

Nanovláknenné vzduchové filtry

Veronika Kuncová

Bakalářská práce
2017



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav inženýrství polymerů

akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Veronika Kuncová**
Osobní číslo: **T14362**
Studijní program: **B2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Polymerní materiály a technologie**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Nanovláknenné vzduchové filtry**

Zásady pro vypracování:

V poslední době začínají být tradiční vzduchové filtry na bázi aktivního uhlí či skla nahrazovány polymerními nanovláknennými filtry vyrobenými pomocí elektrostatického zvlákňování. Mezi nesporné výhody těchto filtrů patří velký měrný povrch vláken, možnost využití jako nosiče aktivních látek, malé póry a malé množství použitého materiálu. Studentka se ve své práci zaměří na samotný proces filtrace a jeho hodnocení. Dále se bude věnovat materiálové základně použitelné pro výrobu nanovláknenných vzduchových filtrů a možným způsobům jejich testování.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Sambaer, Wannes. Applied Rheology for Characterization of Polymeric Nanofiber Based Filters. Zlín, 2012. Doctoral Thesis. Tomas Bata University in Zlín.

Sundarrajan S., a kol. Electrospun Nanofibres for Air Filtration Application. ICMAT, 2013, Singapore

Uyar T., a kol. Cyclodextrin Functionalized Poly(methylmethacrylate)(PMMA) Electrospun Nanofibres for Organic Vapors Waste Treatment. Journal of Membrane Science, 365, 2010, 409-417

Scholten E., a kol. Electrospun Polyurethane Fibres for Absorption of Volatile Organic Compounds from Air. Applied Materials and Interface, 3, 2011, 3902-3909

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martina Polášková, Ph.D.**

Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2017**

Ve Zlíně dne 1. března 2017



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan



doc. Ing. Tomáš Sedláček, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: VERONIKA KUNICOVA

Obor: TMT

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17. 5. 2017

..... Kunícová

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasažuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užíje-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlíží k větší výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá nanovláknými vzduchovými filtry vyrobené elektrostatickým zvlákňováním. V práci je nezbytné popsat samotný proces filtrace, filtrační vlastnosti a jakými mechanismy může filtrace probíhat. V dalších kapitolách se práce zaměřuje na počátky vzniku nanovláken, na struktury, které mohou nanovlákná zaujímat, na proces elektrostatického zvlákňování a na materiálovou základnu nanovlákných vzduchových filtrů. Poslední část je věnována dělení filtrů, a to podle tvaru a tříd filtrace. Je třeba také zmínit použití filtrů a testování jejich vlastností.

Klíčová slova: nanovláknó, elektrostatické zvlákňování, vzduchový filtr, filtrace

ABSTRACT

This bachelor thesis is dedicated to the nanofibrous air filters prepared by electrospinning process. In the thesis very beginning to describe the filtration process, filtration properties and what mechanisms the filtration may have. Following chapters involve origins of nanofibers, the structure of nanofibers, the electrospinning process and material portfolio for nanofibrous air filters production is presented. The last part discusses filter division according to their shape and filtration class. It is also necessary to mention usage filters and testing of filtration properties.

Keywords: nanofiber, electrospinning process, air filter, filtration

Poděkování

Ráda bych poděkovala Ing. Martině Poláškové, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a podněty v průběhu zpracování této bakalářské práce. Děkuji i celé mé rodině za velkou podporu a trpělivost během mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
1 FILTRACE	11
1.1 PROCES FILTRACE.....	11
1.2 MECHANISMUS FILTRACE.....	11
1.2.1 Mechanismus zachycení.....	11
1.2.2 Mechanismus setrvačné srážky	12
1.2.3 Mechanismus difúze.....	13
1.2.4 Mechanismus síta	13
1.2.5 Mechanismus elektrostatického pole	14
1.3 FILTRAČNÍ VLASTNOSTI.....	14
2 NANOVLÁKNA	16
2.1 POČÁTKY NANOTECHNOLOGIE	17
2.2 VLASTNOSTI NANOVLÁKEN.....	18
2.2.1 Vliv velikosti vláken na měrný povrch	18
3 VÝROBA NANOVLÁKEN	22
3.1 ELEKTROSTATICKÉ ZVLÁKŇOVÁNÍ.....	22
3.1.1 Historie elektrostatického zvlákňování	22
3.1.2 Princip elektrostatického zvlákňování	23
3.2 METODA NANOSPIDER	24
4 MATERIÁLY NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ PRO NANOVLÁKENNÉ VZDUCHOVÉ FILTRY	26
5 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TVARU	29
5.1.1 Ploché filtry	29
5.1.2 Skládané filtry	30
5.1.3 Kapsové filtry.....	30
5.1.4 Patronové filtry.....	31
5.1.5 Hadicové filtry	31
6 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TŘÍDY FILTRACE A JEJICH POUŽITÍ	33
6.1 FILTRY PRO BĚŽNÉ VĚTRÁNÍ.....	33
6.1.1 Filtry na hrubý prach	34
6.1.2 Filtry střední filtrace.....	34
6.1.3 Filtry pro jemný prach.....	34
6.2 VYSOCE ÚČINNÉ FILTRY	34
6.2.1 Filtry EPA (Efficient Particulate Air filtr – efektivní vzduchový filtr)	35
6.2.2 Filtry HEPA (High Efficient Particulate Air filter – velmi účinný vzduchový filtr).....	35
6.2.3 Filtry ULPA (Ultra Low Penetration Air filter – vzduchový filtr s velmi nízkou penetrací).....	36
7 TESTOVÁNÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ	37
ZÁVĚR	39

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	40
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	46
SEZNAM TABULEK.....	47

ÚVOD

Rozvoj průmyslu, nárůst dopravy, topení v domácnostech nekvalitními palivy jsou vlivy, které způsobily, že se kvalita ovzduší začala velmi rychle zhoršovat. Škodlivé látky z ovzduší, dostávající se do nitra lidského těla, způsobují řadu onemocnění, v horším případě i smrt. Jelikož neustále roste význam ochrany životního prostředí a tím i potřeba odstranění zplodin, bylo nutné najít vhodnou alternativu.

Nejdříve se začaly používat vzduchové filtry na bázi aktivního uhlí nebo skla. V současné době začínají být nahrazovány polymerními nanovláknými filtry. Filtry jsou vyráběny metodou zvanou elektrostatické zvlákňování. Tato metoda především snižuje pořizovací a provozní náklady. Výhodou nanovláken je zajištění vysoké prodyšnosti, vysoký měrný povrch nebo možnost mísení s různými aditivami za účelem zvýšení efektivity filtru. Vzduchové filtry jsou určeny jednak k zachytu tuhých znečišťujících látek ze vzduchu, ale také k čištění vzduchu od plynných znečišťujících látek.

V neposlední řadě, aby mohly být filtry vůbec použity, musí projít testováním. Zkoušky se provádí podle daných norem. Filtry se testují na odolnost proti přetržení, na pevnost filtračního materiálu a odolnost proti hoření.

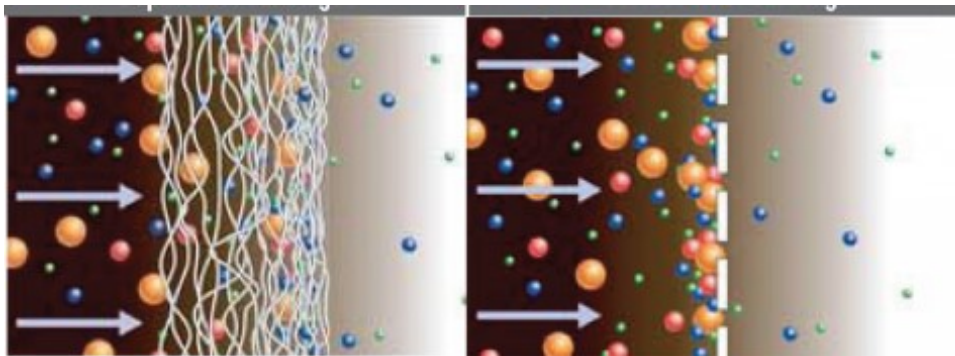
1 FILTRACE

1.1 Proces filtrace

Proces filtrace vzduchu je složitý systém jevů, které působí v prostoru filtračního zařízení, za podpory odstranění částic z plynu a následnému usazení na povrchu kolektoru. Princip filtrace vzduchu spočívá ve vyčištění vzduchu od nečistot ve formě pevných částic. [1]

1.2 Mechanismus filtrace

Mechanismus filtrace spočívá v separaci částic z proudu tekutiny a zadržení na povrchu nebo mezi filtračními prvky (vlákny). Mechanismus filtrace lze rozdělit na filtrace hloubkovou nebo plošnou (Obr. 1). U plošné filtrace je filtrem zachycena každá větší částice než prostor mezi vlákny. U hloubkové filtrace je velikost zachytávaných částic menší, než je velikost prostoru mezi vlákny. U této filtrace se může uplatnit více mechanismů najednou. U hloubkové filtrace nejvíce převládají mechanismy zachycení, setrvačné srážky, difúze, síťový mechanismus a mechanismus elektrostatického působení. [2], [3]



(a)

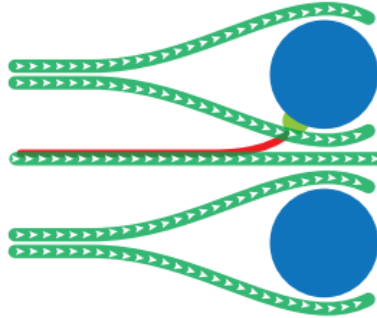
(b)

Obr. 1: Rozdíl mezi hloubkovou (a) a plošnou filtrací (b) [28]

1.2.1 Mechanismus zachycení

K zachycení dochází, když se částice prachu zachytí s filtračním prvkem, který se pohybuje ve směru proudu, a tedy bez vlivu mechanismu setrvačnosti (Obr. 2). Tento mechanismus

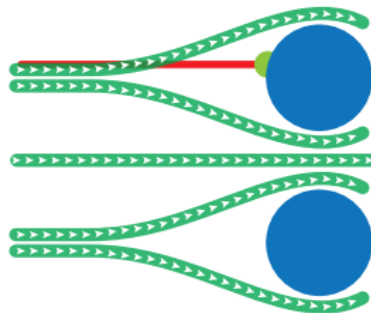
může nastat u malých částic s nepříliš vysokou hustotou, pohybujících se nižší rychlostí. Účinnost zachycení zrn se zvýší zvětšováním rozměrů částic.



Obr. 2: Mechanismus zachycení částice s filtračním prvkem [4]

1.2.2 Mechanismus setrvačné srážky

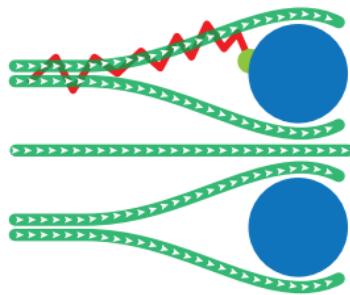
Tento mechanismus se vyskytuje při vysokých rychlostech proudu a u částic s velkými rozměry. Částice s větší hmotností a průměrem opouštějí dráhu proudu a dostávají se k povrchu filtračního prvku přes vrstvu u stěny (Obr. 3).



Obr. 3: Mechanismus setrvačné srážky [4]

1.2.3 Mechanismus difúze

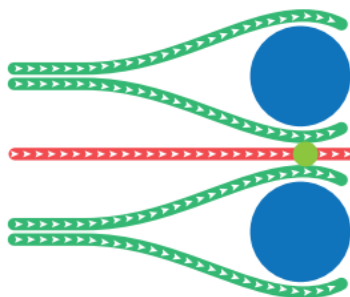
V mechanismu difúze, zrna podléhají v daleko větší míře zákonům kinetiky plynů. Částice plynu jsou v neustálém pohybu, které narážejí do zrn a uvádějí je do pohybu, tzv. Brownův pohyb. Dráha pohybu zrn přemísťující se spolu s proudem plynu, výrazně odbíhá od dráhy obtékání filtračního prvku. Srážky částic plynu s částicemi prachu, způsobí vyloučení nejmenších zrn prachu k filtračním prvkům (Obr. 4).



Obr. 4: Mechanismus difúze [4]

1.2.4 Mechanismus síta

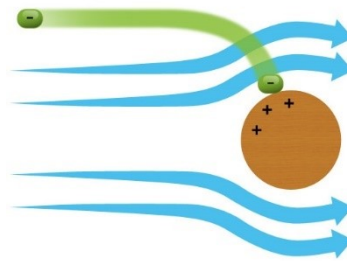
Tento mechanismus je pouze pro částice, jejichž průměr je větší než průřez mezi vlákny (Obr.5).



Obr. 5: Mechanismus síta [4]

1.2.5 Mechanismus elektrostatického pole

Elektrostatické síly mohou mít vliv na charakter pohybu částic a také na pravděpodobnost srážky. Díky náboji jsou částice s vlákny k sobě přitahovány. Malé částice jsou nejdříve zadržovány vlákny, které poté vytvoří jádro pro postupné připojení více částic, za vytvoření směsi výběžků na vláknech. Při postupném připojování částic, dochází k vytvoření kolonií, které se přichytí na filtr, sníží se rozestupy mezi vlákny, zmenší se velikost dutin ve filtru a tím se zvýší účinnost filtrace na filtračním médiu (Obr .6). [3], [4], [5]



Obr. 6: Mechanismus elektrostatického pole [4]

1.3 Filtrační vlastnosti

Kinetika filtrace je důležitý faktor související s vlastnostmi, které se v průběhu filtrace mění v důsledku zaplňování mezivlákněných prostor částicemi. Mezi hlavní filtrační vlastnosti se řadí:

Efektivita (odlučivost)

- Je dána vztahem:
$$E = 1 - \left(\frac{G_1}{G_2}\right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

G_1 ... množství disperzního podílu za filtrem

G_2 ... celkové množství disperzního podílu

Hodnota efektivity se v průběhu filtrace mění, jelikož částice zachycené na povrchu vlákna, se samy stávají filtrem a zvyšují efektivitu filtru.

Tlakový spád (tlaková ztráta)

- Je dán vztahem: $\Delta p = p_1 - p_2$ (2)

p_1 a p_2 ... tlaky filtrovaného média před a za filtrem

Hodnota tlakového spádu se v průběhu filtrace mění, kvůli zachyceným částicím v mezivlákněných prostorech.

Životnost filtru

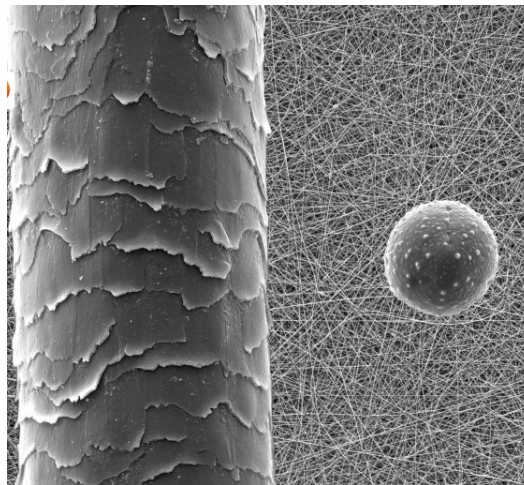
Podle životnosti můžeme rozlišit filtry jednorázové, jejichž životnost ovlivňuje množství částic, které je schopen filtr pojmout až do chvíle, kdy je ztráta vysoká. Dalšími jsou filtry s čistěním, kdy jejich životnost závisí na délce čistění a počtu čistění, do doby snižování kvality filtru.

Na filtr působí i vnější vlivy, a to jednak mechanické, chemické, či teplota a kombinace uvedených vlivů.

S kvalitou filtru souvisí další vlastnosti jako je prodyšnost, která vyjadřuje schopnost porézního materiálu transportovat dané množství disperzního prostředí konkrétním průřezem. Porozita vyjadřuje procento objemu nezaplněného vlákněného materiálu. Filtr musí být také odolný vůči bakteriím, které zachytí. Bakterie jsou stále aktivní a postupem času mohou prorůstat filtrem a následně se uvolnit do prostoru. Proto se musí řešit nejen záchyt, ale i zneškodnění bakterií. [2], [5]

2 NANOVLÁKNA

V současné době jsou nanovlákná jedním z revolučních materiálů. Materiály menších rozměrů než jeden mikrometr přinášejí zajímavé možnosti aplikací a vlastností materiálů, které obsahují. Často se vymykají zkušenostem s běžnými materiály (Obr. 7). [6] Poskytují výrazně zvýšenou účinnost filtrace při relativně malé propustnosti. Z mnoha laboratorních testů a z běžného provozu bylo zjištěno, že nanovláknenná filtrační média prokazatelně zlepšila životnost filtru. [7]

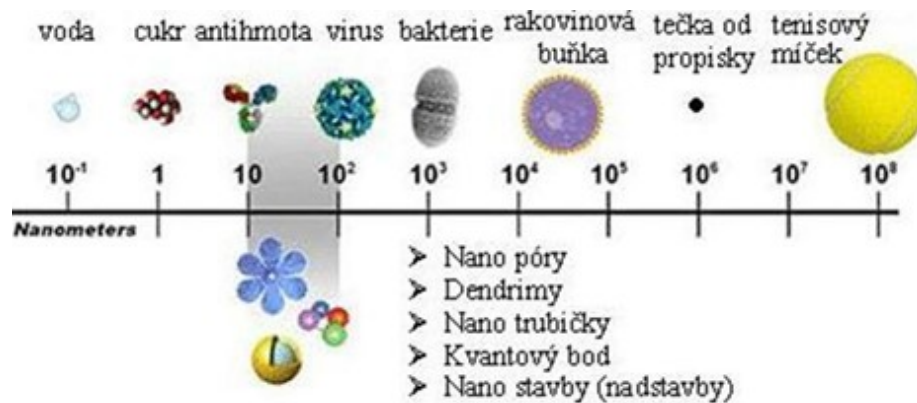


Obr.7: Srovnání lidského vlasu, pylového zrna a nanovlákn [45]

Předpona nano pochází z řeckého slova nanos, což znamená trpaslík. Nanotechnologie je věda zaměřená na výzkum a vývoj technologií na atomární, molekulární a makromolekulární úrovni pohybující se v intervalu 1 nm až 100 nm, tzv. nanomateriály. (Obr. 8)

Tyto struktury využívající fyzikálních, chemických nebo biologických vlastností na úrovni atomů a molekul mají neobvyklé charakteristiky v porovnání se stejným materiálem, který nemá složky s nanorozměry. Mohou se kombinovat tak, že vytvářejí makrostruktury. [8]

Nanotechnologie umožňují vytvářet a používat konstrukce, zařízení a systémy, které mají jiné vlastnosti a funkce z důvodu malé nebo střední velikosti. Významnost výroby nanovláken spočívá v jejich výborných optických, magnetických, elektrických a tepelných vlastnostech. [9]



Obr. 8: Poměr velikostí různých struktur [10]

2.1 Počátky nanotechnologie

První počátky nanotechnologie pochází z římského období. Nelze předpokládat, že by v této době něco tušily o podstatě nanotechnologií, tak jak ji chápeme v současnosti. Za nejstarší dochované ukázky se uvádějí Lykurgovy poháry a glazovaná keramika. Lykurgovy poháry jsou pojmenovány podle mytologického thráckého krále Lykurga, který je zobrazen na vlysu na pohárech. Poháry jsou příkladem tzv. dichroického skla, které mění barvu v závislosti na umístění světelného zdroje. Při denním světle jsou poháry zelené. Pokud je světelný zdroj vložen do poháru, mění barvu na červenou. Bylo zjištěno, že světelnou záhadu pohárů způsobují nanočástice ze slitiny zlata a stříbra. Avšak u glazované keramiky je lesk vyvolán dekorativním kovovým filmem o tloušťce 200 – 500 nm. Kovový film obsahuje stříbrné a měděné nanokrystalky rozptýlené v matrici bohaté na sloučeniny křemíku. [11]

Jak již bylo zmíněno výše, lidstvo využívá nanotechnologii velmi dlouhou dobu. Vzhledem k tomu, že tato věda nebyla v minulosti hlouběji zkoumána, jednalo se spíše o poznatky. Věda se nanotechnologií cíleně začala zabývat až v 19. a následně ve 20. století. V 19. století anglický chemik Thomas Graham jako první popsal suspenzi obsahující částice o rozměrech 1 – 100 nm, nazývanou koloidním systémem. K rozvoji nových metod umožňující přípravu koloidů (částice v rozsahu 1 – 100 nm) a využití nových přístrojů (transmisní mikroskop) došlo ve 20. století. Tyto poznatky vedly k založení nové vědní disciplíny nazývané koloidní chemie. [12], [13]

Rozkvět nanotechnologií přichází v roce 1959. Za průkopníka této vědní disciplíny je považován americký fyzik a nositel Nobelovy ceny Richard Feynman. Svou vizi nanosvětla představil na zasedání Americké fyzikální společnosti na Kalifornské technologické univerzitě. Na své přednášce sice nepoužil termín nanotechnologie, ale velikosti objektů, se kterými teoreticky pracoval, odpovídaly dnešním nanočásticím.

Od roku 1960 dochází k postupnému vývoji metod tvorby nanočástic. Zásadní zlom v rozvoji nanotechnologií přinesl objev mikroskopových metod Skenovacího (rastrovacího) tunelovacího mikroskopu (STM) a Mikroskopu atomových sil (AFM). Umožňují sledovat a měřit děje, až na úrovni jednotlivých atomů. Brzy se vývoj nanotechnologií rozšířil do lidských činností a vznikly nové vědní obory (nano - medicína, optika, biotechnologie, elektronika) [8], [11], [14]

2.2 Vlastnosti nanovláken

Vlastnosti nanovláken zlepšují materiál z hlediska pevnosti, elektrické a optické kvality, reaktivity a propustnosti vrstvy. Proto mají velký potenciál využití v mnoha oblastech, např.: vzduchové filtraci, v péči o zdraví, při ochraně životního prostředí. Základní charakteristikou nanovláken je vysoký měrný povrch, který se využívá jako nosič aktivních látek. Čím je povrch filtračního materiálu větší, tím se zvyšuje interakce mezi tímto povrchem a zachycenými částicemi. Další vlastností je malá velikost pórů, zajišťující výborné bariérové vlastnosti. Malým množstvím potřebného materiálu se snižují nároky na objem filtru. Vysoká pórovitost vlákenné vrstvy zajišťuje dobrou prodyšnost. [15], [16]

2.2.1 Vliv velikosti vláken na měrný povrch

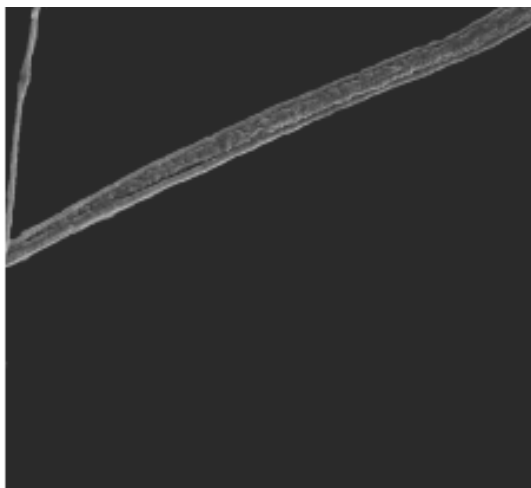
Měrný povrch je z hlediska filtrace velmi důležitý. Na základě interakce mezi částicemi a povrchem vláken jsou částice zachytávány. Malá vlákna ve srovnání s většími vlákny zajistí lepší filtrační efektivitu při stejném poklesu tlaku v zachycení nežádoucích látek. Vysoký měrný povrch nanovláken zajišťuje schopnost pro upevnění nebo uvolnění funkčních skupin, absorbovaných molekul a iontů katalytických zbytků v měřítku nanometrů. Jednou z nejvýznamnějších charakteristik nanovláken je vysoký podíl plochy na jednotku hmotnosti. Vysoký měrný povrch vláken vede ke zvýšení tlakového spádu vlákenného systému, protože filtrované médium se chová jako viskózní kapalina a je tudíž povrchem obtékaných vláken bržděno. Tlakový spád neboli tlaková ztráta vyjadřuje odpor vůči toku vzduchu skrz filtr. Je třeba také uvést rychlost toku vzduchu těsně před filtrem, protože s jejím růstem

roste i tlakový spád. V průběhu procesu filtrace se hodnota tlakového spádu mění kvůli zaplňování mezivlákněných prostor zachycenými částicemi. [3], [15], [7]

Nanovláknna se v praxi téměř nikdy nevyskytují samostatně, ale jsou uspořádána do vyšších strukturních a prostorových celků, se kterými je pak dále možné manipulovat.

Lineární nanovláknno – nitě, příze

Vláknna, která mají velmi dobré mechanické vlastnosti (Obr. 9), používají se pro lehké neprůstřelné vesty, vysokopevnostní nosná vlákna. Za nanovlákněné nitě nelze považovat útvary, které jsou vyrobeny na bázi běžných nití s povrchovým nánosem nanovláken. Takové vlákna se řadí mezi plošné nanovláknité struktury.



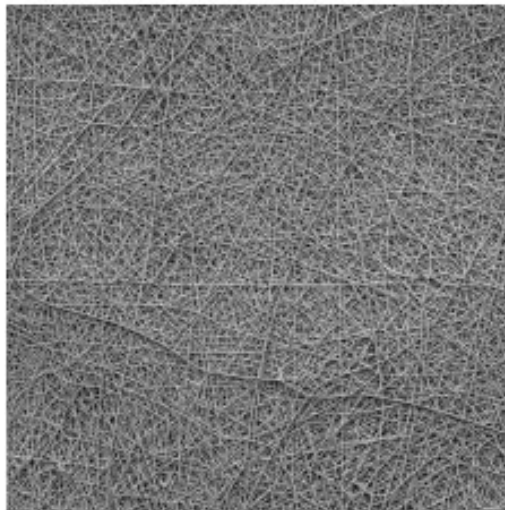
Obr. 9: Nanovlákněná nit' z polyakrylonitrilo-akrylátového kopolymeru vyrobená metodou elektrostatického zvlákňování

[17]

Nanovláknno v plošných strukturách – vrstvy

Mohou se vyskytovat dva základní typy nanovlákněných vrstev a to tzv. netkané textilní útvary a tkané textilní útvary. Společným znakem obou útvarů je polohování nanovláken přes sebe. Ze strukturního hlediska se významně liší. U netkaných útvarů jsou vlákna nahodile rozházena přes sebe (Obr. 10). U tkaných útvarů jsou vlákna organizována do vyššího uspořádání, tak jak je tomu u běžných tkaných tex-

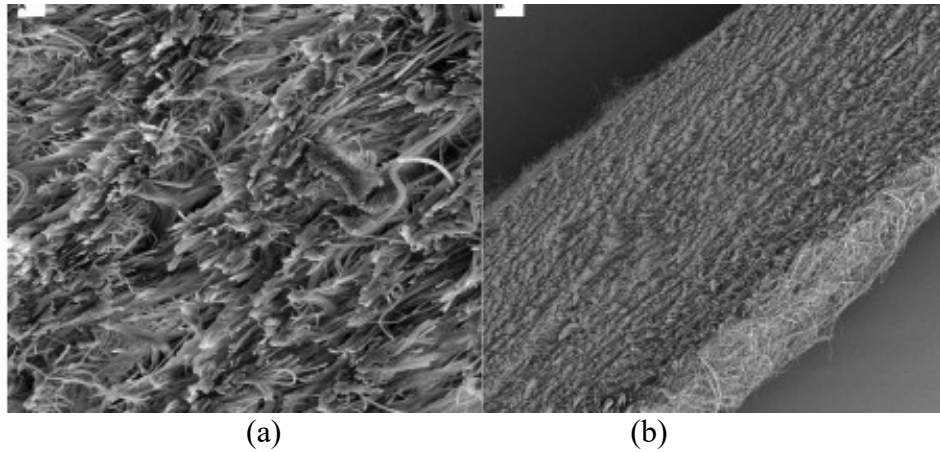
tilií. Výroba tkaných textilií z jednotlivých nanovláken je v současné době technologicky nereálná. Naopak netkané nanovláčenné struktury jsou snadno připravené. Využívají se zejména ve filtracích a v elektrotechnice.



Obr. 10: Nanovláčenná vrstva z polyurethanu vyrobená metodou elektrostatického zvláčňování [17]

Nanovláčeno v objemových strukturách – objemné útvary, vaty

Struktury nanovláken, které se značně podobají předcházející formě, plnohodnotně vystupují do třetího rozměru. Lze také očekávat celky s uspořádanými a neuspořádanými vlákny. Uspořádaná vlákna nejsou běžná, častější jsou vlákna nahodile uspořádaná (Obr.11). Tvar připomíná objemnou vatu. Materiály se uplatňují při separaci, chemické analýze nebo v tkáčovém inženýrství.



*Obr. 11: Nanovláknenný objemný útvar z polystyrenu: a) detail struktury
b) celkový pohled [17]*

Nanovláknno v dalších formách

Nanovláknna se vyskytují ve formě povrchového nánosu, kdy jsou jednotlivá vlákna namačkána těsně na sebe a jsou kolmá k podkladu. Dalším příkladem je vlákno roztroušeno v matrici (keramika, plast). [17]

3 VÝROBA NANOVLÁKEN

Nanovláknna mohou být připravena různými způsoby. Patří mezi ně například technologie meltblown (tavenina je rozfukována horkým vzduchem) a elektrostatické zvlákňování nebo-li elektrospinning, kterým se daná práce dále zabývá. V současnosti se pro výrobu nanovláken nejčastěji používá metoda elektrostatického zvlákňování a jeho modifikovaná metoda Nanospider. Pomocí těchto technologií se vyrábějí nanovláknna na bázi anorganických, organických nebo biogenních látek. [18]

3.1 Elektrostatické zvlákňování

Přechod z makroskopických vláken na vlákna s průměry v rozsahu nanometrů vedlo k vytvoření nových funkcí a aplikací. Taková vlákna začala být vyráběna pomocí elektrostatického zvlákňování. Tento proces není založen na mechanické síle jako běžné technické postupy (vytlačování, vyfukování), ale hnací silou procesu je elektrostatické pole. [19]

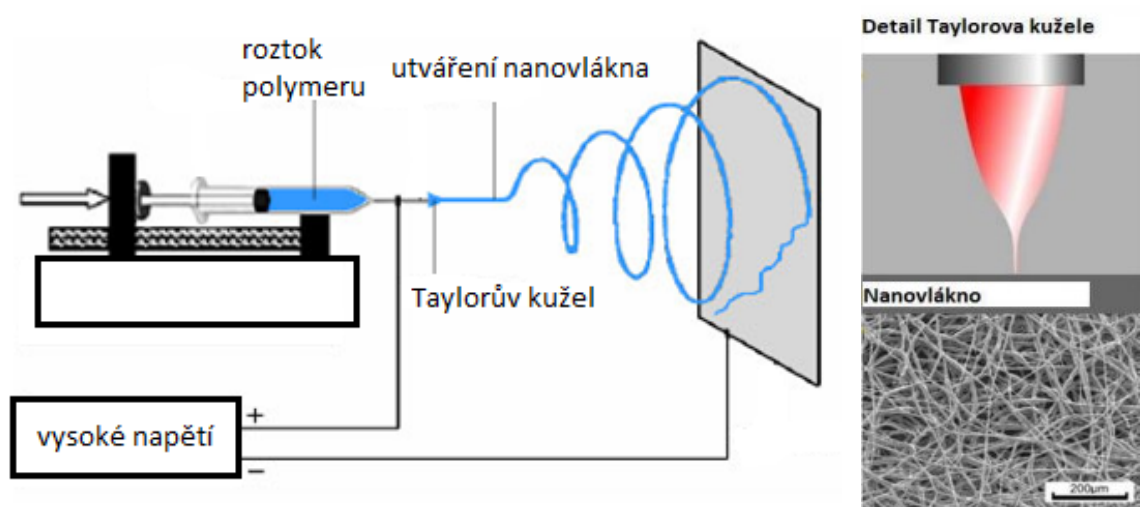
3.1.1 Historie elektrostatického zvlákňování

O elektrostatické zvlákňování se poprvé zajímal v roce 1897 lord Rayleigh. V roce 1934 Antonín Formhal patentoval metodu elektrospinningu. V tomto patentu popsal metodu elektrostatického zvlákňování roztoku acetátu celulózy a také experimentální zařízení pro produkci syntetických vláken. Aceton využíval jako rozpouštědlo ke zvlákňování. Nedostatek této metody spočíval v tom, že nebylo možné získat vlákno zbavené zbytků rozpouštědla. V dalších patentech se Formhal zaměřil na to, aby eliminoval tento nedostatek. Vylepšil metodu tím, že zvětšil vzdálenost mezi jehlou a sběrným zařízením. Tím tak prodloužil dobu potřebnou pro sušení vznikajících vláken. V roce 1969 studoval Taylor tvar kapky polymeru, tvořící se na špičce jehly. Závěr byl takový, že aplikací elektrického pole na kapku polymeru, získává kapka tvar kužele, z jehož vrcholu dochází k vymrštění vlákna polymeru (v angličtině “polymer jet“). Kónický tvar kapky byl později nazván po svém objeviteli „Taylorův kužel“. V následujících letech se vědci zaměřovali na charakteristiku vláken nebo na vztah mezi jejich strukturou a provozními parametry. V současné době se věda snaží optimalizovat proces zvlákňování a určit nejvýhodnější zvlákňovací parametry. [19], [20], [21], [22]

3.1.2 Princip elektrostatického zvlákňování

Zvlákňování může probíhat několika způsoby, mezi které patří zvlákňování z jehly (Needle electrospinning), zvlákňování z volného povrchu (z tyčky, ze struny, z válečku). Zařízení pro elektrostatické zvlákňování se skládá ze 3 základních komponentů, a to zdroj vysokého napětí, zvlákňovací tryska a kolektor.

Roztok polymeru prochází konstantní rychlostí injekční jehlou, která slouží k vytvoření elektrického náboje. Na hrotu jehly se vytvoří kapka polymeru, která je držena pohromadě pomocí povrchového napětí. Pokud je hodnota elektrického pole nízká, nedochází k odkapávání kapky z hrotu jehly. Jestliže se elektrické pole zvýší, v roztoku je náboj indukován na povrch kapaliny a dochází k vzájemnému odpuzování souhlasně nabitých molekul a vytvoření smykového napětí. V opačném směru k povrchovému napětí působí odpudivé síly a tím začíná samotný proces zvlákňování. Kapka je prodloužena na hrotu jehly do tvaru Taylorova kužele. Po dosažení elektrického pole tzv. kritické hodnoty (odpudivé síly převyší velikost povrchového napětí) jsou nabitá vlákna vymrštěna z hrotu Taylorova kužele směrem k protější elektrodě (kolektor). Zároveň se při této cestě odpařuje rozpouštědlo. Mezi stejně nabitými částicemi vláknenného útvaru působí odpudivé síly, které jsou daleko větší než síly mezi makromolekulami. Poněvadž jsou makromolekuly orientovány ve směru vláknenného útvaru, dochází ke štěpení na jednotlivá jemná vlákna. Díky stejnému náboji všech vláken v elektrostatickém poli dochází k vrstvení na místo s nejmenším množstvím vláknenné hmoty. Tím se také zajišťuje vysoká plošná rovnoměrnost (Obr. 12). [21], [23], [24]



Obr. 12: Postup elektrostatického zvlákňování, detail Taylorova kužele [21]

Konečná morfologie nanovláknů je ovlivněna celou řadou parametrů. Například průměrem zvláknovací trysky, vzdáleností mezi zvláknovací a sběrnou elektrodou, rychlostí podávaného zvláknovaného roztoku nebo taveniny, elektrickou vodivostí, intenzitou aplikovaného elektrického pole a elektrickým proudem procesu. Tyto procesy se řadí mezi parametry procesní.

Další parametry jsou okolní, do kterých patří relativní vlhkost vzduchu a teplota vzduchu.

Poslední jsou systémové parametry, do kterých jsou zahrnuty vlastnosti zvláknovaného materiálu, jako je molekulová hmotnost polymeru, viskozita, hustota, teplota zvláknování, povrchové napětí, rychlost odpařování rozpouštědla u roztoků, rychlost tuhnutí polymerní taveniny, větvení polymeru (lineární, rozvětvený), přídavek aditiv. [25]

Při elektrostatickém zvláknování se používají organické polymery (např.: silon, nylon, řadící se do skupiny polyamidů; polyetylen, polypropylen patřící do skupiny polyolefinů; polystyren, akryláty a další). Výhodou elektrospinningu je jeho univerzálnost, kdy kromě organických polymerů mohou být použity i biopolymery (např.: kolagen, chitin, chitosan, celuloza, kyselina hyaluronová) nebo anorganické látky (např.: TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , ZnO , $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, ZrO_2 , MgAl_2O_4). Anorganická nanovláknů vznikají přidáním anorganického plniva k roztoku polymeru. Elektrostatickým zvláknováním vzniká vláknenný kompozit složený z polymerní matrice a ideálně rozmístěné anorganické fáze. I s velmi malým obsahem anorganického plniva dojde ke zlepšení mechanických vlastností (tuhost, pevnost). Může nastat i taková situace, kdy je polymerní matrice odstraněna a zůstanou jen anorganická nanovláknů. V tomto případě může být polymerní matricí polyvinylacetát nebo polyvinylpyrolidon. [24], [26], [27]

3.2 Metoda Nanospider

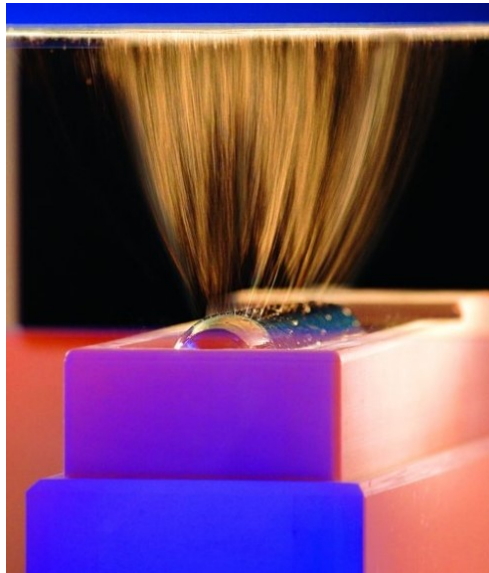
Technologie Nanospider je modifikovaná metoda elektrostatického zvláknování. U technologie Nanospider dochází ke zvláknování z celé tenké vrstvy roztoku polymeru. Metoda je schopna vyrobit nanovláknenný materiál bez použití zvláknovacích trysek. Dokáže se snadno přizpůsobit výrobním parametrům. [28]

Technologie Nanospider využívá válec, který je částečně ponořený v roztoku polymeru. Válec se otáčí a na jeho povrchu se tvoří tenký film polymeru. Díky intenzitě elektrického pole se začne vytvářet mnoho ohnisek Taylorových kuželů, které dál pokračují v procesu zvláknování. Následně jsou proudy roztoku polymeru zbaveny rozpouštědla a vznikají pevná

nanovlákna. Výhodou je vysoká stabilita zvlákňovacího procesu. Čím se počet Taylorových kuželů zvyšuje, tím je vyšší produktivita a konzistence nanovrstev.

Jedinečnost technologie tkví ve výrobě nanovláken pomocí přesného nastavení celé řady výrobních parametrů, které jsou rozhodující pro konečný výrobek. Jsou to parametry roztoku (vodivost, teplota), okolního prostředí (vlhkost), zařízení (vzdálenost elektrod), základní parametry materiálu (povrchový elektrický odpor). [29]

Technologie nanospider je jedinečná pro svou rovnoměrnost průměru vláken a nanosené nanovláknenné vrstvy, pro snadnou údržbu, vysokou výrobní kapacitu a pro používání mnoha různých polymerů a podkladových materiálů. [30]



Obr. 13: Výroba nanovláken pomocí technologie Nanospider [30]

4 MATERIÁLY NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ PRO NANOVLÁKENNÉ VZDUCHOVÉ FILTRY

Než začne samotný proces zvlákňování, je třeba připravit roztok polymeru. Nejdříve je vybrán polymer ve formě granulátu nebo prášku a v dalším kroku se rozpustí v příslušném rozpouštědle. Výběr vhodného rozpouštědla ovlivňuje proces elektrostatického zvlákňování, ale i morfologii vznikajících vláken. Důležitou roli hraje také těkavost rozpouštědla. U velmi těkavých rozpouštědel (aceton, chloroform), dochází k rychlému vypařování rozpouštědla a tím vznikají nanopóry na povrchu vlákna. Naopak část rozpouštědel, které setrvají uvnitř vlákna, mají za následek to, že výsledná vlákna jsou zploštělá, protože při nárazu na kolektor se deformují. Pro zlepšení vlastností a dosažení vyšší efektivity nanovláken, mohou být k danému roztoku polymeru přidány aditivní sloučeniny. Nanovláknem může být při zvlákňování přímo nanášeno na nosnou podložku (textilie, keramika, kov) a je použito pro další účely. Nanovláknem je také možno z podložky sejmout a využívat jen samotnou nanovláknennou membránu. [27]

Materiálů pro výrobu nanovláknenných vzduchových filtrů je celá řada. Mezi nejčastěji používané se řadí polyetylen, polypropylen, polyuretan, polymetylmakrylát, polyester. K některým polymerům je možné přidat i aditivní látky, které zvyšují efektivitu filtru, jak již bylo zmíněno výše.

Polyetylenová vlákna

Polyetylen je termoplast, který se řadí do skupiny olefinů. Polyetylen je nepolární, který má výborné elektroizolační vlastnosti. Vzhledem k jeho nepolárnosti odolává za běžných podmínek polárním rozpouštědlům, vodě, kyselinám, zásadám a solím.

Polyetylenová vlákna se používají jako předfiltry pro vysoce účinné filtry. [31]

Polyuretanová vlákna

Elektricky zvlákněná polyuretanová vlákna slouží k odstraňování těkavých organických látek ze vzduchu. Polyuretany jsou na bázi 4,4 – metylenbis(fenylenisokyanátu) a alifatických isoforondiisokyanátu jako tvrdé segmenty a butandiolu a tetrametylglykolu jako měkké segmenty.

I když aktivní uhlí má mnohonásobně vyšší povrchovou plochu než polyuretanová vlákna, tak bylo zjištěno, že polyuretanová vlákna mohou být navržena pro adsorpci par. Na rozdíl od sorpcí organicky těkavých látek na aktivním uhlí, kde kompletní regenerace adsorbentu nebyla možná, polyuretanová vlákna jsou schopna zcela reverzibilní adsorpce a desorpce. Polyuretanová nanovlákna mají hladký, neporézní povrch a jsou vysoce odolná proti vlhkosti. [32]

Výše zmíněná vlákna se používají bez přídavku aditiv. Další vlákna, která stojí za zmínku se používají samostatně nebo s přídavkem aditivní látky.

Polypropylenová vlákna

Polypropylen je termoplast, který se řadí do skupiny olefinů. Nepolární plast a obdobně jako polyethylen bude odolávat polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím. Tato odolnost je však vyšší než u polyethylenu, zejména pak za vyšších teplot.

Polypropylenová vlákna se používají s přídavkem katechinu. Tyto nanovlákna nalezneme u filtrů určené pro čističky vzduchu v domácnostech. Katechiny patří mezi polyfenoly. Svým složením jsou velmi podobné flavonoidům, které jsou rozšířeny ve vyšších rostlinách. Jednotlivé molekuly katechinu se spojují, a dochází tak ke vzniku oligomerních a polymerních kondenzátů, z nichž velká většina je biologicky účinná zejména jako antioxidanty. [33]

Polymetylmetakrylátová vlákna

Nanovláknenné sítě z polymetylmetakrylátu s cyklodextriny byly testovány pro zachycení styrenových, toluenových a anilinových par. Tyto sítě byly uchovány s anilinem, styrenem nebo toluenem na 1 až 3 hodiny v exsikátoru. Poté byla odpařena všechna rozpouštědla absorbována na povrchu nanovláknenných sítí. [34]

Vzhledem ke svému chemickému složení mohou cyklodextriny tvořit inkluzní komplexy s různými molekulami. Tvorba a stabilita komplexů závisí na mnoha faktorech jako je například tvar, vazebné síly. Bylo zjištěno, že cyklodextriny a cyklodextrinové funkcionalizované materiály se mohou používat pro filtry, membrány pro separaci, čištění a filtrační účely, protože mají schopnost tvořit inkluzní komplexy s nebezpečnými chemickými a znečišťujícími látkami. [35], [34]

Polymethylmetakrylát je termoplast, který bobtná a rozpouští se v různých organických rozpouštědlech, ale i ve vlastním monomeru. Ve vlhkém prostředí nasává vodu v množství asi 2,5 objemových procent. Při polymeraci dochází ke značnému smrštění. Smrštění je podmíněné nižší hustotou výchozího monomeru ($0,935 \text{ g.cm}^{-3}$) ve srovnání s hustotou výsledného polymeru ($1,18 \text{ g.cm}^{-3}$).

Cyklodextriny jsou cyklické oligosacharidy tvořené glukosovými jednotkami spojenými α -(1 \rightarrow 4) glykosidickými vazbami. Cyklodextriny vznikají při enzymatické degradaci škrobu (amylosy) účinkem glykosyltransferáz bakteriálního původu (*Bacillus macerans*). Při tomto procesu vzniká směs lineárních a cyklických oligosacharidů obsahujících 6 až 100 glukosových jednotek. [35]

Polyesterová vlákna

Polyestery jsou velká skupina polymerů, jejichž společným znakem je esterová vazba (Obr. 9). Lze je klasifikovat na dva základní typy: termoplastické polyestery – lineární (polymery odvozené od kyseliny tereftalové a uhličitě), vyrábějí se z dvojsytných alkoholů a dikarboxylových kyselin, a polyestery reaktoplastické – rozvětvené (nenasyčené polyesterové pryskyřice), v konečném stádiu zpracování jsou zesíťované. [36]

Materiály mají extrémně nízké tlakové ztráty a vysokou hromaditelnost prachu. Vlákná se používají pro hrubé nečistoty (1. stupeň filtrace třídy G) nebo jako předfiltry. Používají se do klimatizačních a větracích jednotek nebo jako stropní filtry v lakovacích kabinách a stříkacích boxech. [33]

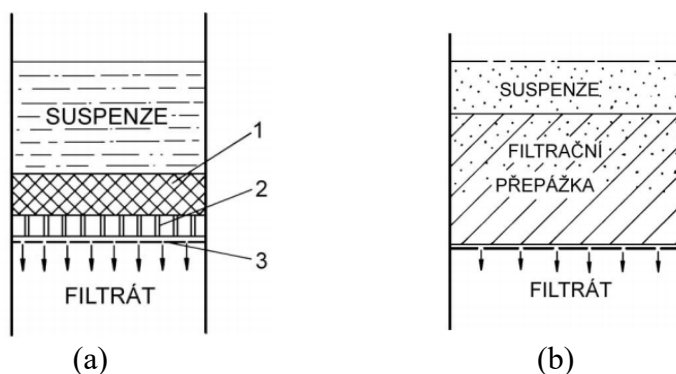
Existují také polyesterová vlákna s teflonovou membránou (PTFE), která zabraňují pronikání mechanických částic filtračním materiálem. Přídavkem teflonové membrány se zvyšuje účinnost a životnost filtru.

Další jsou polyesterová vlákna s teflonovou a antistatickou úpravou. Vyznačují se vysokou účinností a životností filtru. Využívají se do prostorů v potravinářském průmyslu, u slévání kovů, broušení, [33], [31]

5 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TVARU

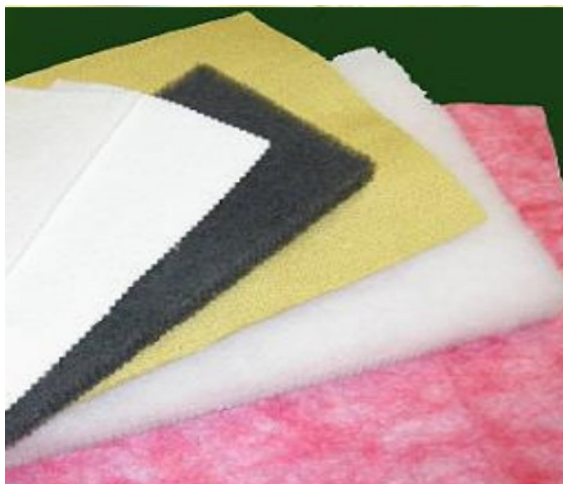
5.1.1 Ploché filtry

Z hlediska konstrukce a instalace se jedná o nejjednodušší typ, a navíc mohou mít i mřížku. Z hlediska mechanismu se ploché filtry dělí na filtry tenké, které jsou určeny pro povrchovou filtraci a na filtry objemné, určené pro objemnou filtraci (Obr 14). Jelikož jsou filtry levné, využívají se pro jednoduché aplikace, jako jsou hrubé předfiltry klimatizací a ventilačních systémů, digestoře, vysavače (Obr.15). [2]



1 – filtrační koláč, 2 – filtrační přepážka, 3 – nosná podložka

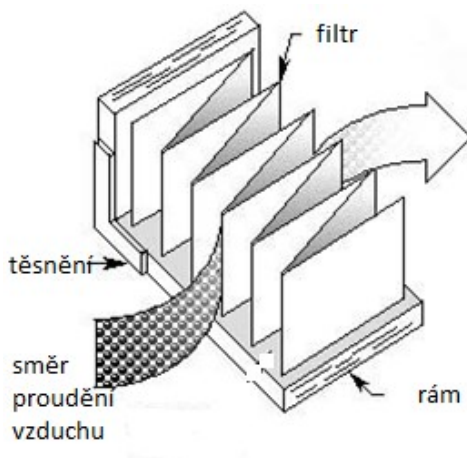
Obr.14: Schéma plochého filtru; (a) povrchový filtr, (b) hloubkový filtr [46]



Obr.15: Příklad plochého filtru [5]

5.1.2 Skládané filtry

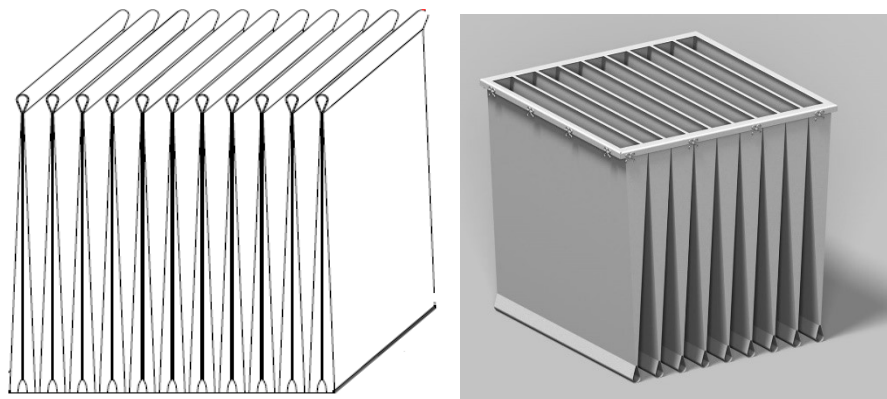
Skládané filtry jsou vhodné pro vysoce účinné filtry. Skládání vede k zmenšení tlakového spádu a mírnému zvýšení efektivity filtrace (Obr. 16). U těchto filtrů je potřeba používat materiály s vyšší tuhostí. Jejich použití je u kabinových filtrů, HEPA filtrů, atd. [5]



Obr. 16: Schéma skládaného filtru [47]

5.1.3 Kapsové filtry

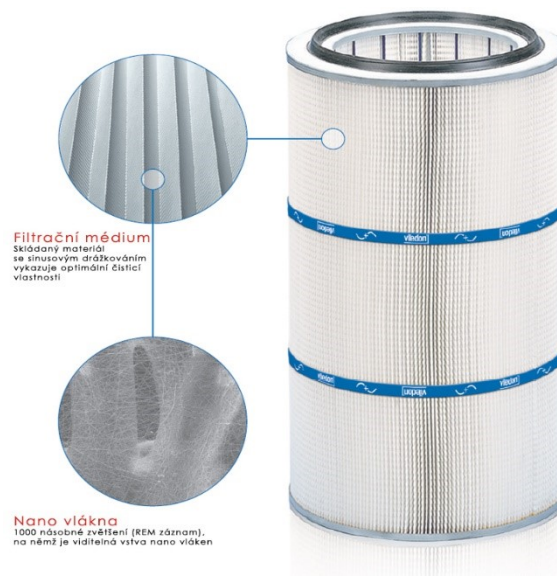
Princip je podobný jako skládaných filtrů (Obr.17). Pro kapsové filtry se používají materiály, ze kterých nejdu vyrobít skládané filtry. Nevýhodou jsou jejich velké rozměry. Kapsové filtry se mohou kombinovat se skládanými filtry. Používají se do klimatizací. [5], [2]



Obr.17: Schéma a ukázka kapsového filtru [48]

5.1.4 Patronové filtry

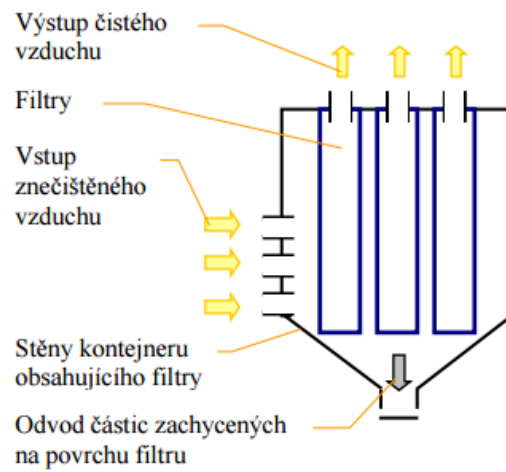
Patronové filtry mohou tvořit zase filtry skládané nebo ploché, které jsou obtočeny kolem perforované dutiny (Obr. 18). Tyto dutiny mohou být jednorázové nebo čistitelné tlakem. Výhodou je jejich filtrační plocha, což je zejména výhodné pro kapalinovou filtraci. Využívá se do kabinových filtrů, vzduchových filtrů motorů. [37]



Obr. 18: Schéma a ukázka patronového filtru [49]

5.1.5 Hadicové filtry

Fungování hadicových filtrů je na podobném principu jako u filtrů patronových. Jsou určeny spíše pro průmyslovou filtraci, neboť jejich délka může dosahovat několika metrů (Obr. 19). Filtr je téměř vždy čistitelný zpětným pulzem. Z důvodu převážného využívání v průmyslu jsou kladeny vysoké nároky na odolnost vůči mechanickému, termickému a chemickému namáhání. Používají se především ve spalovnách, cementárnách, elektrárnách. [5]



Obr. 19: Schéma hadicového filtru [5]

6 DĚLENÍ FILTRŮ PODLE TŘÍDY FILTRACE A JEJICH POUŽITÍ

Podle současné normy ČSN se vzduchové filtry dělí na filtry pro běžné větrání, které se zkouší a třídí podle normy ČSN EN 779 a na filtry s vysokou účinností, které se zkouší a třídí podle normy ČSN EN 1822. [38]

6.1 Filtry pro běžné větrání

Zkouška na zařazení filtrů se skládá z postupného měření tlakové ztráty a ze zkoušky na počtovou odlučivost pro kapalný aerosol. Pro zařazení se používá kanál s intervalem velikostí, kde střední velikost částice je $0,4 \mu\text{m}$. Zkouší se filtry, kde počáteční odlučivost pro částice $0,4 \mu\text{m}$ je menší než 98 %.

Konec zkoušky nastává v momentě, kdy je dosaženo tlakové ztráty filtru 250 Pa u hrubých filtrů třídy G a 450 Pa u jemných filtrů třídy F. Zkouška může také končit, kdy u dané dávky syntetického prachu je zjištěná odlučivost na syntetický prach nižší než 75 % maximální hodnoty nebo dvě zjištěné hodnoty jsou nižší než 85 % maximální hodnoty. [38], [39]

Jestliže je střední odlučivost na aerosolové částice E_m je nižší než 40 %, řadí se filtr mezi hrubé filtry a jeho zařazení je provedeno podle střední odlučivosti na syntetický prach A_m . Pokud $E_m \geq 40 \%$, řadí se filtr mezi jemné filtry. U jemných filtrů se navíc zohledňuje minimální účinnost filtrace ME. [38]

Tab. 1: Třídy filtrů pro běžné větrání podle ČSN EN 779 [40]

skupina filtrů	třída filtrace	střední stupeň odlučivosti [A_m] syntetického prachu [%]	Střední stupeň účinnosti [E_m] částic $0,4 \mu\text{m}$ [%]	minimální účinnost ME u částic $0,4 \mu\text{m}$ [%]
hrubý prach	G1	$50 < A_m < 65$	-	-
	G2	$65 < A_m < 80$	-	-
	G3	$80 < A_m < 90$	-	-
	G4	$90 < A_m$	-	-
středně hrubý prach	M5	-	$40 < E_m < 60$	-
	M6	-	$60 < E_m < 80$	-
jemný prach	F7	-	$80 < E_m < 90$	35
	F8	-	$90 < E_m < 95$	55
	F9	-	$95 < E_m$	70

6.1.1 Filtry na hrubý prach

Vzduchové filtry účinné pro částice menší než 10 μm se řadí do třídy G. Třídy G1 a G2 mají nejnižší požadavky na filtraci. Tyto typy filtrů se používají pro klimatizace a větrání v textilních provozech, větrání v těžkých provozech, pro jednoduché okenní klimatizátory, na ochranu výměníků, zvlhčovačů, ventilačních systémů. Třídy G3 a G4 jsou účinné proti pylu a prachu. Používají se pro filtraci v dopravních prostředcích, filtrace garáží, obchodních domů, sportovní haly, vzduchové clony nebo předfiltry pro klimatizační zařízení.

6.1.2 Filtry střední filtrace

Vzduchové filtry účinné pro částice menší než 1 μm se řadí do třídy M5 a M6. Filtry jsou vhodné pro zachyt cementového prachu, výtrusu nebo větší bakterie. Používají se jako filtry venkovního vzduchu pro prostory s nejnižšími požadavky (skladovací prostory, garáže, dílenské a prodejní prostory), předfiltry pro filtrační třídy F9 a výše.

6.1.3 Filtry pro jemný prach

Vzduchové filtry jsou účinné pro částice menší než 1 μm , řadí se do třídy F7, F8, F9. Filtry F7 a F8 jsou účinné proti nahromaděným sazím, prachu procházejícím plicemi. Jejich využití je především u filtrů cirkulujícího vzduchu ve větracích centrálách, u koncových filtrů klimatizačních zařízení pro střední nároky (kanceláře, obchodní domy) nebo jako předfiltry pro třídy filtrace E11 a E12. Účinnost filtrů F8 a F9 je zejména proti tabákovému kouři, kouři oxidů kovů, olejovému kouři nebo bakteriím. Hlavní využití je v koncových filtrech v klimatizačních zařízeních pro vyšší nároky (kanceláře, výrobní prostory, laboratoře, rozvodné centrály), v nemocnicích, centrály výpočetní techniky, předfiltry ve farmaceutickém průmyslu a předfiltry pro třídy filtrace H13, H14. [38], [39], [41]

6.2 Vysoce účinné filtry

Zkoušení a třídění vysoce účinných filtrů se řídí podle normy ČSN 1822, skládající se z 5 částí. Testování se zaměřuje na zjišťování odlučivosti pro částice, pronikající nejvíce vlastním filtrem a filtračním materiálem, tzv. MPPS (Most Penetrating Particle Size). Při dané filtrační rychlosti se zkouší filtrační materiál a stanoví se velikost částic MPPS, které se provádí měřením odlučivosti, za použití nejméně šesti monodisperzních aerosolů o různé velikosti částic.

Po stanovení velikosti částice MPPS následuje zkouška filtru s aerosolem, jehož střední velikost odpovídá zjištěné velikosti MPPS. Filtr se zkouší jednak jako celek (celková hodnota odlučivosti) a jednak od třídy H 13 se sondováním napříč celým průřezem filtru zjišťuje místní hodnota odlučivosti. [38], [39]

Tab. 2: Třídy filtrů pro vysoce účinné filtry podle normy ČSN EN 1822 [40]

skupina filtrů	třída filtrace	celková hodnota pro MPPS částice (0,1 - 0,3 μm)		integrální hodnota pro MPPS částice (0,1 - 0,3 μm)	
		účinnost [%]	průnik [%]	účinnost [%]	průnik [%]
skupina E (EPA)	E 10	≥ 85	≤ 15	-	-
	E 11	≥ 95	≤ 5	-	-
	E 12	$\geq 99,5$	$\leq 0,5$	-	-
skupina H (HEPA)	H 13	$\geq 99,95$	$\leq 0,05$	$\geq 99,75$	$\leq 0,25$
	H 14	$\geq 99,995$	$\leq 0,005$	$\geq 99,975$	$\leq 0,025$
skupina U (ULPA)	U 15	$\geq 99,9995$	$\leq 0,0005$	$\geq 99,9975$	$\leq 0,0025$
	U 16	$\geq 99,99995$	$\leq 0,00005$	$\geq 99,99975$	$\leq 0,00025$
	U 17	$\geq 99,999995$	$\leq 0,000005$	$\geq 99,9999$	$\leq 0,0001$

6.2.1 Filtry EPA (Efficient Particulate Air filter – efektivní vzduchový filtr)

Do této skupiny se řadí filtry E10, E11, E12. Třída E10 a E11 je vhodná pro záchyt virů na nosných částicích, sazí, tabákového kouře nebo zárodků. Filtry se používají pro prostory s vysokými požadavky (laboratoře, nemocnice), jako koncové filtry pro čisté prostory (potravinářský, farmaceutický, optický průmysl). Třída E12 je vhodná pro záchyt olejového kouře, zbytků výparů z mořské soli, radioaktivní aerosol. Filtry jsou vhodné do různých čistých prostorů (nemocnice, elektronický průmysl, v zařízeních jaderné techniky nebo jako koncové filtry v civilních ochranných zařízeních).

6.2.2 Filtry HEPA (High Efficient Particulate Air filter – velmi účinný vzduchový filtr)

Jde o filtry řadící se do skupiny H13, H14. Filtry jsou vhodné pro záchyt radioaktivního aerosolu, používají se tedy pro odsávací systémy (jaderná technika). Dále se používají pro záchyt virů, proto jsou vhodné pro čisté prostory (farmacie, nemocnice).

6.2.3 Filtry ULPA (Ultra Low Penetration Air filter – vzduchový filtr s velmi nízkou penetrací)

Filtry se řadí do skupiny U15, U16 a U17. Používají se jako koncové filtry pro nejvyšší třídu čistých prostorů. [38], [39], [42]

7 TESTOVÁNÍ FILTRAČNÍCH VLASTNOSTÍ

Vlastnosti filtrů jsou testovány z důvodu hodnocení vlastností skutečných filtrů, ověřování teoretických předpokladů na reálných nebo modelových filtrech. Hlavními charakteristikami pro testování jsou důležité koncentrace a typ zachytávaných částic, kinetika a rychlost filtrace a velikost. Dále je také důležité nastavit charakteristiky procesu filtrace, typ filtrace z hlediska jeho konstrukce.

Ve světě existuje mnoho norem, týkající se testování filtračních vlastností. Kromě norem mezinárodních, mohou mít státy i své vlastní. [43] [5], [3], [42]

V současné době se nejčastěji používají tyto metody:

1. Test syntetickým prachem – používá se prášek z rozemletých anorganických částic na bázi křemíku. Do směsi se mohou přidávat organické látky (saze, bavlněná vlákna). Test se spíše používá pro hrubší filtry, kdy důraz není kladen na záchyt jednotlivých částic. Důraz je spíše kladen na efektivitu záchytu, tlakový spád neboli kinetiku záchytu. [44]
2. Test atmosférickým prachem – testovaným filtrem prochází atmosférický vzduch. Pomocí počítače se detekuje před a za filtrem množství částic prachu ve vzduchu. V dnešní době se od tohoto testu upouští z důvodu rozdílné kvality vzduchu pro měření. [44], [43]
3. Test olejovým aerosolem – používají se kapalné olejovité částice (např. parafínový olej). Testování může probíhat metodou, kdy je aerosol rozprášen ve vzduchu zastudena za vzniku větších částic. Druhá metoda probíhá zatepla, kdy je aerosol rozprašován a sušen zatepla za vzniku částic o velikosti 0,1 – 0,3 μm . Velikost a množství vznikajících částic se analyzuje pomocí laserového počítače nebo spektrofotometry. Jelikož jsou částice málo polarizovatelné, může být toho využito v případě, kdy nechceme, aby byly výsledky ovlivněny elektrostatickým nábojem filtru. Metoda je vhodná pro jemné a vysoce účinné HEPA a ULPA filtry. [5], [42]

4. Test NaCl aerosolem – roztok soli NaCl je rozprášen a následně vysušen, za vzniku částic, které se následně analyzují spektrofotometrickou metodou. Metoda je vhodná pro testování respirátorů, jemných a HEPA filtrů. [44], [5]

5. Test methylenovou modří – roztok methylenové modři je rozprášen a vysušen. Kvůli úzkému rozsahu je metoda nahrazována testem NaCl. [2]

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zaměřuje na nanovláknenné vzduchové filtry. Filtrační materiály s nanovláknennou vrstvou poskytují požadovanou filtrační účinnost s nižším tlakovým spádem, respektive s vyšší prodyšností materiálu. Tím se pozitivně ovlivňuje spotřeba energie související s provozem filtru. Jelikož jsou neustále zpřísňovány emisní limity, je potřeba také zlepšovat vzduchové filtry. Filtry se vyvíjejí nejen v oblasti hygieny a medicíny, týkající se biologických a chemických laboratoří nebo nemocnic.

Jak bylo zjištěno, pro elektrostatické zvlákňování může být použita celá řada polymerů, biopolymerů nebo anorganických látek navázaných na polymerní matrici, které najdou využití hlavně v elektronice. Pro samotnou nanovláknennou vzduchovou filtraci se mohou nejčastěji používat polyetylenová a polyuretanová vlákna bez přídavku aditiv. Existují ale také vlákna, která zvyšují svou účinnost a efektivitu filtru přídavkem aditiv. Mezi tyto vlákna se řadí například polypropylenové vlákno s přídavkem katechinu používané pro čističky vzduchu v domácnostech. Polymetylmetakrylátové vlákno s cyklodextrinem slouží k zachycení toluenových a anilinových par. Polyesterová vlákna s teflonem jsou využitelná u slévání kovů a broušení.

Bakalářská práce se také zaměřila na dělení filtrů podle tříd. Rozlišujeme filtry, které slouží pro běžné větrání zachycující nejhrubší prach až po filtry vysoce účinné zachycující nejjemnější prachové částice.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HASAL, P., I., SCHREIBER a D., ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2007. ISBN 9788070806296.
- [2] HRŮZA, J. *Zlepšování Filtračních Vlastností Vlákných Materiálů*. Liberec, 2005. Kandidátská disertační práce. Fakulta textilní, Technická Univerzita v Liberci.
- [3] BROWN, R. C. *Air filtration: an integrated approach to the theory and applications of fibrous filters*. 1st ed. Oxford: Pergamon Press, 1993, xix, 272 s. ISBN 0080412742.
- [4] *Mechanismy filtrace - vzduchové filtry* [online]. 2013 [cit. 2017-04-02]. Dostupné z: http://1filter.cz/uploads/doc/uzitecne_informace/53_cz_1filter_mechanismy_filtrace_vzduchove_filtry.pdf
- [5] Jakub Hrůza - osobní stránky. *Definice filtrace, filtrační vlastnosti, druhy filtrů* [online]. Liberec, 2007 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://jakub-hruza.webnode.cz/prednasky/aplikace-nanomaterialu/>
- [6] GRAFE, T. at al. Donaldson Company Inc. *Nanofibers in Filtration Applications in Transportation*. 2001.
- [7] GRAFE, T.H. a K.M. GRAHAM. Nonwovens in Filtration - Fifth International Conference. *Nanofiber webs from electrospinning*. Germany, 2003, , 1-5.
- [8] HOŠEK, J. *Úvod do nanotechnologie*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010. ISBN 9788001045558.
- [9] BHUSHAN, B. *Springer handbook of nanotechnology*. 2nd rev. & extended ed. Berlin: Springer, 2007, xliv, 1916 s. ISBN 354029855X. Dostupné také z: http://katalog.k.utb.cz/F/?func=service&doc_library=UTB01&doc_number=000035256&line_number=0002&func_code=WEB-BRIEF&service_type=MEDIA
- [10] Nanotechnologie na VŠB - TUO. *Nanotechnologie* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2007 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://nanotechnologie.vsb.cz/>

- [11] BINNS, Ch. *Introduction to nanoscience and nanotechnology*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2010. Wiley survival guides in engineering and science.
- [12] ŘEZANKA, P., K. ZÁRUBA a V. KRÁL.. *Potenciál modifikovaných nanočástic v analytické chemii*. Chem. Listy 2007, **101**(11), 881-885.
- [13] KARLÍK, M. *Úvod do transmisní elektronové mikroskopie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 321 s. ISBN 9788001047293. Dostupné také z: http://toc.nkp.cz/NKC/201105/contents/nkc20112181614_1.pdf
- [14] KUBÍNEK, R. a V. STRÁNSKÁ. *Úvod do problematiky nanotechnologií* [online]. b.r. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <http://exfyz.upol.cz/didaktika/oprlz/nanotechnologie.pdf>
- [15] KO, F. at al. *Introduction to nanofiber materials*. 1st pub. Cambridge: Cambridge University Press, 2014, xiv, 267 s. ISBN 9780521879835.
- [16] NAFIGATE CORPORATION. *Nanovlákná* [online]. 2015 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: <http://www.nafigate.info/cs/content/o-nanovl%C3%A1knech>
- [17] PETRÁŠ, D. at al. Bezpečná nanovlákná. *Chem. listy*. 2009, **103**, 1009-1016.
- [18] LEV, J., L. KALHOTKA a M. ČERNÝ. *Nanotextilní membrány pro zachycení bakterií Escherichia coli*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, (5), 239-246.
- [19] WENDORFF, J. H. at al. *Electrospinning: materials, processing, and applications*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2012, xii, 241 s. ISBN 9783527320806. Dostupné také z: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1301/2012471600-t.html>
- [20] TAYLOR, G. I. Electrically driven jets. *Proceeding of the Royal Society London, Ser A*. 1969, (313), 453–475.
- [21] BHATTARAI, P. at al.. International Journal of Biomedical And Advance Research. *Electrospinning: How to Produce Nanofibers Using Most Inexpensive Technique? An Insight into the Real Challenges of Electrospinning Such Nanofibers and Its Application Areas*. 2014, **5**(9), 401-405.

- [22] MITCHELL, G. *Electrospinning: principles, practice and possibilities*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2015, xii, 276 stran. RSC polymer chemistry series. ISBN 9781849735568.
- [23] LI, D. a Y. XIA. Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?. *Advanced materials*. 2004, **16**(14), 1151-1170.
- [24] BAJI, A. at al. Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. *Composites Science and Technology*. 2010, (70), 703–718.
- [25] LIN, T. a X. WANG. *Needleless electrospinning of nanofibers: technology and applications*. Singapore: Pan Stanford Publishing, 2014, vii, 192 s. ISBN 9789814316354.
- [26] AGARWAL, S. Functional materials by electrospinning of polymers. *Progress in Polymer Science*. 2013, **38**(6), 963–991.
- [27] LUBASOVÁ, D.. *Vliv rozpouštědel na elektrostatické zvláknování polymerních roztoků*. Technická univerzita v Liberci, 2010. Autoreferát disertační práce.
- [28] Pentair. *Filtration* [online]. 2015 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <https://www.pentairaquaeurope.com/application/filtration>
- [29] LEV, J. *Použití nanotextilií v zemědělství*. Mendelova univerzita v Brně, 2011. Disertační práce.
- [30] ELMARCO s.r.o. *Technologie Nanospider™* [online]. Liberec: Liberec, 2004 [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/technologie/>
- [31] FILKOM s.r.o. *Vzduchové filtry* [online]. Slaný, 2008 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.filkom.cz/vzduchove-filtry/>
- [32] SCHOLTEN, E. Electrospun Polyurethane Fibers for Absorption of Volatile Organic Compounds from Air. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2011, **3**(10), 3902–3909.
- [33] KS Klima-Service, a.s. *Filtrační média* [online]. Dobříš, 2002 [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://www.ksklimaservice.cz/>

- [34] UYAR, T. Cyclodextrin functionalized poly(methyl methacrylate) (PMMA) electrospun nanofibers for organic vapors waste treatment. *Journal of Membrane Science*. 2010, **365**, 409–417.
- [35] HORSKÝ, J. a J. JINDŘICH. *Cyklodextriny ve světě polymerů* Chem. Listy, 2013, **107**, 769–776.
- [36] DUCHÁČEK, V.. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 9788070807880.
- [37] ZVVZ-Enven Engineering, a.s. *Patronové filtry* [online]. 2016 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/latkove-filtry/filtry-patronove.html>
- [38] TZB - info. *Třídění a použití filtrů* [online]. 2009 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/5843-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-ii>
- [39] HEMERKA, J. *Odlučování tuhých částic*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1994, 138 s. ISBN 8001022706.
- [40] Wemac s.r.o. *Třídy filtračních elementů* [online]. 2017 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <https://www.wemac.cz/principy-filtrace/tridy-filtracnich-elementu/>
- [41] SZÉKYOVÁ, M. a kolektiv. *Větrání a klimatizace*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2006, 359 s. ASB. ISBN 8080760373.
- [42] SCROTH, T. a T. CAESAR. *Testing HEPA/ULPA filters at the manufacturer's facility and in situ on the user's premises* [online]. 2001, , 36-44 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: http://www.freudenberg-filter.com/fileadmin/templates/EN_downloads/SR_Schwebstoff_Pruef_E_2-09.pdf
- [43] GUSTAVSSON, J. Air Filters For Ventilating Systems — Laboratory and In Situ Testing International Nonwovens Journal. *International Nonwovens Journal*. 1999, **8**(2).

- [44] *Laboratoř testování filtrace* [online]. Fakulta textilní, Technická univerzita v Liberci, 2008 [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: http://dirk.kmi.tul.cz/index.cgi?sou=science/laboratore/knt-testovani_filtrace.htm
- [45] ELMARCO s.r.o. *Nanovlákná* [online]. Liberec: Liberec, 2004 [cit. 2017-04-06]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/fotogalerie/nanovlakna/>
- [46] *Filtry* [online]. 2004 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://users.fsids.cvut.cz/~jiroutom/vyuka/hmz/hmz4.pdf>
- [47] Windsor Air Filters. *HVAC Air Filters Manufacturer and Supplier* [online]. 2011 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.windsorairfilters.com/hepa-filters.html>
- [48] Vzduchotechnik s.r.o. *Kapsové filtry k odsavačům POC* [online]. 2010 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnik.cz/kontakt/>
- [49] Metallkon Group s.r.o. *Patronové filtry* [online]. 2016 [cit. 2017-03-28]. Dostupné z: <http://www.metallkongroup.com/produkty/vzduchotechnika-pro-prumyslove-provozy/patronove-filtry/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

STM	Skenovací tunelovací mikroskop
ATM	Mikroskopie atomových sil
PTFE	Polytetrafluorethylen
EPA	Efficient Particulate Air filtr – efektivní vzduchový filtr
HEPA	High Efficient Particulate Air filter – velmi účinný vzduchový filtr
ULPA	Ultra Low Penetration Air filter – vzduchový filtr s velmi nízkou penetrací

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Rozdíl mezi hloubkovou (a) a plošnou filtrací (b) [23]</i>	11
<i>Obr. 2: Mechanismus zachycení částice s filtračním prvkem [4]</i>	12
<i>Obr. 3: Mechanismus setrvačné srážky [4]</i>	12
<i>Obr. 4: Mechanismus difúze [4]</i>	13
<i>Obr. 5: Mechanismus síta [4]</i>	13
<i>Obr. 6: Mechanismus elektrostatického pole [4]</i>	14
<i>Obr. 7: Srovnání lidského vlasu, pylového zrna a nanovláknů [45]</i>	16
<i>Obr. 8: Poměr velikostí různých struktur [10]</i>	17
<i>Obr. 9: Nanovláknenná niť z polyakrylonitrilo-akrylátového kopolymeru vyrobená metodou elektrostatického zvlákňování [17]</i>	19
<i>Obr. 10: Nanovláknenná vrstva z polyurethanu vyrobená metodou elektrostatického zvlákňování [17]</i>	20
<i>Obr. 11: Nanovláknenný objemný útvar z polystyrenu: a) detail struktury b) celkový pohled [17]</i>	21
<i>Obr. 12: Postup elektrostatické zvlákňování, detail Taylorova kužele [21]</i>	23
<i>Obr. 13: Výroba nanovláken pomocí technologie Nanospider [30]</i>	25
<i>Obr. 14: Schéma plochého filtru; (a) povrchový filtr, (b) hloubkový filtr [46]</i>	29
<i>Obr. 15: Příklad plochého filtru [5]</i>	29
<i>Obr. 16: Schéma skládaného filtru [47]</i>	30
<i>Obr. 17: Schéma a ukázka kapsového filtru [48]</i>	30
<i>Obr. 18: Schéma a ukázka patronového filtru [49]</i>	31
<i>Obr. 19: Schéma hadicového filtru [5]</i>	32

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Třídy filtrů pro běžné větrání podle ČSN EN 779 [40].....33

Tab. 2: Třídy filtrů pro vysoce účinné filtry podle normy ČSN EN 1822 [40]35