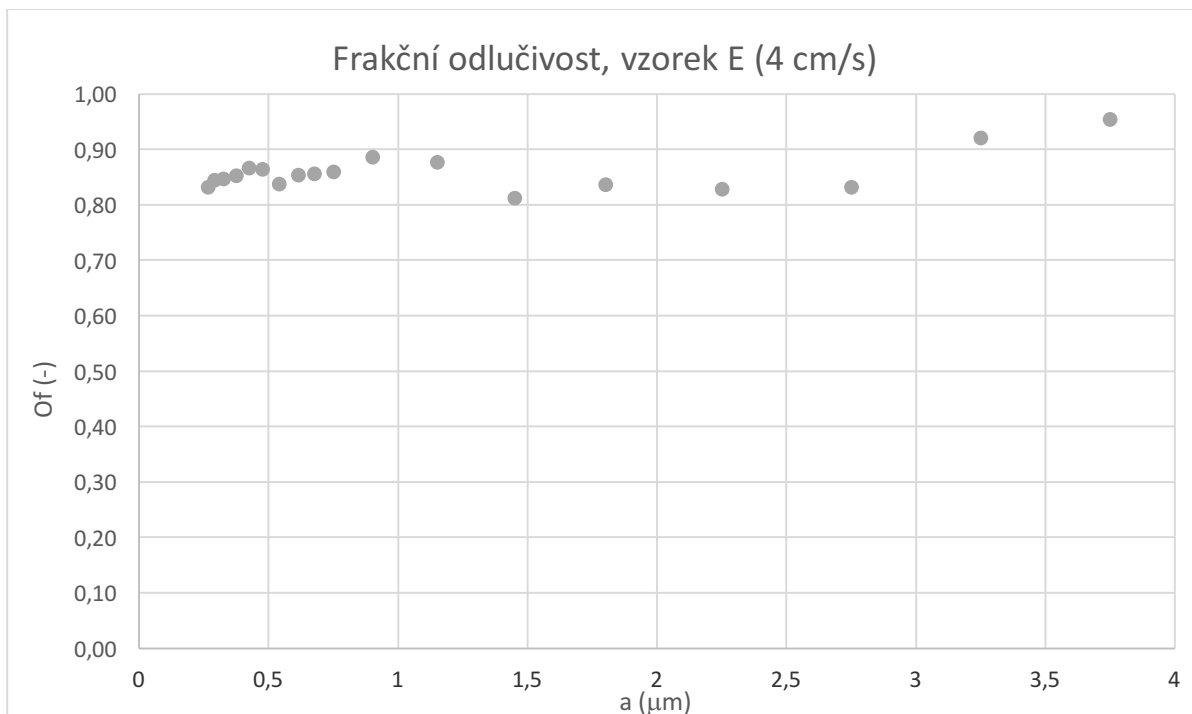
# Přílohy

## Seznam příloh

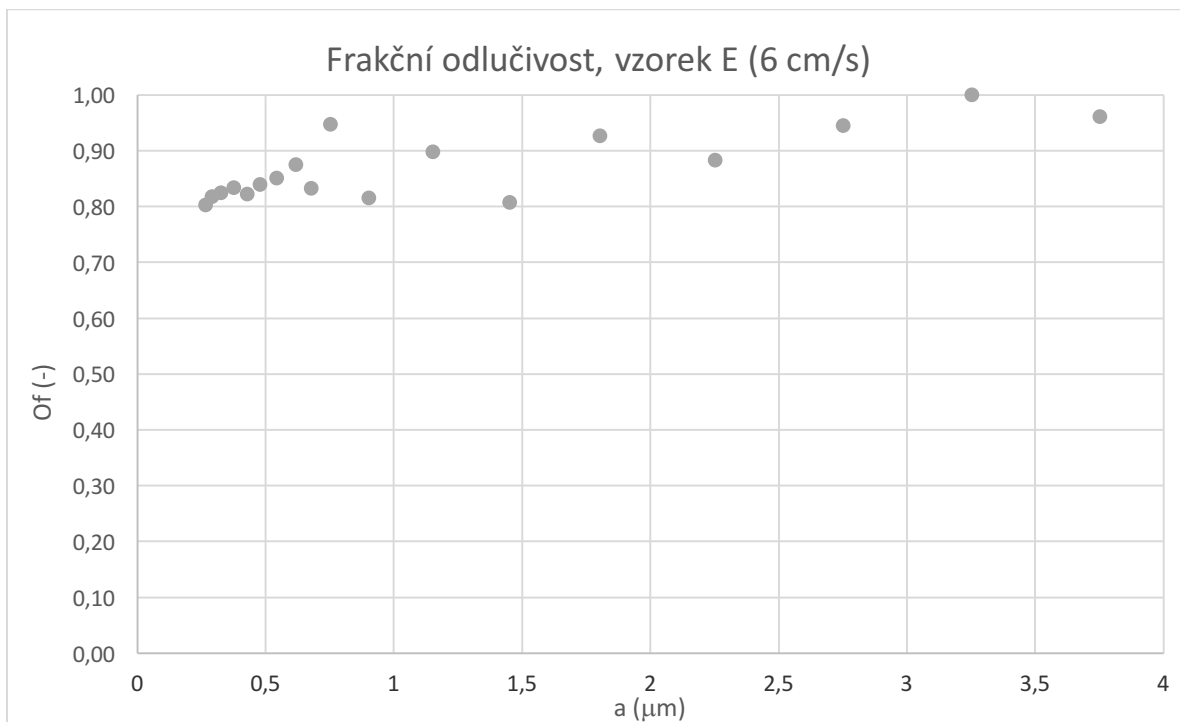
P 1 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 2 cm/s.....	II
P 2 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 4 cm/s.....	II
P 3 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 6 cm/s.....	III
P 4 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 8 cm/s.....	III
P 5 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 10 cm/s.....	IV
P 6 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 2 cm/s.....	IV
P 7 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 4 cm/s.....	V
P 8 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 6 cm/s.....	V
P 9 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 8 cm/s.....	VI
P 10 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 10 cm/s.....	VI
P 11 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 2 cm/s.....	VII
P 12 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 4 cm/s.....	VII
P 13 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 6 cm/s.....	VIII
P 14 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 8 cm/s.....	VIII
P 15 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 10 cm/s.....	IX
P 16 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 2 cm/s.....	IX
P 17 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 4 cm/s.....	X
P 18 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 6 cm/s.....	X
P 19 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 8 cm/s.....	XI
P 20 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 10 cm/s.....	XI



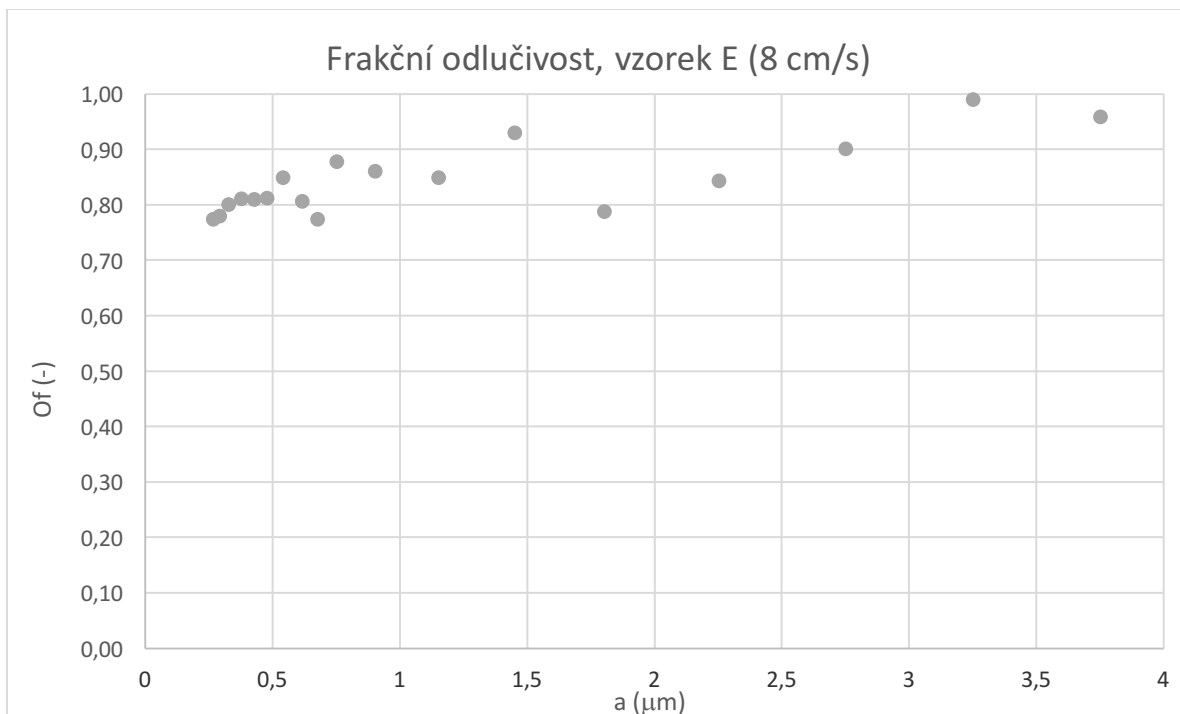
*P 1 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 2 cm/s.*



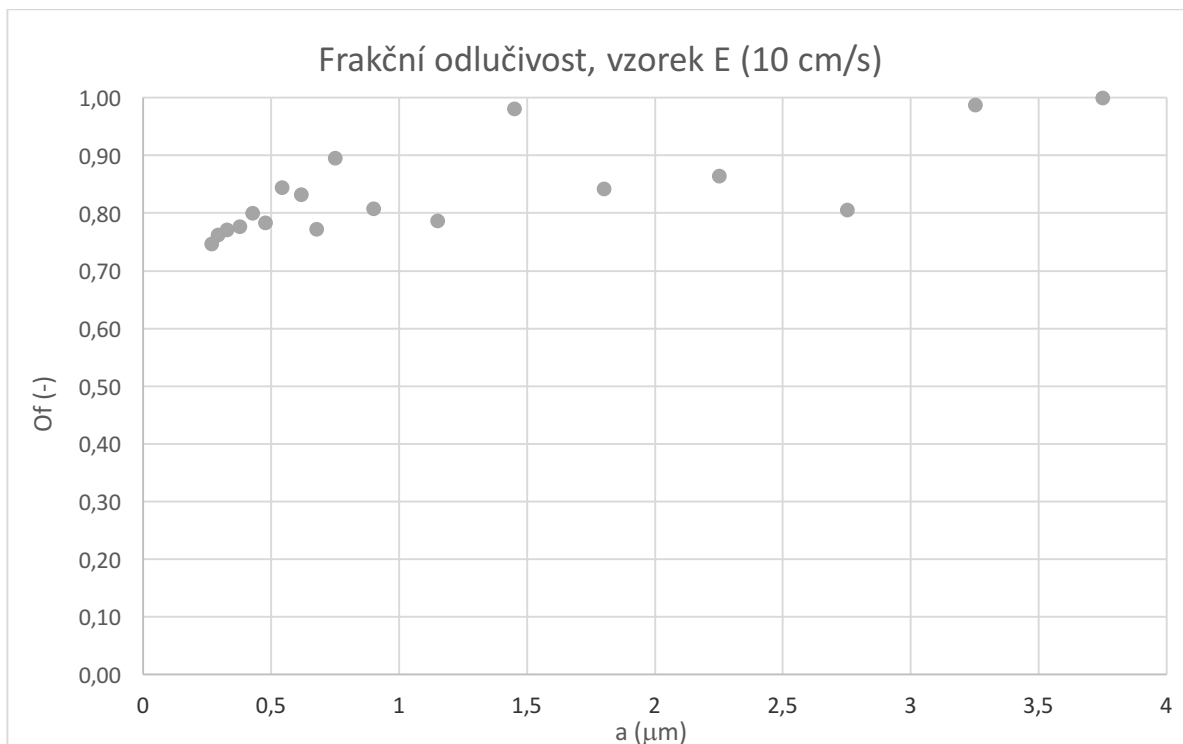
*P 2 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 4 cm/s.*



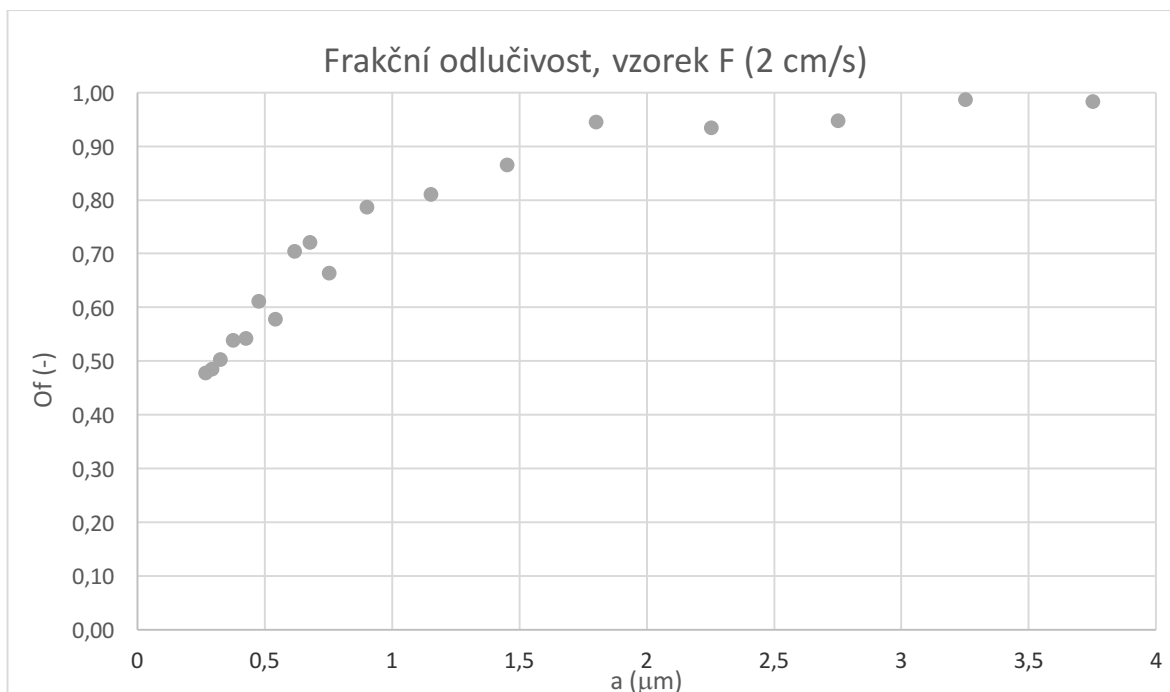
*P 3 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 6 cm/s.*



*P 4 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 8 cm/s.*

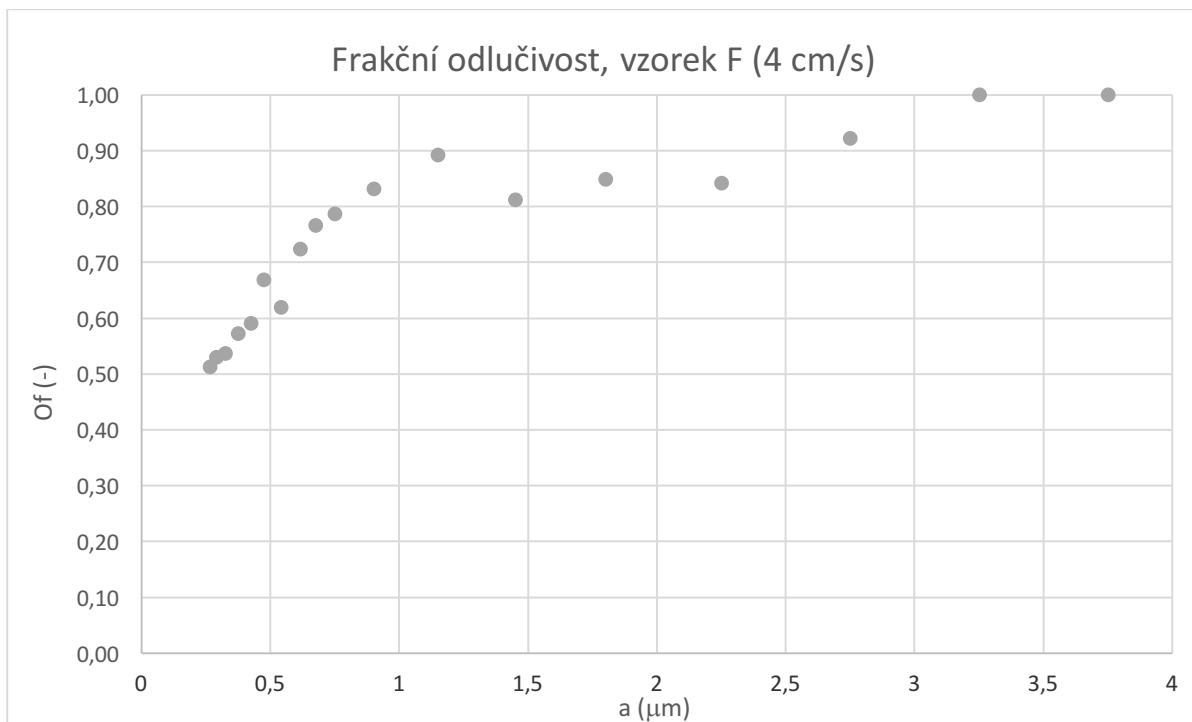


*P 5 – Frakční odlučivost vzorku E při filtrační rychlosti 10 cm/s.*

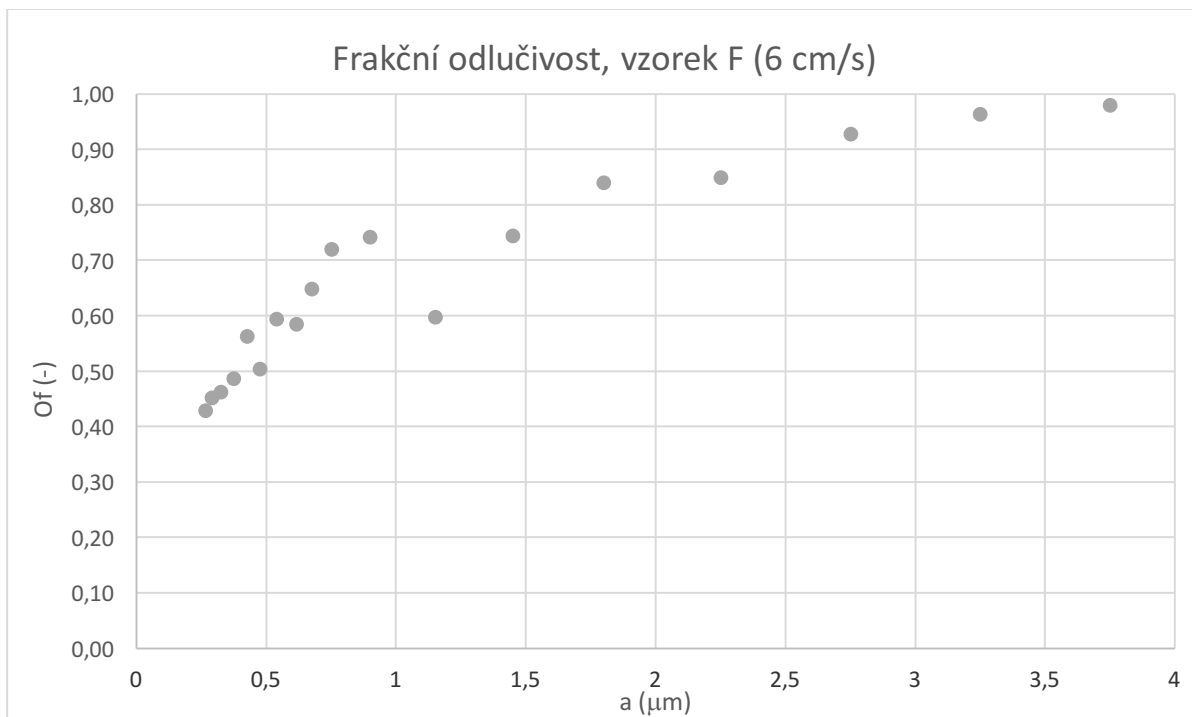


*P 6 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 2 cm/s.*

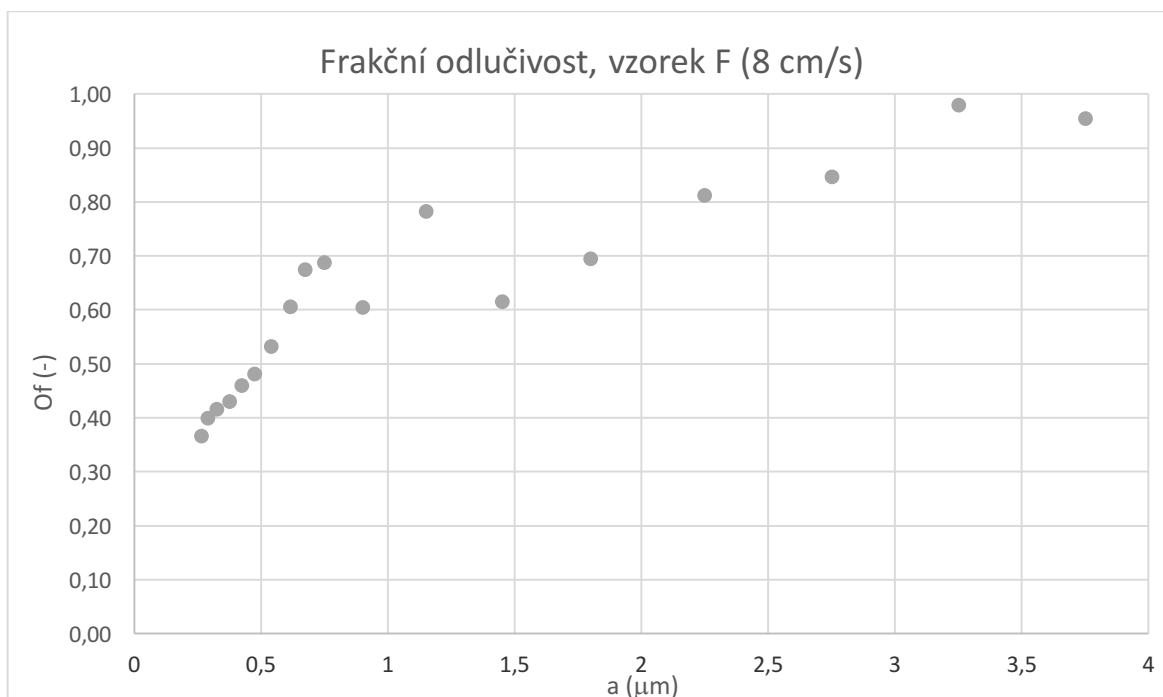




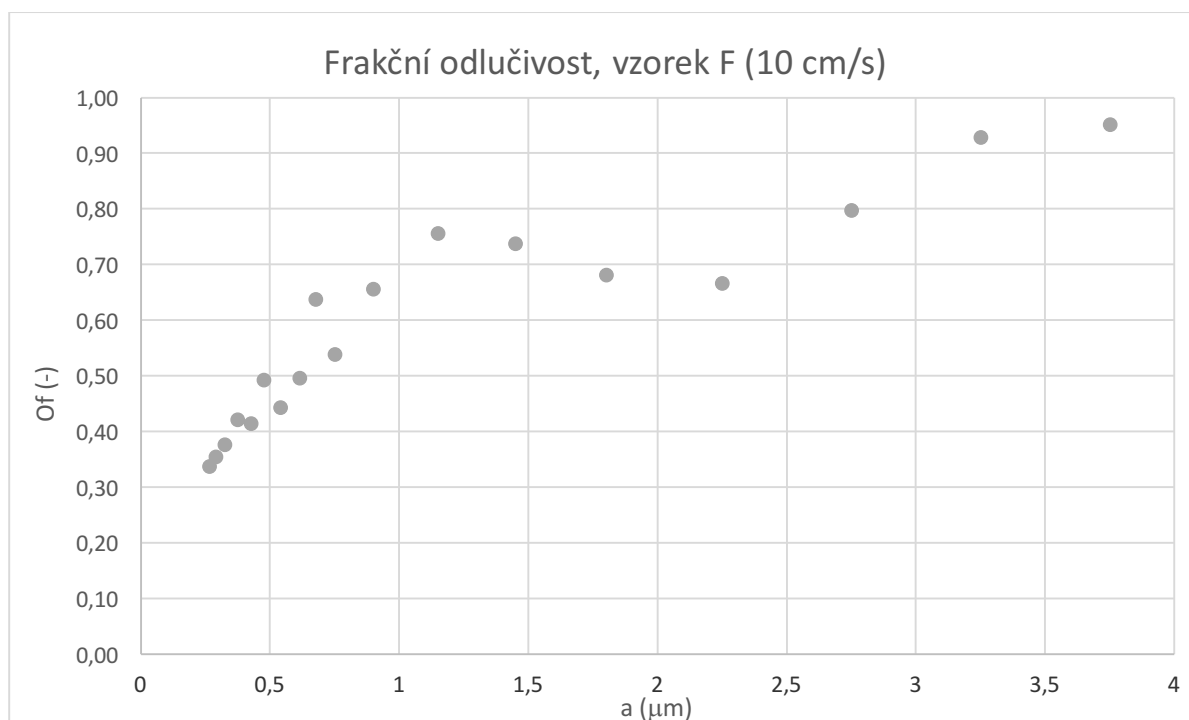
*P 7 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 4 cm/s.*



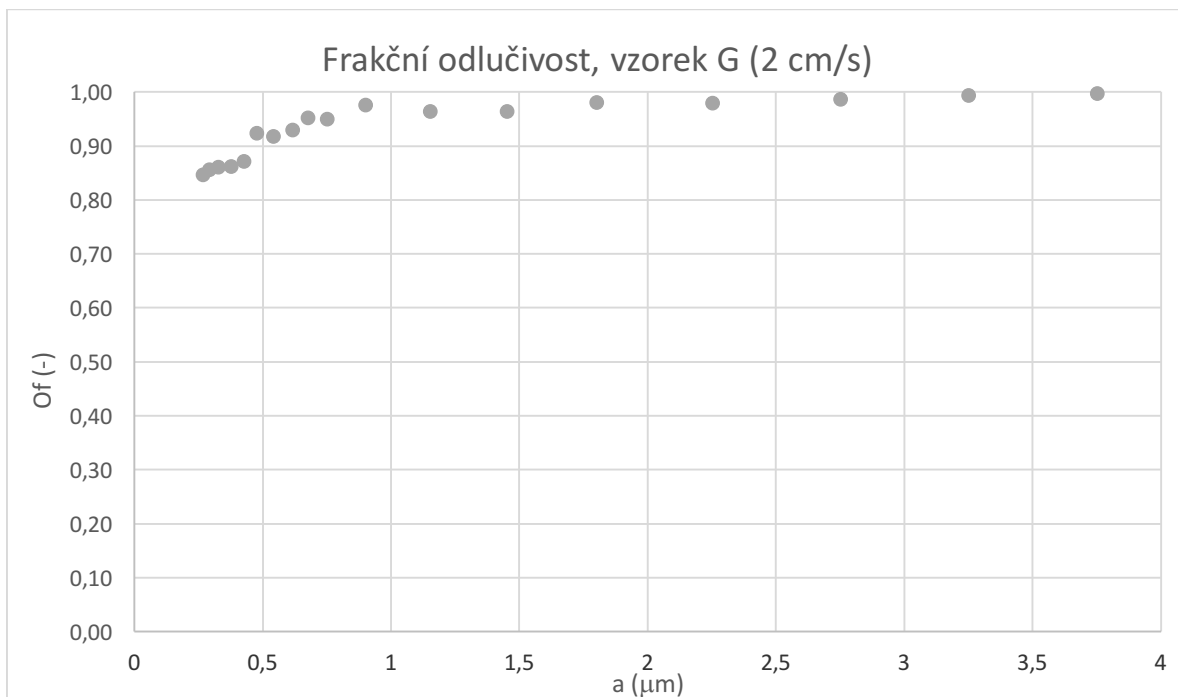
*P 8 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 6 cm/s.*



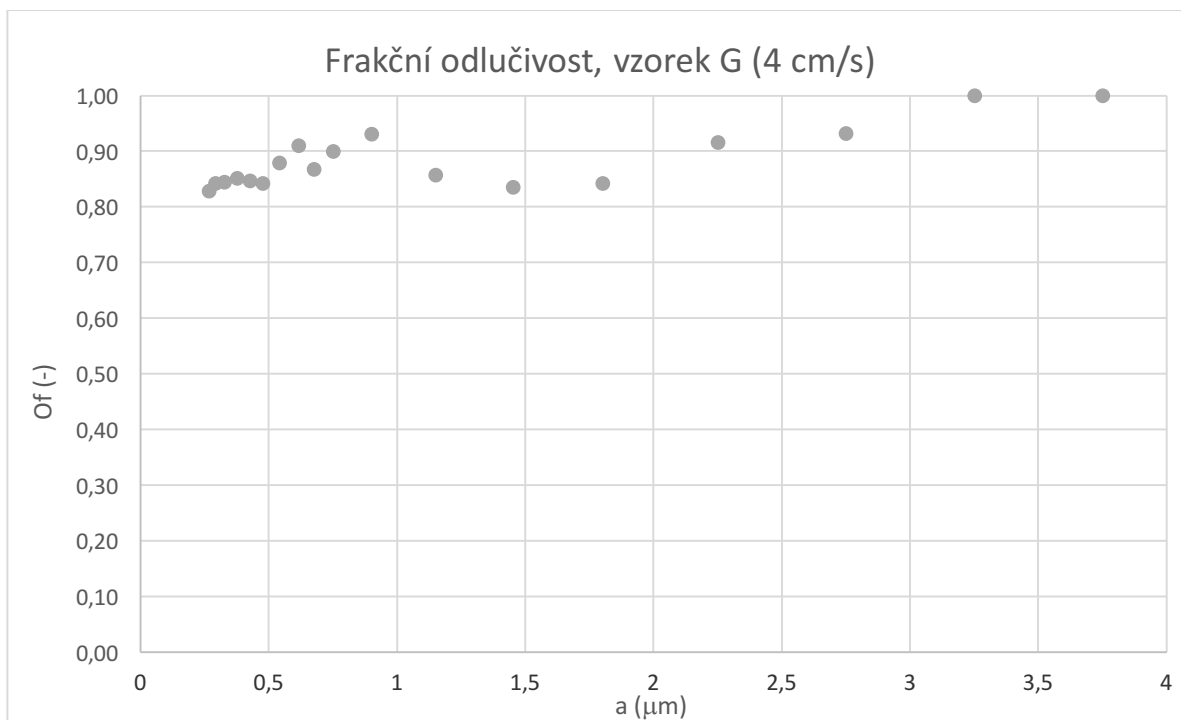
*P 9 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 8 cm/s.*



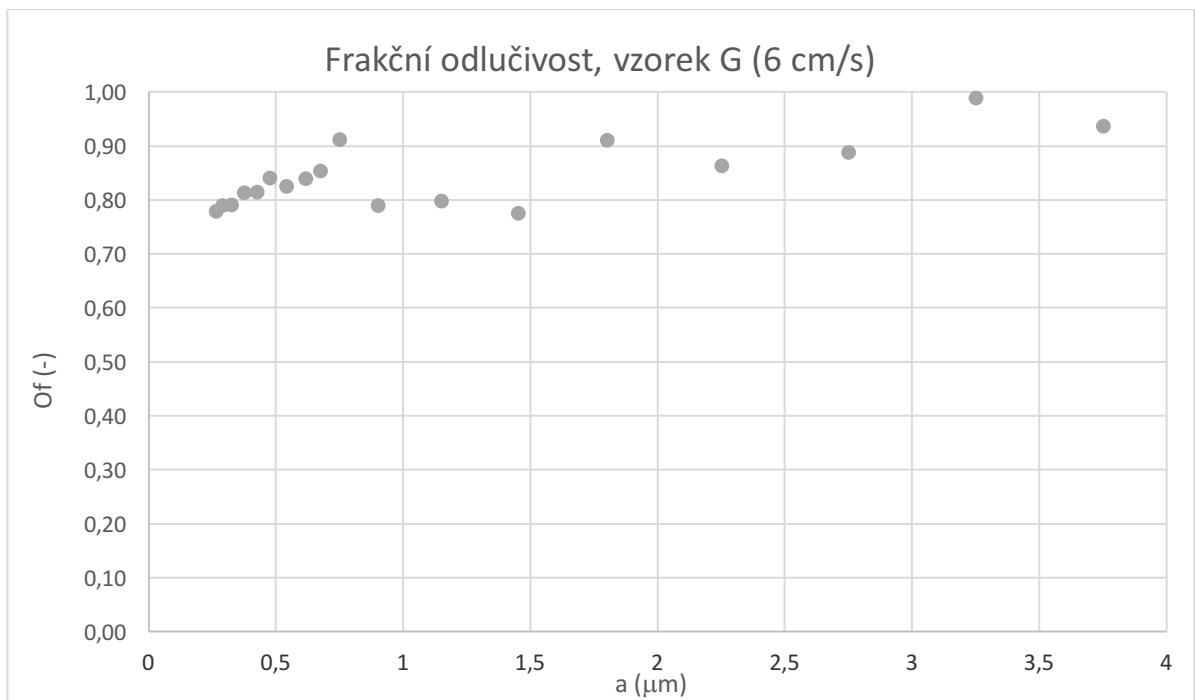
*P 10 – Frakční odlučivost vzorku F při filtrační rychlosti 10 cm/s.*



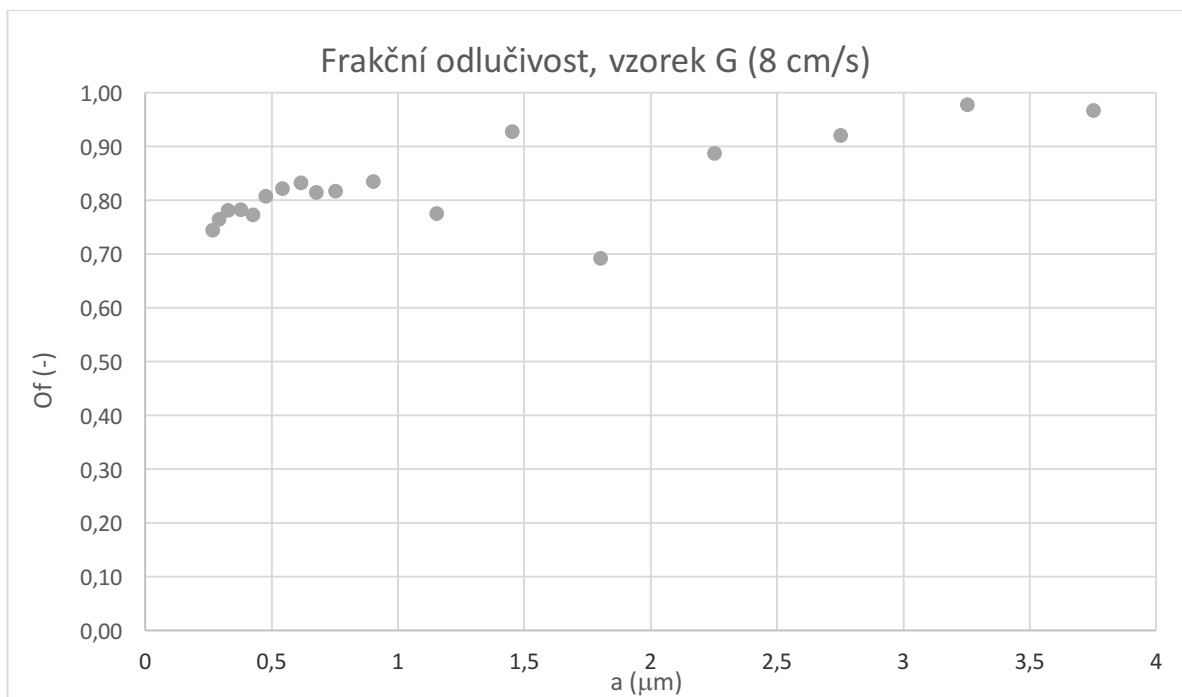
*P 11 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 2 cm/s.*



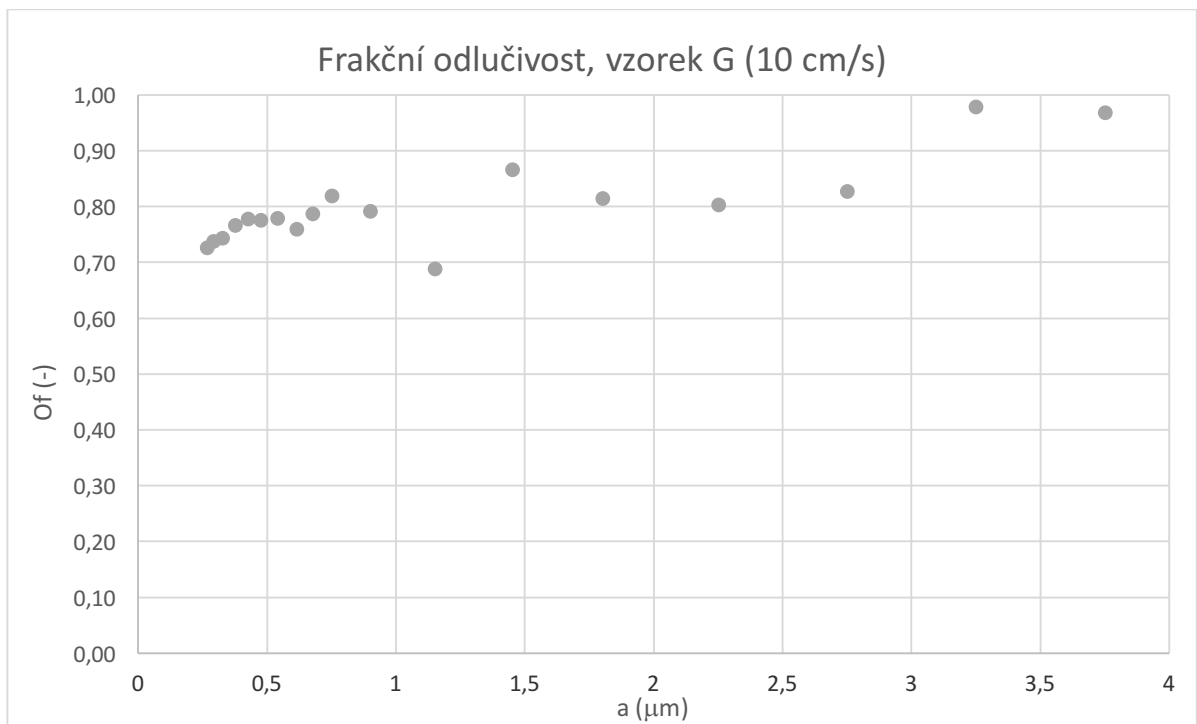
*P 12 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 4 cm/s.*



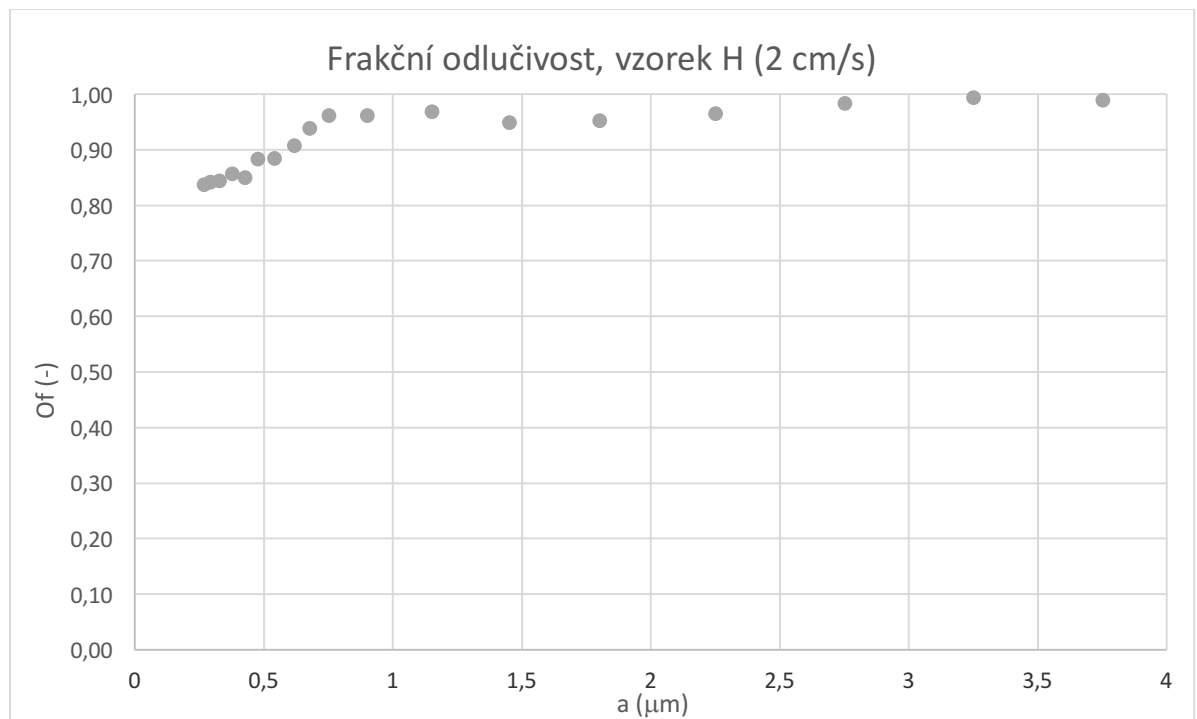
*P 13 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 6 cm/s.*



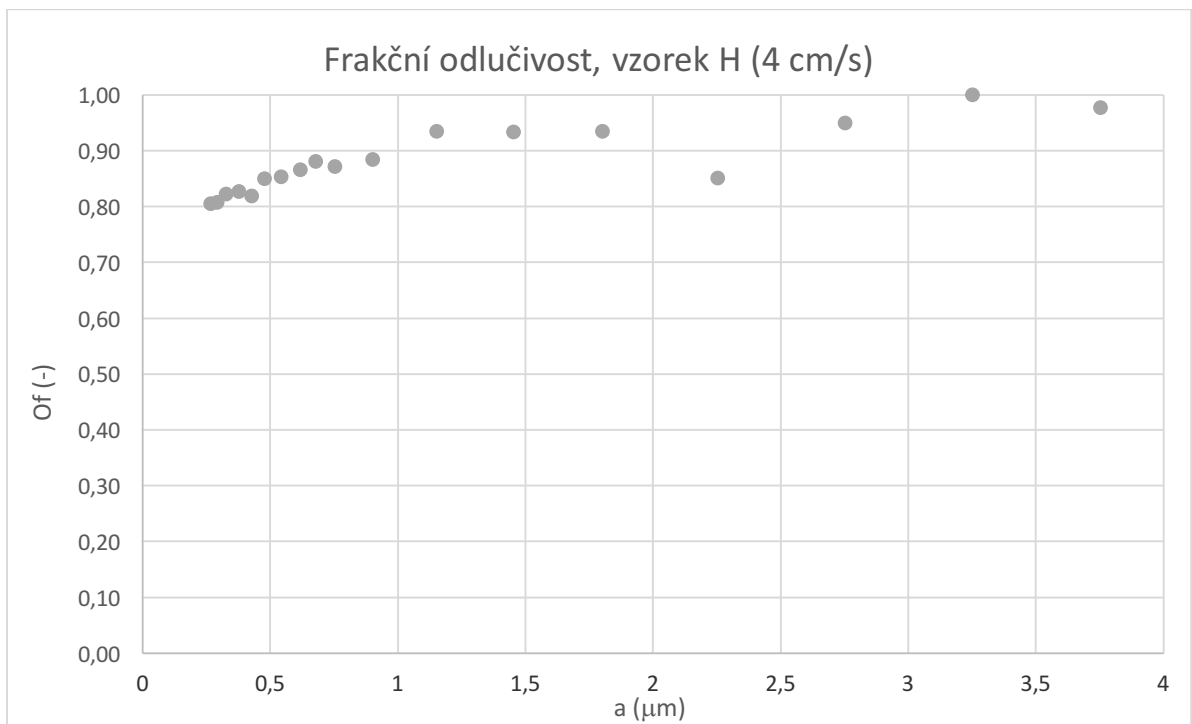
*P 14 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 8 cm/s.*



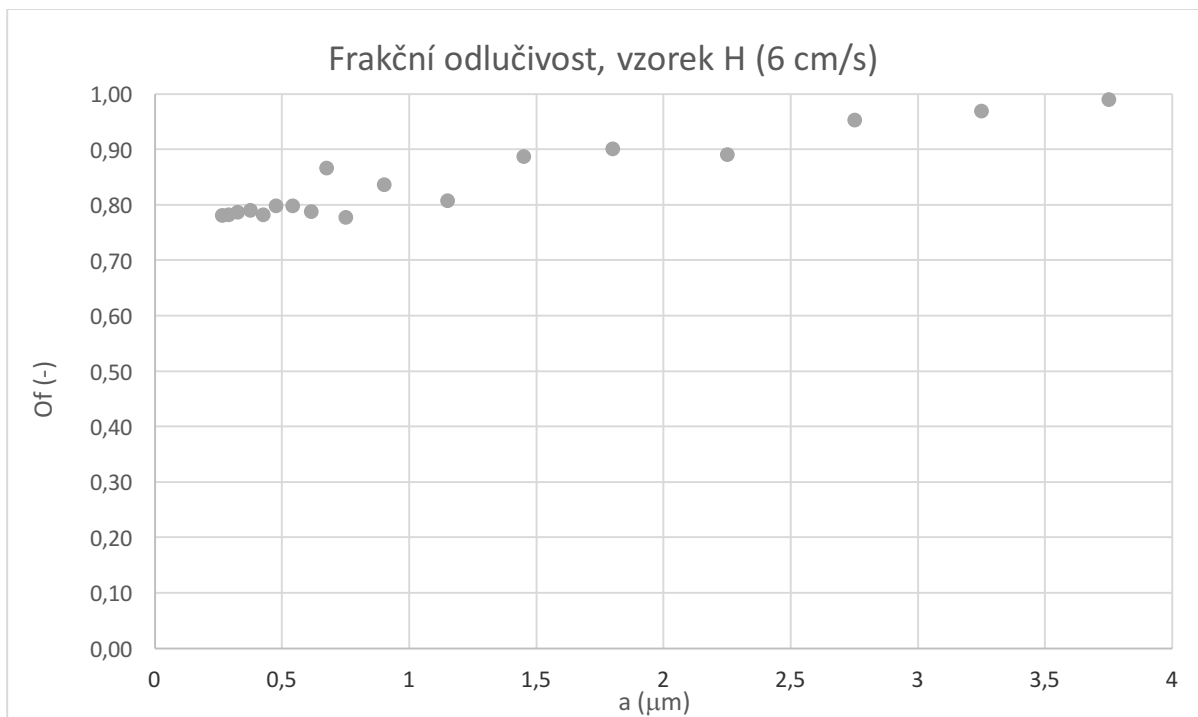
*P 15 – Frakční odlučivost vzorku G při filtrační rychlosti 10 cm/s.*



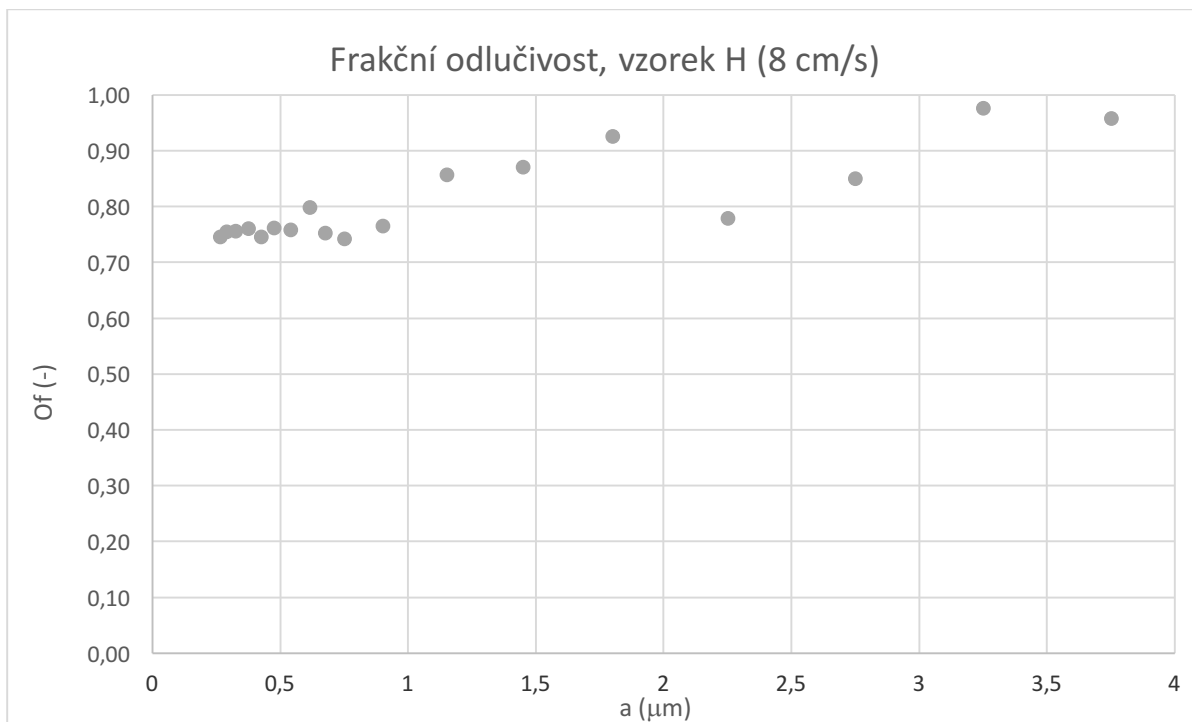
*P 16 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 2 cm/s.*



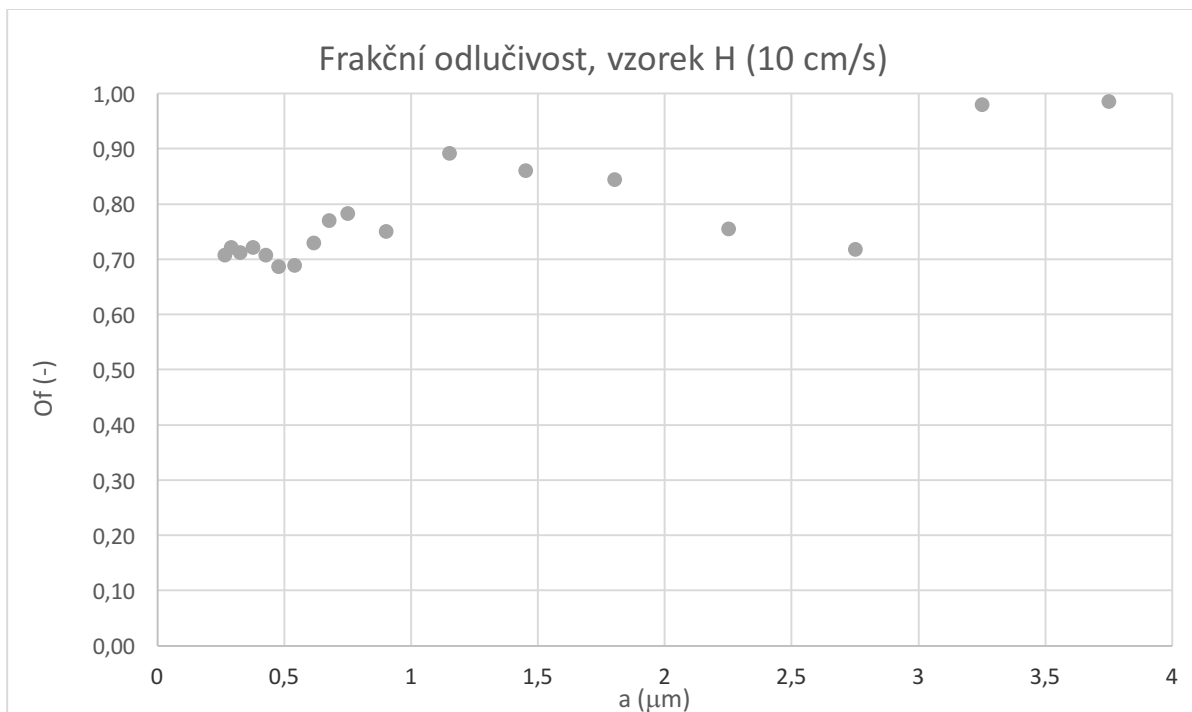
*P 17 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 4 cm/s.*



*P 18 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 6 cm/s.*



*P 19 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 8 cm/s.*



*P 20 – Frakční odlučivost vzorku H při filtrační rychlosti 10 cm/s.*