



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## FILTRAČNÍ ÚČINNOST TKANINY Z NANOVLÁKNA

FILTRATION EFFICIENCY OF NONOFIBER CLOTH

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kristýna Mandáková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Lízal, Ph.D.

BRNO 2016



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Energetický ústav
Studentka:	<b>Kristýna Mandáková</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. František Lízal, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2015/16

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

## Filtrační účinnost tkaniny z nanovlákná

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tkaniny z nanovlákná se začínají prosazovat jako domněle účinnější náhrada za běžné filtrační tkaniny. Cílem práce je sestavit experimentální trať a na ní proměřit filtrační účinnost tkaniny z nanovlákná pro různé průtoky a různé velikosti částic.

### Cíle bakalářské práce:

Nastudovat odbornou literaturu v oblasti filtrace částic mikrometrových rozměrů.

Sestavit měřicí trať pro ověření filtrační účinnosti tkaniny z nanovlákná.

Provést měření a vyhodnotit výsledky filtrační účinnosti.

### Seznam literatury:

Hinds, William. (1999) Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles, New York : Wiley.

Pavelek, M. - Štětina, J. (1997): Experimentální metody v technice prostředí. Skripta. VUT Brno.

Vědecké články zaměřené na nanovlákná a filtrace částic

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

### **Abstrakt:**

V této bakalářské práci se zabývám filtrační účinností tkaniny z nanovláknů, která se stanoví pomocí počtu částic aerosolu naměřených před a za filtrem pomocí přístroje APS. Aerosol je generován přístrojem CMAG. Dále se v této práci zabývám rešeršní studií na téma filtrace částic mikrometrových rozměrů.

### **Klíčová slova:**

Aerosoly, filtrace, nanovláknů, filtrační účinnost.

### **Abstract:**

In this bachelor thesis I deal with filtration efficiency of nanofiber cloth, which are determined by number of aerosol particles measured in front of the filter and behind the filter using APS. Aerosol particles are generated by CMAG. The next topic of this thesis is a search of particle filtration of micrometer size.

### **Key words:**

Aerosols, filtration, nanofibers, filtration efficiency.

**Bibliografická citace:**

MANDÁKOVÁ, K. *Filtrační účinnost tkaniny z nanovláknů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 31 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Lízal, Ph.D..

### **Poděkování:**

Děkuji svému vedoucímu práce Ing. Františku Lízalovi, PhD. za odborné vedení mé bakalářské práce, jeho cenné rady, vstřícnost při konzultacích a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěla poděkovat mým rodičům, kteří mi byli velkou oporou po celou dobu mého studia.

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Filtrační účinnost tkaniny z nanovláknů“ vypracovala samostatně s použitím uvedených zdrojů.

Brno 27.5.2016

.....

Kristýna Mandáková





## Obsah

1. Úvod.....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1. Aerosoly .....	11
2.1.1. Velikost a tvar částic aerosolu .....	11
2.1.2. Koncentrace částic aerosolů .....	12
2.1.3. Výroba aerosolů .....	12
2.2. Odlučovací principy pevných částic.....	13
2.3. Nanovláknna a jejich význam ve filtraci.....	13
2.3.1. Nanofiltrace versus nanofiltry.....	13
2.3.2. Výroba nanovláken.....	14
2.3.3. Využití filtrů s nanovláknny .....	15
2.3.4. Výhody nanovláken při použití ve filtraci.....	16
3. Experimentální část – měření filtrační účinnosti .....	18
3.1. Měřicí trať.....	18
3.2. Použité přístroje .....	18
3.2.1. CMAG 3475 .....	18
3.2.2. PAM 3375 – Proces aerosol monitor .....	19
3.2.3. Dilutor AD 3302A a APS 3321 – Aerodynamic Particle Sizer.....	20
3.3. Podmínky měření.....	20
3.3.1. Volba vstupních parametrů .....	21
3.3.2. Průběh měření.....	21
3.4. Zpracování dat .....	21
3.5. Výsledky měření .....	22
4. Diskuze.....	27
5. Závěr.....	28
6. Seznam zdrojů .....	29

## 1. Úvod

Hlavním tématem mé bakalářské práce je nanovláknový filtr, jehož filtrační účinnost budu měřit. Nanovláknový filtr je filtr s průměrem vlákna menším než 1  $\mu\text{m}$ .

V první části mé bakalářské práce se zaměřím na rešeršní studii o aerosolech - jaké parametry a jaké jednotky se používají při jejich popisu a jak se vyrábí – a o filtraci. Dále se budu zabývat nanovláknovými filtry, jejich výrobou, využitím a výhodami.

V experimentální části je hlavním cílem zjistit filtrační účinnost nanovláknového filtru. K provedení tohoto měření jsem použila přístroje CMAG, PAM a APS. Ve stručnosti jsem popsala i princip funkce těchto přístrojů.

## 2. Teoretická část

### 2.1. Aerosoly

Aerosol je definován jako směs pevných nebo kapalných částic rozptýlených v plynu. Je to dvoufázový systém, který se skládá z částic a z plynu, ve kterém jsou tyto částice rozptýleny. Aerosoly se rozdělují podle jejich fyzikálních vlastností, což jsou velikost a tvar částic, hustota a koncentrace částic rozptýlených v plynu a jejich stabilita, a dále podle metod generování částic aerosolu. Tyto parametry budou podrobněji vysvětleny v následujících kapitolách. Aerosoly ovlivňují kromě viditelnosti a klimatu i naše zdraví a kvalitu života. Jako příklad aerosolů nacházejících se okolo nás lze uvést výfukové plyny z aut, smog, dým, mlhu nebo spreje.

Definice některých druhů aerosolů [1]:

Bioaerosoly – jsou biologického původu, obsahují viry, živé organismy jako bakterie a houby a produkty organismů jako houbové výtrusy a pyl.

Oblak – viditelný aerosol s jasně danými hranicemi.

Prach – pevné částice vzniklé dezintegrací původního materiálu vlivem drcení, mletí, atp. Částice jsou obvykle nepravidelné.

Dým, kouř – pevné částice aerosolu vzniklé nedokonalým spalováním.

Opar – atmosférický aerosol, který ovlivňuje viditelnost.

Mlha – kapalná částice aerosolu vzniklé kondenzací. Částice jsou kulovitého tvaru o velikosti do 200 nm.

Smog – obecný termín pro viditelné znečištění ovzduší. Částice jsou obvykle menší než 1  $\mu\text{m}$  nebo 2  $\mu\text{m}$ .

Sprej – kapičky aerosolu vytvořené mechanickým rozpadem kapaliny. Částice jsou větší než několik mikrometrů.

#### 2.1.1. Velikost a tvar částic aerosolu

Velikost částic je nejdůležitější parametr charakterizující chování aerosolů. Všechny vlastnosti aerosolů závisejí více či méně na velikosti částic. Velikost částic aerosolů se pohybuje mezi 0,002  $\mu\text{m}$  – 100  $\mu\text{m}$  a udává se v mikrometrech nebo v mikronech, což odpovídá  $10^{-6}$  m. Obecně lze říci, že prach, částice země a pyl mají velikost v řádu jednotek mikrometrů nebo větší, částice dýmu a kouře jsou menší než 1  $\mu\text{m}$  [1].

Kapalné částice aerosolů jsou ve většině případů sférické. Pevné částice jsou nepravidelného tvaru. V obou případech se pro popis velikosti částic používá průměr, u nepravidelných tvarů jde o ekvivalentní průměr. Je to průměr, který odpovídá kouli, jejíž fyzikální vlastnosti (např. objem, hmotnost) jsou stejné jako vlastnosti původní nepravidelné částice aerosolu. Podle toho, která fyzikální vlastnost je v danou chvíli nejdůležitější, se vybere vhodný ekvivalentní průměr. Jako příklad lze uvést tyto ekvivalentní průměry [1]:

Objemový ekvivalentní průměr – jde o průměr koule se stejným objemem jako je objem původní částice.

Hmotnostní ekvivalentní průměr – jde o průměr koule se stejnou hmotností jako je hmotnost původní částice.

Povrchový ekvivalentní průměr – jde o průměr koule se stejným povrchem jako je povrch původní částice.

A další.

### 2.1.2. Koncentrace částic aerosolů

Rozlišujeme dva druhy koncentrace – hmotnostní koncentraci a koncentraci částic [1]:

Hmotnostní koncentrace je daná hmotností částic v jednotkovém objemu plynu tvořícího aerosol. Je důležitá z hlediska zdraví a dopadu na životní prostředí. Tato koncentrace se vyjadřuje v  $\text{g}/\text{m}^3$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$  a v  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Koncentrace částic udává počet částic v jednotkovém objemu plynu tvořícího aerosol a používají se pro ni jednotky počet částic/ $\text{cm}^3$  nebo počet částic/ $\text{m}^3$ . Využívá se pro určování koncentrace bioaerosolů a vláken.

### 2.1.3. Výroba aerosolů

Existuje mnoho různých způsobů výroby aerosolů. V následujících odstavcích jsou popsány jen ty nejdůležitější [1]:

#### Atomizace kapaliny

Atomizace kapaliny probíhá v přístrojích zvaných atomizátory. Atomizace obecně znamená rozpad hmoty na menší částice. V případě aerosolů to znamená mechanické rozptýlení kapaliny na malé kapky. Druhy atomizátorů:

- tlakové
- plynové
- rotační
- ultrazvukové, elektrostatické

#### Atomizace pomocí suspenze monodisperzních částic v kapalině

Tato metoda se využívá při kalibraci přístrojů měřících velikosti částic, kde je vyžadována vysoká monodisperzita generovaných částic. Monodisperzní částice se získávají atomizací roztoku, který je složen z vody a stabilizátorů a pevných částic. Pevné částice v roztoku jsou většinou z PSL (polystyrénový latex) nebo PS-DVB (polystyrendivinylbenzenový latex). Po atomizaci se částice vysuší a takto vzniklý aerosol se dá použít například na kalibraci přístrojů.

#### Disperze suchého prášku

Na tomto principu pracuje Wrightův generátor prachu. V přístroji se kumulují drobné částice a dochází k mechanickému rozrušování povrchu původního materiálu. Tento prach je následně proudem vzduchu vyfouknut ven z přístroje. Tato metoda se používá při testování zařízení na čištění vzduchu a při testování filtrů.

## Kondenzační metody

Tato metoda funguje na principu fázové přeměny látky mezi plynným a kapalným skupenstvím. Nejčastěji používaným plynem je  $N_2$  nebo  $CO_2$ . Směs plynů obohacená o kondenzační jádra se ochlazuje, páry kondenzují a vzniká stabilní aerosol.

### 2.2. Odlučovací principy pevných částic

Základní principy odlučování pevných částic [2]:

Gravitační princip - V místech, kde plyn obtéká povrch odlučovacích ploch, je rychlost plynu téměř nulová a částice jsou ovlivňovány gravitací. Rychlost pádu částic je dána rovnováhou gravitačních a aerodynamických sil.

Setrvačný princip - Pokud plyn s příměsí částic obtéká těleso, pak se dráhy těchto částic odchylní od proudnic. Odchylka je tím větší, čím je větší hmotnost částic.

Difuzní princip - Částice menší než  $1\mu m$  jsou ovlivňovány převážně molekulárními silami, setrvačnost a vnější síly na tyto malé částice mají zanedbatelný vliv a proto jsou odlučovány molekulární difuzí. Částice se v plynu pohybují Brownovým pohybem, a proto se nepopisuje dráha jedné částice ale střední tok částic danou plochou – Fickův zákon.

Elektrostatický princip - Náboj částic v plynu může vzniknout přirozeným (tření o stěny, vzájemné nárazy částic) nebo umělým způsobem (elektrické pole se zdrojem iontů). Náboj získaný umělým způsobem je řádově větší než přirozený náboj. Zdrojem pohybu částice je síla, která působí na nabitou částici v elektrickém poli.

### 2.3. Nanovlákná a jejich význam ve filtraci

#### 2.3.1. Nanofiltrace versus nanofiltry

Nanofiltrace a filtrace s nanovláknem jsou dva odlišné děje.

Nanofiltrace je membránový separační proces. Na začátku šedesátých let byly známé tři membránové separační procesy: reverzní osmóza, ultrafiltrace a mikrofiltrace. Mikrofiltrace pokrývá rozsah velikosti částic od  $10\mu m$  do  $0,1\mu m$ , zatímco ultrafiltrace  $0,1\mu m$  až  $5\text{ nm}$ ). Reverzní osmóza zadržuje velmi malé molekuly chloridu sodného z vody. Je zřejmé, že ještě zbývá mezera v pokrytí velikosti částic mezi ultrafiltrací a reverzní osmózou, tento typ filtrace byl později nazván nanofiltrace. Nanofiltrace odděluje anorganické a organické látky z roztoku. To se děje difuzí přes membránu na základě tlakových rozdílů, které jsou podstatně menší než u reverzní osmózy, ale větší než při ultrafiltraci. Klíčový rozdíl mezi reverzní osmózou a nanofiltrací je ten, že osmóza zadržuje jednovazebné soli (jako například chlorid sodný), zatímco nanofiltrace je propouští [3].

Nanofiltry jsou vláknenné filtry obsahující nanovlákná. Tato jemná vlákna se začala vyrábět v důsledku zvyšujících se nároků na jemnější filtraci, mají průměr menší než  $1\mu m$  a proto jsou nazývána nanovlákná. Syntetické materiály, jak organické tak anorganické, které jsou v dnešní době spřádány v roztaveném stavu

do stále jemnějších vláken, se nijak neliší od materiálů používaných pro tento účel po desetiletí. Jediné, co se změnilo, je technologie výroby těchto vláken, která umožňuje vyrobit širokou škálu průměrů, až do nanometrových rozměrů [3].

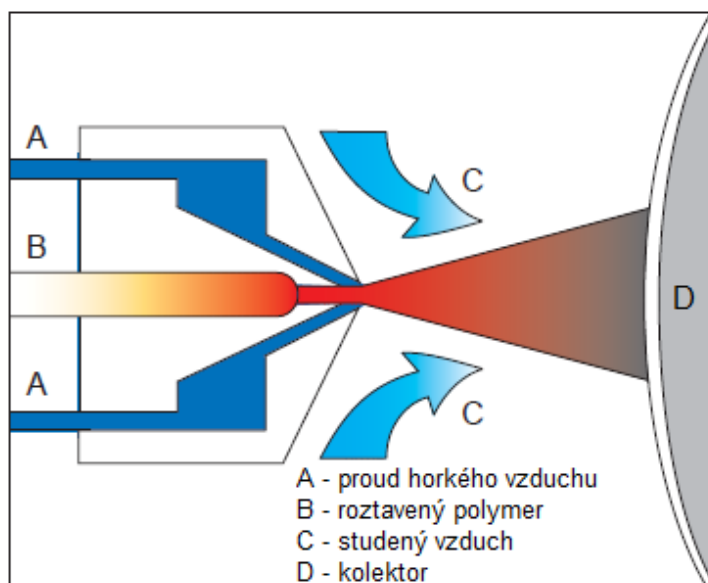
### 2.3.2. Výroba nanovláken

Nanovlákná jsou definována jako vlákna o průměru 1 nm až 1000 nm. Pro srovnání bavlněné vlákno má průměr 18 000 nm, lidský vlas 30 000 nm. Zajímavostí je, že u nanovláken o průměru 700 nm a menších lze jednotlivá vlákna od sebe rozeznat pouze za použití elektronového mikroskopu [4].

Způsoby výroby nanovláken: elektrostatické zvlákňování, předení průtahem, zvlákňování fázovým dělením nebo samosběrem. Nejefektivnější a nejlevnější metodou je elektrostatické zvlákňování, jehož schéma je znázorněno na obrázku 2.1 [4].

Elektrostatické zvlákňování umožňuje výrobu nanovláken s průměrem 10 nm až 350 nm. Princip této metody: kapka roztoku polymeru je vlivem vysokého napětí tažena z konce kapiláry na kolektor a tím jsou produkována nanovlákná [4].

Při výrobě nanovláken mají některé důležité parametry (např. intenzita elektrického pole, rotační rychlost kolektoru) vliv na vlastnosti výsledného nanovláknenného filtru [5].



Obr. 2.1 – Výroba nanovláken elektrostatickým zvlákňováním [4]

Vliv intenzity elektrického pole: Při změně intenzity elektrického pole se průměr vlákna nemění. Elektrické pole o vyšší intenzitě potlačuje axiální nestabilitu (změnu průměru) a tím potlačuje tvorbu korálových vláken. Zvýšením intenzity elektrického pole se zvýší míra křížení nanovláken na kolektoru (viz obrázek 2.1 – D) a sníží se velikost pórů mezi nanovlákná. Oba tyto jevy, jak potlačení axiální nestability, tak i zvýšení křížení nanovláken, mohou být způsobeny zvýšením rychlosti tahu nanovláken v důsledku větší intenzity elektrického pole. Výjimku tvoří pouze velmi vysoká intenzita elektrického pole (167 000 V/m) kdy dojde k akumulaci náboje na

nanovlákních, což zvyšuje odpuzování nanovláken a změnu jejich uspořádání. To se projevuje snížením filtrační účinnosti a zvětšením pórů mezi nanovlákníky [5].

Vliv rotační rychlosti kolektoru: Průměr vláken se opět nemění. Se zvyšující se rotační rychlostí kolektoru se zvyšuje hustota nanovláken a snižuje se jejich pórovitost [5].

Schopnost produkovat rovná nanovlákníka bez korálků umožní konstrukci filtrů, které jsou značně účinnější než filtry z nanovláken s korálky [6].

### 2.3.3. Využití filtrů s nanovlákníky

Nanovlákněné filtry lze s výhodou použít pro filtraci krve, vody, vzduchu, nápojů, plynu, chemických látek, oleje, nafty, benzínu, atd. Používají se tam, kde je potřeba vysoký výkon čištění vzduchu, např. v nemocnicích, zdravotnických zařízeních, výzkumných laboratořích, ve výrobě elektronických součástek, ve vojenských a vládních agenturách, v potravinářských, farmaceutických a biotechnologických společnostech [7].

Příklady komerční aplikace filtrů s nanovlákníky [8]:

Čističe atmosférického vzduchu – Byly z počátku vyvinuty pro NASA pro použití při dlouhých kosmických letech k odstranění velmi malých částic ze vzduchu (bakterie, viry, kouř, prach, jemné parfémové částice, ...).

Ventilační filtry pracovišť a čistých provozů – Dříve byly ventilační filtry založeny na skleněných vlákních, filtry na bázi polymerů mají větší výhody jako například vysokou pevnost v tahu, odolnost vůči namáhání, odpor vůči růstu mikroorganismů a možnost svařovat části filtru.

Filtry pro čištění vzduchu v kabině – Vzduch v okolí silnic obsahuje značné množství znečišťujících látek jako například pyl, prach, smog a saze z výfukových plynů. Vzduchové filtry do kabin automobilů jsou schopny odstranit až 99,5% částic způsobujících alergii dříve, než se dostanou do kabiny auta. Nanovlákníka v těchto typech filtrů umožňují zvýšit jejich účinnost a zlepšit recirkulaci vzduchu v kabině vozidla.

Respirační obličejové masky a dýchací přístroje – Předběžné výzkumy ukazují, že použitím nanovláken lze zvýšit účinnost filtrace MPPs (most penetrating particle size = nejvíce pronikající částice o průměru 150 až 300 nm). Toto zjištění inspirovalo vědce k použití nanovláken i pro respirační obličejové masky a dýchací přístroje.

Filtry pro přívod vzduchu do strojů – Čistý vzduch je vyžadován pro podporu spalování fosilních paliv v malých strojích, jako jsou automobilové motory, i v těžké technice jako jsou plynové turbíny. Studie ukázala, že částice v rozmezí 1 až 5  $\mu\text{m}$  způsobují opotřebení motoru, což vede ke zvýšení emisí motoru a kratší životnosti motoru. A právě nanovlákněné filtry jsou schopny odfiltrovat částice větší než 1  $\mu\text{m}$ .

Filtry pro motorové oleje a paliva – V motoru vozidla jsou dvě důležité aplikace filtrace kapaliny, filtrace mazacího oleje a filtrace paliva. Pokud není mazací olej dostatečně vyčištěn, hrozí, že nečistoty způsobí obrušování částí motoru.

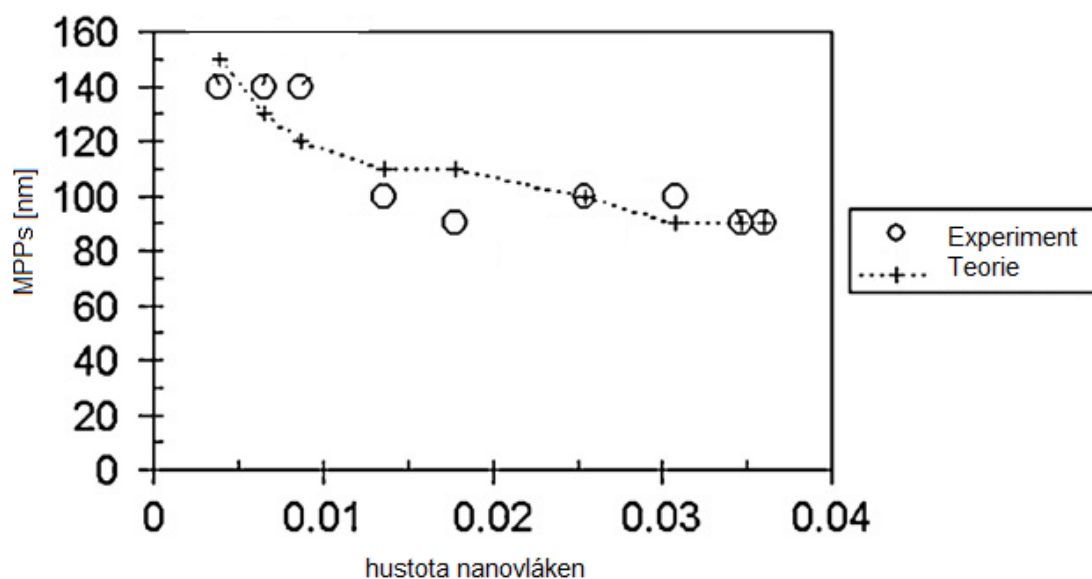
Filtry pro vypouštění nebo čištění plynu – filtry na bázi nanovláken se používají také k odstranění prachu z pracovního prostoru, pro výfuky motorů a u výfukových plynů z chemických výrobních procesů.

#### 2.3.4. Výhody nanovláken při použití ve filtraci

Filtry obsahující nanovlákná mají výrazně vyšší účinnost, a to zejména u aerosolových částic malých rozměrů (100-500 nm), kde je účinnost běžných komerčních filtrů nejnižší. Tyto komerční filtry obvykle obsahují vlákna různých velikostí (průměrů). Snížení průměru vláken může značně zvýšit účinnost filtru. Přidání tlustší vrstvy filtru z nanovláken je výhodné, proto je vhodné u dvouvrstevných filtrů použít tenkou podkladovou vrstvu a tlustší vrstvu z nanovláken [9].

Studie ukazují že nanovláknenné filtry mají v čistém stavu lepší účinnost a vyšší faktor kvality ( $Q_F = -\frac{\ln(1-\eta)}{\Delta p}$ , kde QF je faktor kvality,  $\Delta p$  je pokles tlaku a  $\eta$  je filtrační účinnost [10]) než filtry z mikrovláken. Na druhou stranu filtry z mikrovláken, které jsou výrazně silnější než z nanovláken, mají větší kapacitu pro zadržování prachu. Proto se používá vícevrstvý filtr, který má vrstvu z mikrovlákna jako první po směru proudu a potom následuje vrstva z nanovlákná. Toto uspořádání výrazně snižuje míru zatížení nanovláknenné vrstvy a zabraňuje jejímu ucpávání a tím umožňuje lepší využití filtrační kapacity nanovláknenného filtru [11].

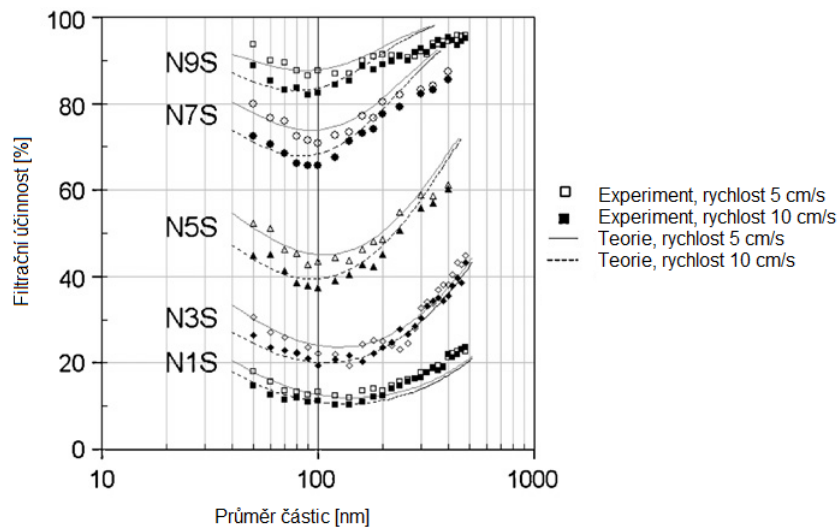
V aplikacích, které vyžadují vysokou účinnost filtrace, je efektivnější použít vícevrstvý nanovláknenný filtr s nízkou plošnou hmotností, oproti použití jedné vrstvy nanovláken s vysokou plošnou hmotností [12]. Výkon filtrace nanovláknenných filtrů byl významně zlepšen použitím více tenkých vrstev nanovláken. Výsledky studie ukazují, že filtr seskládaný z více tenkých vrstev nanovláken je slibnou metodou pro zlepšení výkonnosti nanovláknenné filtrace [13].



Obr. 2.2 – Závislost přefiltrovaných MPPs na hustotě nanovláken [10]



Tloušťka vrstvy nanovláken má menší vliv na účinnost filtrace než hustota nanovláken. Počet nepřefiltrovaných MPPs klesá s hustotou nanovláken (viz obrázek 2.2). Filtrační účinnost se obecně snižuje s rychlostí proudění (viz obrázek 2.3). Je to proto, že zvýšení rychlosti proudění snižuje retenční čas částic v rámci nanovláknenné struktury a tím snižuje šanci kolize částic s nanovláknem Brownovým pohybem. Při použití nanovláknenných filtrů se doporučuje co nejnižší rychlost proudění. Nanovláknena uložená do jediné vrstvy zvyšují pokles tlaku bez výrazného zlepšení filtrační účinnosti, což vede ke snížení faktoru kvality a ke zhoršení výkonnosti [10].



Obr. 2.3 – Závislost filtrační účinnosti na velikosti částic v souvislosti s rychlostí proudění [10]

Nanovláknena uspořádaná ve vrstvách kolmých k sobě navzájem umístěná na podklad již existujícího netkaného filtru zvýší jeho účinnost bez dalšího poklesu tlaku. Numerické simulace ukázaly, že pro každou velikost částice existuje průměr vlákna, pro které je výkon nanovláknenné vrstvy neovlivněn roztečí vláken. Pro rozsah velikostí částic MPPs bylo zjištěno, že tento průměr vlákna je asi třikrát větší než průměr částic [14].

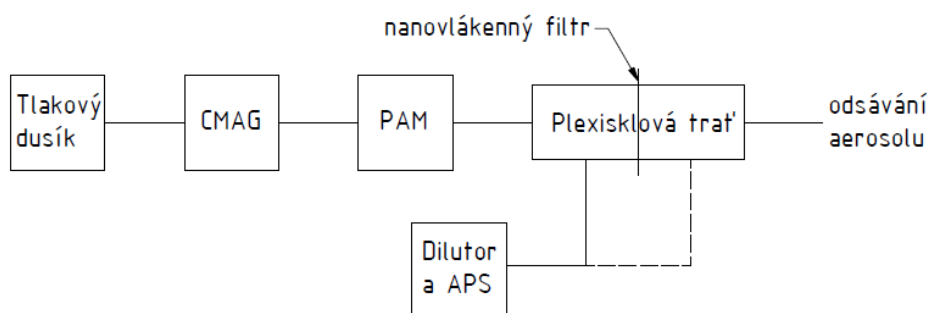
Výpočtová účinnost filtrů bývá mírně nadhodnocena, což je zvláště patrné u nanovláknenných filtrů. Je to způsobeno případnou strukturální nehomogenitou filtrů, která má silný vliv na jejich účinnost. Z tohoto důvodu je nutné při výrobě nanovláknenných filtrů usilovat o co největší homogenitu. Vysoká homogenita je jedním z klíčových parametrů nanovláknenných filtrů a lze jí jen stěží dosáhnout v případě příliš tenké vrstvy nanovláken [9].

### 3. Experimentální část – měření filtrační účinnosti

Cílem této práce je sestavit měřicí trať pro ověření filtrační účinnosti tkaniny z nanovláknů, provést měření a vyhodnotit výsledky. V následujících kapitolách popíšu schéma měření a vysvětlím, jak jsme při měření postupovali.

#### 3.1. Měřicí trať

Při měření jsme přístroje umístili podle schématu na obrázku 3.1.



Obr. 3.1 – Schéma měřicí trati

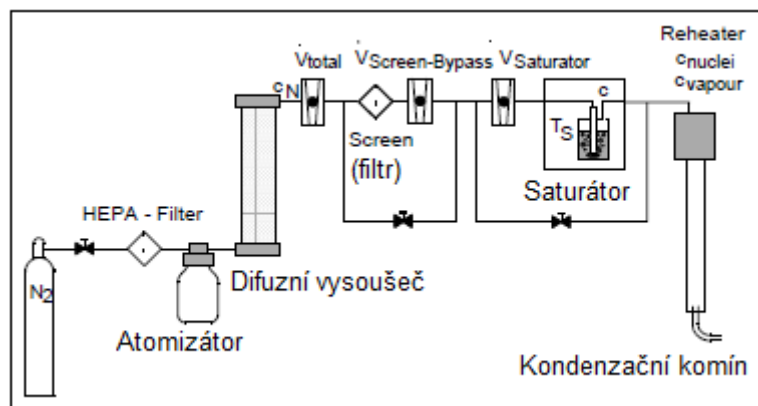
Dusík v tlakové lahvi zásoboval generátor aerosolu CMAG, aerosol proudil z tohoto přístroje do PAM (Proces Aerosol Monitor), který měřil okamžitou velikost generovaných částic a sloužil i jako ověření, že z CMAG proudí požadovaná velikost částic aerosolu. Dále trať pokračovala plexisklovou částí, uprostřed které byl umístěn nanovláknový filtr. Z plexisklové části se odebíraly vzorky aerosolu před filtrem a za filtrem, které proudily do Dilutoru a do APS (Aerodynamic Particle Sizer). APS posílalo hodnoty do počítače, kde jsme je vyhodnocovali. Přepínání průběhu trati pro odebrání aerosolu před a za filtrem probíhalo ručně.

#### 3.2. Použité přístroje

Při měření jsem používala přístroj CMAG pro generování aerosolu, PAM pro měření okamžité velikosti částic a přístroj APS, který měřil a vyhodnocoval počet aerosolových částic. V následujících podkapitolách budou tyto přístroje stručně popsány.

##### 3.2.1. CMAG 3475

CMAG je zkratka anglického názvu Condensation Monodisperse Aerosol Generator, což v překladu do českého jazyka znamená kondenzační generátor monodisperzního aerosolu, což samo o sobě vyjadřuje jeho funkci. Číslo 3475 označuje model.

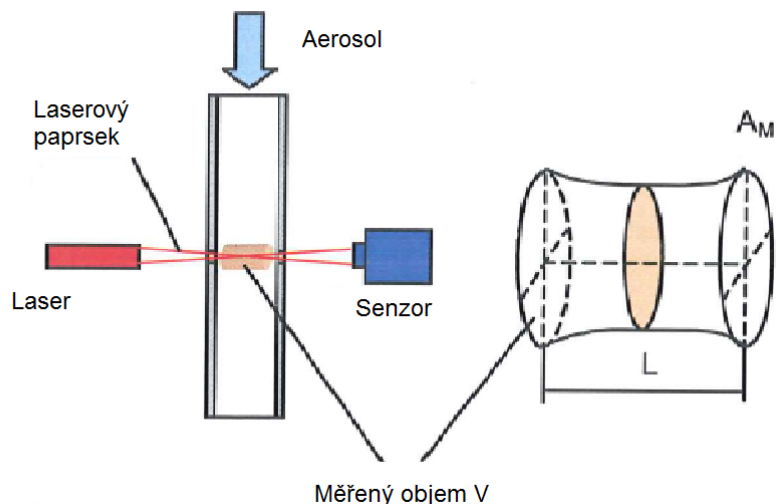


Obr. 3.2 – Schéma CMAG [15]

Na obrázku 3.2 jsou znázorněny jednotlivé části přístroje CMAG, a jak jdou za sebou. CMAG potřebuje pro svou správnou funkci plyn, tento typ přístroje využívá stlačený dusík. Stlačený dusík připojíme k samotnému přístroji, kde jako první následuje HEPA filtr, který zajišťuje co největší čistotu dusíku. Dále se v CMAGu nachází atomizátor – zásobárna kondenzačních jader, ve kterém je roztok NaCl. Následuje difuzní vysoušeč naplněný silikagelem, který vysouší přebytečnou vodu z kapek vzniklých v atomizátoru. Přístroj pokračuje dále buď přes screen (filtr) nebo větví která screen obchází, díky tomu lze snadno regulovat výslednou koncentraci částic aerosolu. Za screenem následuje opět větvení, které vede buď přes saturátor nebo ho obchází. Saturátor má za úkol obohatit směs krystalků soli a dusíku o látku di-2-ethylhexil sebakát (DEHS), jedná se o páry aerosolového materiálu. Dále se v přístroji nachází reheater, který vzniklou směs ohřívá, aby se homogenizovala a případné již zkondenzované částice opět vypařili a kondenzovaly všechny naráz až v kondenzačním komíně, kde se směs ochlazuje. Díky tomu je vzniklý aerosol monodisperzní [15].

### 3.2.2. PAM 3375 – Proces aerosol monitor

Přístroj PAM měří okamžitou velikost a koncentraci částic na principu propustnosti světla. Schéma měření je znázorněno na obrázku 3.3. Částice prochází nerezovou trubicí, ve které se nachází na jedné straně laser a na druhé senzor. Množství částic aerosolu procházejících trubicí ovlivňuje intenzitu světla dopadajícího na senzor. Intenzita světla je úměrná velikosti částic a jejich koncentraci [16].

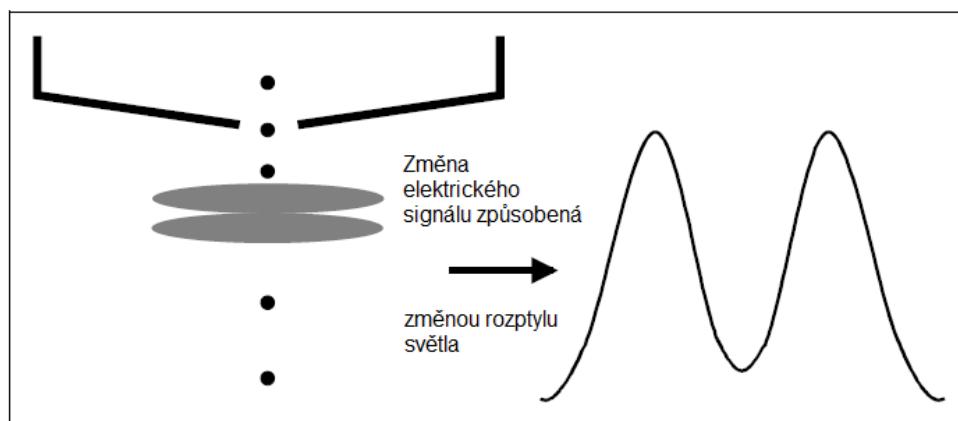


Obr. 3.3 – Schéma PAM [16]

### 3.2.3. Dilutor AD 3302A a APS 3321 – Aerodynamic Particle Sizer

Měřený aerosol nevstoupal do APS přímo, ale procházel nejdříve Dilutorem který aerosol ředil v poměru 1:100.

APS je typ spektrometru, který měří velikost částic v rozsahu 0,5 až 20  $\mu\text{m}$  a jejich rozložení. APS nejdříve zrychlí tok částic pomocí trysky a následně vyhodnocuje reakci částic na toto zrychlení. Větší částice zrychlí pomaleji, menší rychleji. Doba letu částic se měří za tryskou mezi dvěma paprsky laseru (viz obrázek 3.4) [17].



Obr. 3.4 – Částice procházející přes laserové paprsky způsobí změnu elektrického signálu [17]

### 3.3. Podmínky měření

Při měření jsem se snažila postupovat pokaždé stejně, aby byly výsledky měření mezi sebou porovnatelné.

### 3.3.1. Volba vstupních parametrů

Velikost částic vznikajícího aerosolu je možné měnit změnou teploty saturátoru a reheateru a změnou průtoku přes saturátor.

Po konzultaci jsem zvolila tyto parametry, které byly stálé po celou dobu měření. Tlak dusíku byl 5 bar, teplota reheateru 300 °C, a koncentrace roztoku NaCl byla 20 mg/l.

Parametry, kterými jsem měnila velikost částic, byly nastaveny následovně. Pro velikost částic 6,5 μm byla teplota a průtok saturátorem 240 °C a 9 sc (260 l/h), pro velikost 2 μm to bylo 240 °C a 3 sc (53 l/h) a pro velikost částic 0,8 μm to bylo 160 °C a 6 sc (150 l/h).

### 3.3.2. Průběh měření

Po sestavení měřicí tratě jsem zapnula všechny přístroje, pustila jsem dusík, nastavila všechny potřebné parametry na CMAG a chvíli jsem počkala, než se aerosol ustálí, což se dalo zkontrolovat pomocí PAM. Poté jsem měřila počet a koncentraci částic před a za nanovlákněným filtrem pomocí APS, a to pro tři různé velikosti částic (0,8 μm, 2 μm, 6,5 μm). Tato měření jsem provedla vždy pro deset různých filtrů, a pro každý jednotlivý filtr jsem provedla měření před a za nanovlákněným filtrem. Z naměřeného počtu částic jsem nakonec vypočítala účinnost filtru podle vzorce:

$$\eta = \frac{\text{počet částic před filtrem} - \text{počet částic za filtrem}}{\text{počet částic před filtrem}}$$

## 3.4. Zpracování dat

Data z přístroje APS byla zaznamenána do počítače pomocí AIM – Aerosol Instrument Manager [18], který z naměřených hodnot vykresloval grafy a dopočítával statistické hodnoty jako medián, modus a odchylka.

Jakmile byla změřená data pro všechny filtry i pro všechny velikosti částic, začalo se s jejich vyhodnocováním. Data ze dvou odpovídajících si souborů před a za filtrem byla porovnána a byla vypočítána účinnost filtru pro danou velikost částic podle vzorce uvedeného výše.

Nakonec tedy byly tři intervaly velikostí částic, a pro každý z těchto intervalů bylo vypočítáno deset různých filtračních účinností. Tyto účinnosti byly zpracovány do tabulky a pro každou velikost byl vypočítán medián filtrační účinnosti z deseti filtračních účinností zjištěných pro jednotlivé filtry.

Přesto že byl přístroj CMAG nastavený pro generování jedné konkrétní velikosti částic, objevila se ve výsledných datech i částice jiných velikostí, ovšem ve výrazně menším množství. Proto jsem pro měření každé velikosti částic stanovila interval kolem jmenovité velikosti částic, který jsem považovala za primární, a který jsem vyhodnocovala.

### 3.5. Výsledky měření

V této kapitole uvádím výsledky měření, v podobě tabulek a grafů, které vyjadřují závislost filtrační účinnosti na velikosti částic. Jde o tři tabulky a o tři grafy, vždy pro konkrétní nastavenou velikost částic na přístroji CMAG.

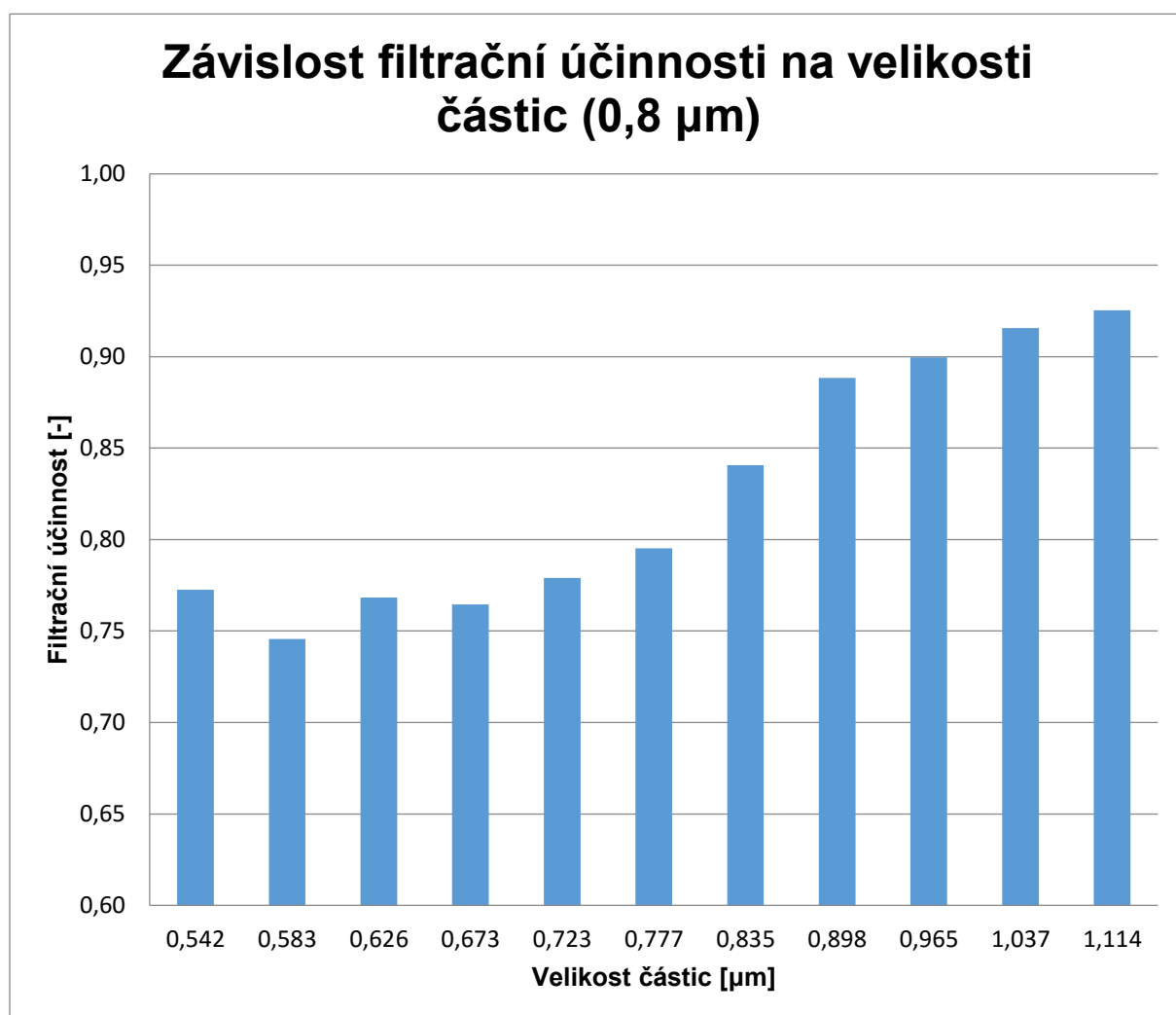
V tabulkách je v prvním sloupci velikost částic v mikrometrech, v druhém až jedenáctém sloupci je filtrační účinnost pro deset filtrů a v posledním dvanáctém sloupci je medián těchto deseti filtračních účinností pro každou velikost částic. Grafy jsou sestrojeny jako závislost mediánu filtrační účinnosti na velikosti částic.

Z grafů i tabulek je patrné, že filtrační účinnost roste s velikostí částic, kromě první tabulky a grafu pro velikost 0,8  $\mu\text{m}$ , kde je minimum filtrační účinnosti pro velikost částic 0,583  $\mu\text{m}$ .

Poslední graf znázorňuje zjištěné odchylky filtrační účinnosti v závislosti na velikosti částic. Z grafu je patrné, že největší odchylka je pro velikost částic 2  $\mu\text{m}$  a nejmenší naopak pro velikost 6,5  $\mu\text{m}$ . To znamená, že nehomogenita nanovlákněného filtru a nejistota měření je nejvíce patrná při filtrování částic o velikosti kolem 2  $\mu\text{m}$ .

Tab. 3.1 – Filtrační účinnosti pro jmenovitou velikost částic 0,8 μm

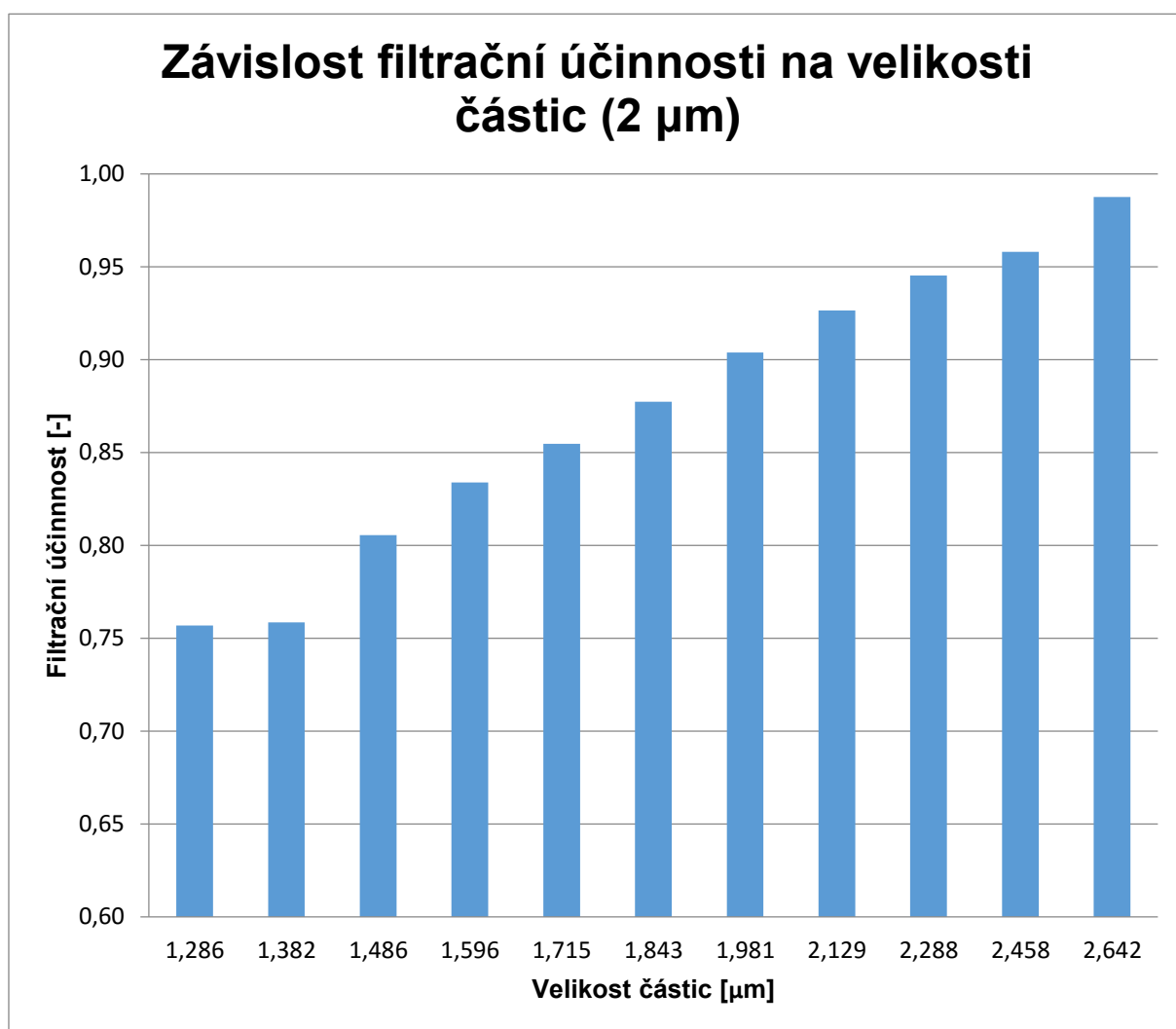
Velikost částic [μm]	Filtrační účinnost (0,8 μm) [-]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Medián
0,542	0,438	0,557	0,734	0,519	0,811	0,817	0,693	0,901	0,832	0,842	0,773
0,583	0,445	0,593	0,701	0,539	0,790	0,843	0,666	0,903	0,799	0,838	0,746
0,626	0,461	0,596	0,734	0,563	0,809	0,848	0,634	0,893	0,803	0,847	0,768
0,673	0,460	0,601	0,733	0,526	0,805	0,846	0,671	0,904	0,796	0,853	0,765
0,723	0,476	0,621	0,743	0,561	0,830	0,854	0,700	0,911	0,815	0,864	0,779
0,777	0,510	0,667	0,759	0,603	0,862	0,878	0,761	0,924	0,829	0,875	0,795
0,835	0,565	0,712	0,761	0,687	0,916	0,904	0,814	0,953	0,867	0,894	0,841
0,898	0,617	0,757	0,733	0,796	0,961	0,928	0,883	0,970	0,905	0,894	0,888
0,965	0,654	0,775	0,653	0,873	0,976	0,934	0,926	0,982	0,921	0,878	0,900
1,037	0,660	0,817	0,738	0,834	0,963	0,930	0,916	0,977	0,924	0,916	0,916
1,114	0,719	0,843	0,783	0,891	0,971	0,952	0,943	0,973	0,920	0,931	0,925



Obr. 3.5 – Graf vyjadřující závislost filtrační účinnosti na velikosti částic

Tab. 3.2 - Filtrační účinnosti pro jmenovitou velikost částic 2 μm

Velikost částic [μm]	Filtrační účinnost (2 μm) [-]										Medián
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1,286	0,595	0,767	0,375	0,752	0,470	0,762	0,940	0,814	0,847	0,333	0,757
1,382	0,653	0,750	0,359	0,767	0,470	0,778	0,953	0,834	0,828	0,292	0,759
1,486	0,729	0,816	0,444	0,801	0,628	0,814	0,962	0,845	0,810	0,608	0,805
1,596	0,750	0,853	0,428	0,820	0,746	0,839	0,967	0,853	0,829	0,866	0,834
1,715	0,781	0,876	0,492	0,840	0,802	0,884	0,966	0,856	0,853	0,960	0,855
1,843	0,764	0,892	0,655	0,863	0,830	0,926	0,963	0,821	0,931	0,986	0,877
1,981	0,746	0,904	0,784	0,904	0,827	0,948	0,954	0,819	0,984	0,995	0,904
2,129	0,731	0,920	0,867	0,933	0,845	0,957	0,965	0,886	0,991	0,993	0,926
2,288	0,707	0,936	0,911	0,954	0,885	0,972	0,969	0,897	0,990	0,995	0,945
2,458	0,711	0,955	0,938	0,961	0,914	0,982	0,996	0,897	0,986	0,995	0,958
2,642	0,788	0,976	0,951	0,988	0,987	1,000	0,989	0,900	1,000	0,993	0,987

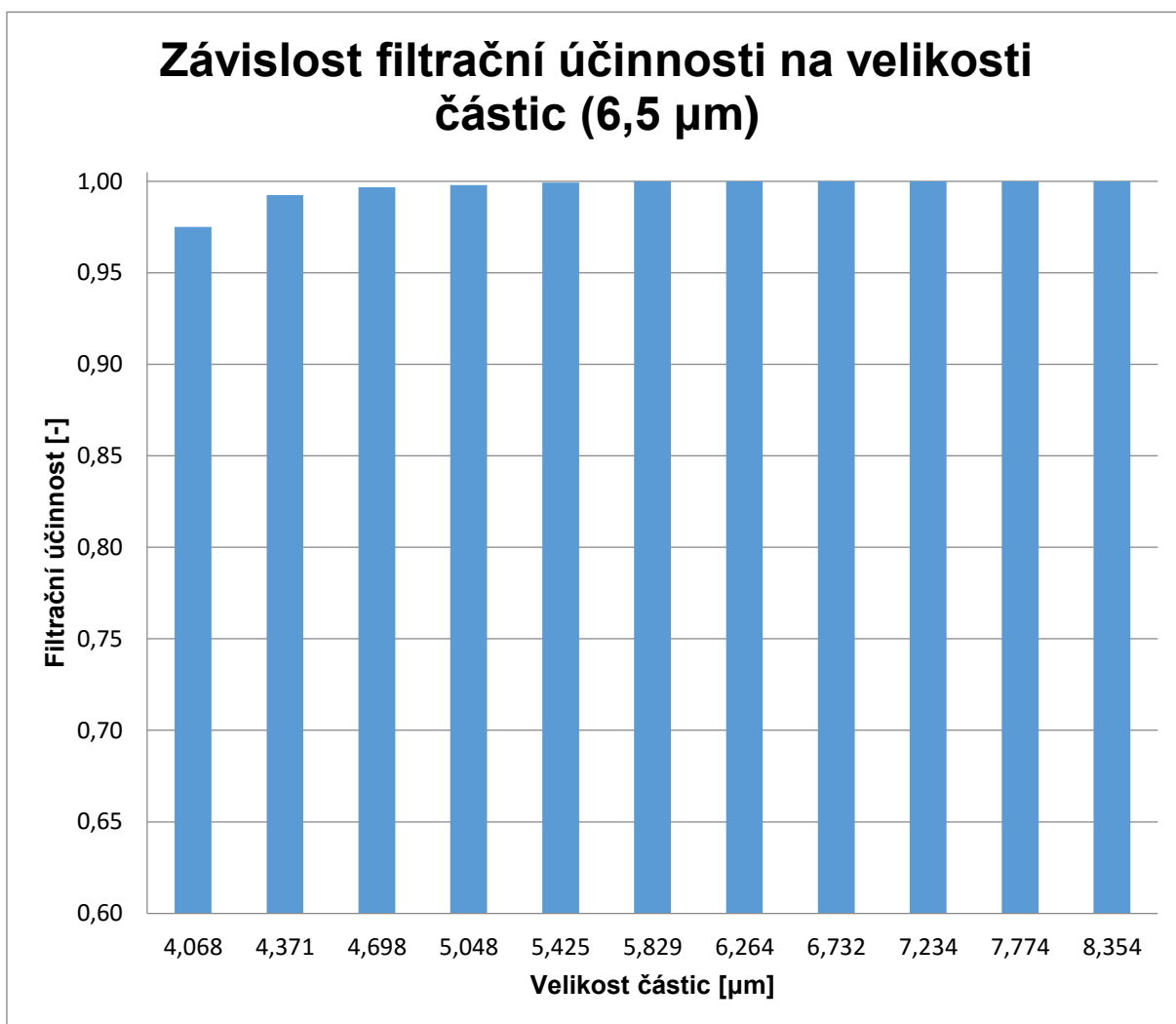


Obr. 3.6 - Graf vyjadřující závislost filtrační účinnosti na velikosti částic

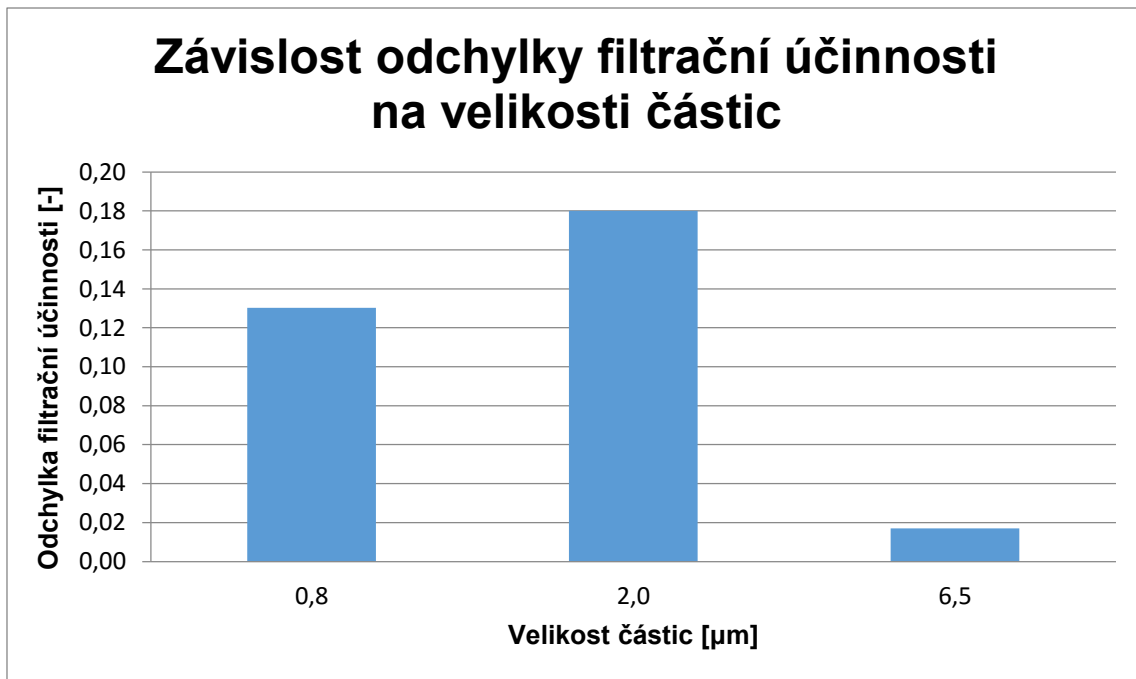


Tab. 3.3 - Filtrační účinnosti pro jmenovitou velikost částic 6,5 μm

Velikost částic [μm]	Filtrační účinnost (6,5 μm) [-]										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Medián
4,068	0,985	1,000	0,957	0,983	0,958	0,972	0,925	0,963	0,984	0,978	0,975
4,371	0,993	1,000	1,000	1,000	0,945	0,991	0,944	0,976	0,992	0,993	0,992
4,698	0,996	1,000	0,993	0,998	0,964	0,999	0,981	0,980	0,997	0,999	0,997
5,048	1,000	0,998	1,000	0,998	0,993	0,998	0,994	0,996	0,998	0,999	0,998
5,425	0,999	1,000	0,998	1,000	0,997	0,999	0,999	0,999	1,000	1,000	0,999
5,829	0,999	1,000	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	0,999	1,000	1,000	1,000
6,264	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
6,732	0,999	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7,234	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
7,774	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
8,354	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000



Obr. 3.7 - Graf vyjadřující závislost filtrační účinnosti na velikosti částic



Obr. 3.8 – Graf vyjadřující závislost odchyly filtrační účinnosti na velikosti částic

## 4. Diskuze

Z výsledků je patrné, že filtrační účinnost se zvětšující se velikostí částic roste. Toto platí téměř pro všechny velikosti částic kromě první tabulky a grafu pro nejmenší velikosti do  $0,723 \mu\text{m}$ , kde filtrační účinnost kolísá, a až poté začne růst. Toto kolísání může být způsobeno nehomogenitou filtru nebo nepřesností měření, protože při této velikosti částic se pohybujeme na hranici rozpoznatelnosti přístroje APS, který má rozsah měřených velikostí částic od  $0,5 \mu\text{m}$  do  $20 \mu\text{m}$ .

Při měření samozřejmě nastalo několik problémů. Hlavně při nastavování vstupních parametrů přístroje CMAG, přestože se daly nastavit přesně, vystupující aerosol neměl vždy přesně stejnou velikost částic jako například den předtím. Tato mírná odlišnost mohla způsobit zvětšení odchylky filtrační účinnosti.

Dalším zajímavým faktem je, že každé měření obsahovalo téměř celé spektrum velikostí částic rozlišitelné přístrojem APS, přestože na CMAG byly nastavené parametry pro generování jen určité velikosti částic. To mohlo být způsobené tím, že některé částičky soli se neobalily párami DEHS, ale to za použití výše zmíněných přístrojů nebylo možné ověřit.

## 5. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo zjistit filtrační účinnost nanovlákněného filtru. Věřím, že naměřená data poslouží k zjištění vlastností tohoto filtru a přispějí k jeho správnému používání, tedy k používání pro rozsah velikostí částic, pro která má filtr největší filtrační účinnost, případně k jeho vylepšení.

V průběhu měření se ukázalo, že nemalý vliv na výsledky má i homogenita nanovlákněného filtru. Zkoumání homogenity filtru a jiných vlastností samotného filtru by bylo velmi zajímavým tématem navazující bakalářské práce.

Účinnosti jednotlivých filtrů se mírně lišily, zda to bylo způsobené nehomogenitou filtru nebo jinými faktory by vyžadovalo podrobnější analýzu, případně měření více přístroji a jejich vzájemné porovnání.

Na konec bych ráda zmínila, že při měření dat k této bakalářské práci jsem měla možnost pracovat v laboratoři s přístroji, ke kterým se člověk tak snadno nedostane. Také jsem měla možnost vyzkoušet si spolupráci se zahraničními studenty, což mě obohatilo i po jazykové stránce. Celou tvorbu mé bakalářské práce - psaní, měření i zpracovávání dat považuji za velmi cenné zkušenosti.

## 6. Seznam zdrojů

- [1] HINDS, William C. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: John Wiley, 1999. ISBN 0471194107.
- [2] JANOTKOVÁ, Eva. *Technika prostředí*. 1. vyd. Brno: VUT, 1991. ISBN 802140258X.
- [3] SUTHERLAND, Ken. Developments in filtration: What is nanofiltration? *Filtration and Separation* [online]. 2008, 45(8), 32-35 [cit. 2016-04-15]. DOI: 10.1016/S0015-1882(08)70298-2. ISSN 00151882. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0015188208702982>
- [4] WARD, Greg. Nanofibres: media at the nanoscale. *Filtration and Separation* [online]. 2005, 42(7), 22-24 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/S0015-1882(05)70618-2. ISSN 00151882. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0015188205706182>
- [5] BARHATE, R.S., Chong Kian LOONG a Seeram RAMAKRISHNA. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. *Journal of Membrane Science* [online]. 2006, 283(1), 209-218 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.memsci.2006.06.030. ISSN 03767388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0376738806004182>
- [6] BALGIS, R, CW KARTIKOWATI, T OGI, L GRADON, L BAO, K SEKI a K OKUYAMA. Synthesis and evaluation of straight and bead-free nanofibers for improved aerosol filtration. *Chemical Engineering Science* [online]. PERGAMON-ELSEVIER SCIENCE LTD, 2015, 137(?), 947-954 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.ces.2015.07.038. ISSN 00092509. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0009250915005230>
- [7] BARHATE, R.S. a Seeram RAMAKRISHNA. Nanofibrous filtering media: Filtration problems and solutions from tiny materials. *Journal of Membrane Science* [online]. 2007, 296(1), 1-8 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.03.038. ISSN 03767388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0376738807002049>
- [8] BARHATE, R.S., S. SUNDARRAJAN, D. PLISZKA a S. RAMAKRISHNA. Fine chemical processing: The potential of nanofibres in filtration. *Filtration and Separation* [online]. 2008, 45(4), 32-35 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/S0015-1882(08)70092-2. ISSN 00151882. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0015188208700922>
- [9] PODGORSKI, Albert, Anna BALAZY a Leon GRADON. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous

filters. *Chemical Engineering Science* [online]. 2006, 61(20), 6804-6815 [cit. 2016-04-15]. DOI: 10.1016/j.ces.2006.07.022. ISSN 00092509. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0009250906004507>

[10] LEUNG, Wallace Woon-Fong, Chi-Ho HUNG a Ping-Tang YUEN. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate. *Separation and Purification Technology* [online]. 2010, 71(1), 30-37 [cit. 2016-04-15]. DOI: 10.1016/j.seppur.2009.10.017. ISSN 13835866. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1383586609004407>

[11] LEUNG, Wallace Woon-Fong a Chi-Ho HUNG. Skin effect in nanofiber filtration of submicron aerosols. *Separation and Purification Technology* [online]. 2012, 92, 174-180 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.02.020. ISSN 13835866. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1383586611001110>

[12] HUNG, Chi-Ho a Wallace Woon-Fong LEUNG. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime. *Separation and Purification Technology* [online]. 2011, 79(1), 34-42 [cit. 2016-04-15]. DOI: 10.1016/j.seppur.2011.03.008. ISSN 13835866. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1383586611001584>

[13] ZHANG, Qi, James WELCH, Hyoungjun PARK, Chang-Yu WU, Wolfgang SIGMUND a Jan C.M. MARIJNISSEN. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2010, 41(2), 230-236 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2009.10.001. ISSN 00218502. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0021850209001724>

[14] BUCHER, T.M., H. Vahedi TAFRESHI a G.C. TEPPER. Modeling performance of thin fibrous coatings with orthogonally layered nanofibers for improved aerosol filtration. *Powder Technology* [online]. 2013, 249, 43-53 [cit. 2016-04-16]. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.07.023. ISSN 00325910. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0032591013004828>

[15] TSI. Model 3475 Condensation monodisperse aerosol generator. Instruction Manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2004.

[16] TSI. Model 3375 Process aerosol monitor. Operation and service manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2005.

[17] TSI. Model 3321 Aerodynamic particle sizer. Operation and service manual. In. TSI incorporated, Shoreview, USA, 2006.

[18] TSI. Aerosol Instrument Manager Software Module (for Scanning Mobility Particle Sizer and Aerosol Particle Sizer). TSI incorporated, Shoreview, USA, 2010