



Laminované nanovláknenné vrstvy pro filtraci vzduchu

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil

Studijní obor: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály

Autor práce: **Anna Novotná**

Vedoucí práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering ■

Laminated nanofiber layers for air filtration

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil

Study branch: 3106R016 – Textile Technologies, Materials and Nanomaterials

Author: **Anna Novotná**

Supervisor: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.





Zadání bakalářské práce

Laminované nanovláknenné vrstvy pro filtraci vzduchu

Jméno a příjmení: **Anna Novotná**
Osobní číslo: T16000419
Studijní program: B3107 Textil
Studijní obor: Textilní technologie, materiály a nanomateriály
Zadávající katedra: Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
Akademický rok: **2017/2018**

Zásady pro vypracování:

1. Studujte problematiku vzduchové filtrace včetně patřičných norem testování filtrů. Zaměřte se na jemnou filtraci vzduchu určenou pro ventilaci v budovách.
2. Vyhodnoťte dosavadní výsledky vývoje nanovláknenných vzduchových filtrů pro uvedenou oblast.
3. Navrhněte a realizujte experiment zaměřený na vývoj a optimalizaci parametrů laminace filtračního materiálu obsahujícího vrstvu polyamidových nanovláken.
4. Testujte strukturní a filtrační vlastnosti vzorků filtračních materiálů.
5. Zpracujte a vyhodnoťte výsledky.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40-60 dle potřeby
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



Seznam odborné literatury:

1. Brown, R. C. : Air filtration, Sheffield UK, 1993
2. Hrůza, J.: Zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů. Disertační práce, Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2005

Vedoucí práce: Ing. Jakub Hrůza, Ph.D.
Ústav nových technologií a aplikované informatiky
Datum zadání práce: 20. února 2018
Předpokládaný termín odevzdání: 18. dubna 2019

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

V Liberci 20. února 2018



Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

15. 4. 2019

Anna Novotná

Poděkování

Chtěla bych zde poděkovat vedoucímu této bakalářské práce Ing. Jakubu Hružovi, Ph.D., za vedení a odborné rady. Dále poděkování patří pracovníkům CxI a KNT TUL, na které jsem se obrátila a kteří mi všichni ochotně pomohli. Děkuji svým blízkým za podporu při studiu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá laminací nanovlákněné vrstvy o nízké plošné hmotnosti s předfiltry o samostatné účinnosti zachytu třídy M a G podle ČSN EN 779. Cílem práce bylo vytvoření vysoce účinného filtru s vhodnými filtračními vlastnostmi. V první části jsou vysvětleny mechanismy filtrace, výroba nanovláken a jejich aplikace ve filtraci. Dále jsou charakterizovány ostatní použité materiály a technologie. V druhé části jsou uvedeny konkrétní parametry vlákněných vrstev a pracovní postup při optimalizaci laminace vzorků. Následuje hodnocení. S vybraným vzorkem byla provedena simulace testování odolnosti.

Klíčová slova: nanovlákněná vrstva, polyamid 6, atmosférická filtrace, laminace

Annotation

This bachelor thesis deals with lamination low weight nanofiber layer with prefilters which are supposed to a separate efficiency group M and G according to ČSN EN 779. Purpose of the thesis is to form a highly efficient filter with sufficient filtration properties. In the first part are explained mechanisms of filtration, manufacture of nanofibers and their application in the filtration. Other used materials and technologies are characterized. In the second part are showed particular parameters of the fiber layers and optimization of lamination working method. Results analysis is followed. Simulation of resistance testing is performed with the chosen sample.

Keywords: nanofiber layer, polyamide 6, air filtration, lamination

Obsah

Seznam zkratk	9
1 Úvod	10
2 Teoretická část	11
2.1 Filtrace	11
2.1.1 Princip filtrace	12
2.1.2 Prach	13
2.1.3 Struktura filtru a její význam	14
2.1.4 Typy vlákných filtrů podle konstrukce	15
2.1.5 Normy	15
2.1.6 Životnost filtru	17
2.1.7 Aplikace jemné filtrace a vysoce účinných filtrů	18
2.2 Nanovlákná	19
2.2.1 Nanospider	20
2.2.2 Nanovlákné filtry	21
2.3 Charakterizace materiálů	21
2.3.1 Polyamid 6	21
2.3.2 Polypropylen	22
2.3.3 Sklo	23
2.4 Technologie přípravy a modifikace filtračních vlákných vrstev	23
2.4.1 Odstředivé zvlákňování	23
2.4.2 Tavné zvlákňování	24
2.4.3 Vpichování	24
2.4.4 Kalandrování	25
2.4.5 Spunbond	26
2.4.6 Laminování	26
2.4.7 Princip měření efektivity zachytu	28
3 Praktická část	29
3.1 Materiály	29
3.1.1 Základní materiály	30
3.1.2 Pojiva	31
3.1.3 Nanovlákná	32

3.2 Používané přístroje	32
3.2.1 Lis	32
3.2.2 Měření prodyšnosti	33
3.2.3 Testování jemné filtrace atmosférického vzduchu	33
3.2.4 Simulace namáhání filtru prouděním vzduchu	34
3.3 Příprava vzorků	35
3.3.1 Výběr nanovlákněné vrstvy	35
3.3.2 Parametry nanovláken	36
3.3.3 Parametry základní vrstvy	36
3.3.4 Laminace filtrů	37
3.4 Hodnocení nanovlákněného filtru na vpichované textilii	39
3.4.1 Prodyšnost	39
3.4.2 Efektivita záchytu částic	39
3.4.3 Diskuze	40
3.4.4 Další hodnocení	42
3.5 Hodnocení nanovlákněného filtru na materiálu ze skleněných vláken	44
3.5.1 Prodyšnost	44
3.5.2 Efektivita záchytu částic	45
3.5.3 Diskuze	46
3.5.4 Další hodnocení	48
3.6 Testování stability vybraného vzorku	49
3.6.1 Skládání	49
3.6.2 Simulace namáhání prouděním vzduchu	51
3.6.3 Diskuze	52
4 Závěr	53
Seznam použité literatury	55
Seznam obrázků	58
Seznam tabulek	59
Seznam grafů	60

Seznam zkratek

CxI	Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace
ČSN	Česká státní norma
DEHS	diethylhexylsebakát
E	efektivita záchytu částic
ePM	efektivita záchytu pro frakci částic
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter, vysoce účinný filtr
ISO	International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
KNT	Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů
MPPS	Most Penetrating Particle Size, velikost nejhůře zachytitelných částic
NT	netkaná textilie
OPC	optický počítač částic
p	tlak
Pa	pascal, jednotka tlaku
PA	polyamid
PA6	polyamid 6
PE	polyetylen
PES	polyester
PM	particulate matter, dělení částic dle velikosti
PP	polypropylen
TUL	Technická univerzita v Liberci
ULPA	Ultra Low Penetration Air filter, vysoce účinný filtr s malou penetrací částic

1 Úvod

Filtrace je aktuální téma z důvodu ochrany životního prostředí a vlivu na lidské zdraví. Tato práce se zabývá atmosférickou filtrací, která se soustředí na odlučování prachu a látek z plynného prostředí. Na čistotu vzduchu je kladen větší důraz, v České republice se dodržují normy Evropské unie a mezinárodní ISO normy. Jednak se hlídají vypouštěné emise, a čištěn je i vstupní vzduch budov. V tomto směru je tlak kladen především na omezování prašnosti, která je problémem zejména při smogu.

Lidé denně vdechnou přibližně 12,5 m³ vzduchu, což odpovídá asi 16 kg vzduchu. Tělo má mechanismy pro filtraci přijímaného vzduchu, ovšem vývoj průmyslu je daleko rychlejší. Částice menší než 10 μm snáze projdou do dolních cest dýchacích. Při vdechování nevhodných látek může dokonce dojít k jejich přestupu z plic do krevního oběhu či kumulaci v organismu. Samozřejmě závisí na charakteru, největší riziko představují ty organické látky, jejichž penetrace do organismu je samovolná.

Běžné pozorování malých částic je omezeno okem, člověk nevidí jednotlivé částice například bakterií, virů, emulzních kapének, nanočástic a dostatečně jemného prachu. Právě na tyto částice se zaměřují především vysoce účinné filtry, které se používají v čistých provozech, při výrobě léčiv, v čističkách vzduchu nebo vysavačích.

Vlákenné filtry jsou dlouhodobě používané částicové filtry. Vlákna umožňují vytvořit hustou síť. Póry se zmenšují s použitím jemnějších vláken, které příliš nebrání proudění vzduchu. Téma filtrace je probráno v Teoretické části, kde je také popsán charakter použitých materiálů a technologií.

Tato práce se zabývá vylepšením 2 základních materiálů pro výrobu stávajících filtrů s nižší účinností zachytu (dle ČSN EN 779 třídy G3 a M6) vhodnou laminací nanovlákenné vrstvy o nízké plošné hmotnosti za použití 3 typů pojiv ve formě vlákenné vrstvy. Průběh je popsán v Praktické části.

Cílem je optimalizovat podmínky laminace a najít vhodnou kombinaci materiálů pro vytvoření vysoce účinného filtru. Testování bude zaměřeno na měření prodyšnosti, efektivity zachytu částic a změny tlakového spádu škály vzorků s různou kombinací materiálů výsledného filtru, který se skládá z předfiltru, pojivové, nanovlákenné a krycí vrstvy.

2 Teoretická část

V teoretické části jsou probrány základní pojmy k problematice této práce, vzduchové filtrace, a charakterizace použitých materiálů. Nastíněny jsou i konkrétní aplikace. Teoretická část je rozdělena na hlavní kapitoly Filtrace, Nanovlákná, Charakterizace materiálů a Technologie přípravy a modifikace filtračních vláknenných vrstev.

2.1 Filtrace

Filtrace je jeden z typů mechanické separace pevné, nebo kapalné fáze z tekutin. Zahrnuje separaci disperzního podílu z disperzního prostředí pomocí porézní struktury. Cílem je vyčistit disperzní prostředí za co nejméně změněného proudění. Mezi další metody separace látek patří sedimentace, adsorpce, difuze a absorpce, díky níž lze oddělovat i plyn z plynu a kapalinu z kapaliny [Sutherland, 2008].

Vstupními proměnnými procesu filtrace jsou filtrační charakteristiky a výstupními filtrační vlastnosti [Hrůza, 2005]. Filtrační vlastnosti se z principu mění v průběhu filtrace. V průběhu samotného procesu dochází k zachytávání částic a tím pádem i k jejich kumulaci v samotném filtru, a to ovlivňuje záchyt následujících částic [Brown, 1993].

Mezi charakteristiky ovlivnitelné výrobcem filtru nebo filtračního systému lze zařadit materiál, jeho mechanické vlastnosti, povrchové vlastnosti, parametry vláken, strukturu uspořádání vláken, plošnou hmotnost, stejnoměrnost, tloušťku, typ filtru a jeho plochu.

Filtraci popisuje Darcyho zákon. Při průchodu tekutiny porézním médiem dochází k odporu, který se projeví jako tlak, který je nutný vyvinout pro průchod viskózní tekutiny. Při zvětšení tlaku dochází k rychlejšímu toku, tlakový spád je poměrný rychlosti průtoku tekutiny. Tok souvisí s viskozitou média, která ani u vzduchu není zanedbatelná. Souvisí především s přítomností turbulentního nerovnoměrného proudění a vlivu tření [Brown, 1993].

Nejdůležitějšími vlastnostmi filtru jsou prodyšnost, odlučivost a tlakový spád. Efektivita záchytu (E) neboli odlučivost vyjadřuje, jaký je poměr částic, které projdou a které jsou zachyceny.

$$E = \left(1 - \frac{c_1}{c_0}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

c_1 vyjadřuje koncentraci částic za filtrem a c_0 před filtrem. Normy tento vztah dále upravují a vztahují na určitý interval velikostí částic. Pro částice větší jak 2,5 μm se místo koncentrace používá hmotnost, pro menší jejich počet, který měří optický počítač částic (OPC).

Tlakový spád (Δp) je rozdíl tlaků před (p_0) a za (p_1) filtrem. Vystihuje odpor materiálu vůči toku, který závisí i na rychlosti proudění. S nárůstem rychlosti roste lineárně a při plnění zachytávanými částicemi roste exponenciálně [Hrůza, 2005].

$$\Delta p = p_0 - p_1 \quad (2)$$

Prodyšnost je vyjádřena objemem tekutiny (vyjádřeným obvykle v litrech), který projde 1 m² filtru za 1 minutu při působení definovaného tlaku.

Poróznost je objem pórů vztažený k objemu textilie. Je doplňkem zaplnění, souvisí s geometrií vláken, ovlivňuje prodyšnost i tlakový spád a navíc je ovlivňována zanášením filtru.

2.1.1 Princip filtrace

Filtrace se dělí na povrchovou a hloubkovou. Povrchová funguje na principu síta, tedy zachytává částice větší, než jsou póry filtru. Záchyt probíhá na povrchu filtru a vzniká tzv. filtrační koláč, který lze za určitých podmínek odstranit a filtr tak regenerovat. Pro filtraci vzduchu je obvykle vhodný filtr vrstvený. Vzniká 3D síť, kterou pronikají filtrované částice a je větší pravděpodobnost, že se zachytí a zároveň se zachytávají i částice menší než je velikost pórů [Brown, 1993].

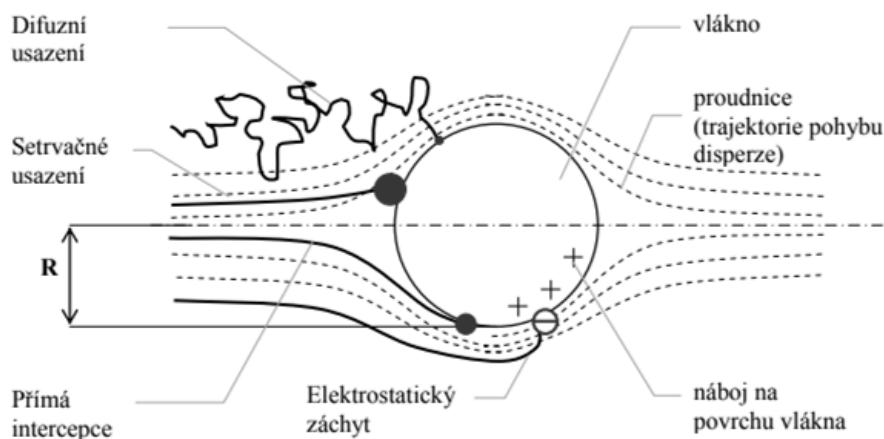
Mezi mechanismy hloubkové filtrace patří přímý záchyt, setrvačné, difúzní a elektrostatické usazení. K přímému záchytu dochází, když je částice v proudu disperzního prostředí; díky její malé velikosti je zachycena po přiblížení k povrchu vlákna a to bez vlivu dalších sil, především setrvačných.

Setrvačné usazení je typické pro těžší částice, které při nižší rychlosti prostředí nesledují proudnice toku, ale narážejí na povrch vláken, kde jsou zachyceny podobně jako projektily ze zbraně [Brown, 1993] a [Hrůza, 2005].

Difúzní usazení se týká malých částic, které nesledují proudnice vzduchu, ale důsledkem Browanova pohybu se usazují na povrchu vláken. K tomuto jevu dochází především při malých rychlostech prostředí.

Elektrostatické usazení se uplatňuje v přítomnosti nabitých částic, které jsou podle polaritý přitahovány, nebo odpuzovány vlákny filtru. (Tohoto efektu využívají elektrofiltry.)

Celková efektivita filtru pak závisí na všech dílčích mechanismech a jejich využití.



Obr. 1 Principy hloubkové filtrace, R- poloměr vlákna. [Hrůza, 2005]

2.1.2 Prach

Prach je pevný aerosol. Vzniká přirozeně zvětráváním hornin, činností sopek a při mechanickém zpracování materiálů v pevném skupenství. Velikost prachu je přibližně do 100 μm . Hrubý prach má velikost v desítkách mikrometrů a rychle sedimentuje. Při spalování organických látek vzniká kouř o velikosti 0,01-0,5 μm a při svařování dým, jehož částice mají nejčastěji velikost 0,1-1 μm [Hollerová, 2007].

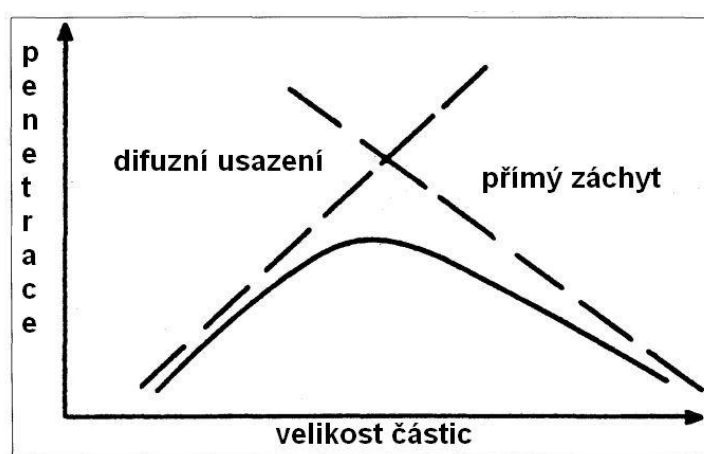
Částice biologického původu spouštějí imunologickou odpověď, která je v případě alergické reakce přehnaná. Pyly z větrosubných rostlin se šíří na velké vzdálenosti. Nejproblematictější je spodní hranice velikostí mezi 15–60 μm . Spory plísní a hub a jejich produkty se vyskytují v domech i v přírodě do 2 000 m n. m. Roztoči jsou 300 μm členovci, kteří se živí odumřelou kůží (velikost kožních buněk je asi 30-60 μm). Jsou součástí domácího prachu a jejich enzymy mohou způsobovat senzibilitu. Vyskytují se i v hnízdech ptáků. Doma chovaní mazlíčci jsou zdrojem alergenů, které jsou především ve slinách, moči a kožních buňkách [Vydláková, 2010]. Také pouští srst (průměr psího chlupu je asi 20 μm), nebo peří. Intenzivním pohybem prach víří a případně rozmělnují.

Státní zdravotnický ústav dále specifikuje kategorie prachu a stanovuje povolené koncentrace, především na pracovištích. Člověk vdechne prach spolu se vzduchem, horní cesty dýchací zachytí většinu částic nad 10 μm . Dlouhodobá expozice inertním prachem také způsobuje problémy, zejména s obranyschopností dýchací soustavy. Menší částice se dostanou dále do plicních sklípků. Nebezpečná je penetrace nakumulovaných škodlivin na povrchu i inertního prachu. Dostatečně malé částice (v nm) mohou projít skrz cytoplazmatickou membránu do buňky.

Prachy mohou být inertní, dráždivé, infekční, toxické a karcinogenní. Legislativně jsou stanoveny přípustné expoziční limity [Hollerová, 2007]. Atypický je vláknitý, např. azbestový prach,

je ostrý, neodplaví se s hlenem. Nejnebezpečnější je průměr 0,25 μm , především ve spojení s větší délkou (20 μm), způsobuje záněty a rakovinu [Loomis et al., 2009]. Zdroje by neměly být vystavovány proudícímu vzduchu.

Reálný prach je směs uvedených, s ohledem na konkrétní prostředí. Cílem je, aby došlo k zachytu nehledě na typ částice. Nejhůře zachytitelné částice jsou mezi 100 a 300 nm. Tento interval představuje minimum odlučivosti (MPPS). Částice menší než 100 nm se s klesajícím průměrem zachytávají lépe a částice větší než 300 nm se zachytávají lépe s rostoucím průměrem. Dále závisí i na průměru použitých vláken (ovlivňování přímého zachytu). Při zvyšování rychlosti proudění se minimum nejhůře zachytitelných částic posouvá k nižším velikostem (ovlivňování difuzního usazení) [Brown, 1993].



Obr. 2 Zobrazení penetrace částic s ohledem na jejich velikost. Upraveno podle [First, 1998]

2.1.3 Struktura filtru a její význam

Struktura popisuje průřez filtrem v rovině kolmé na plochu materiálu. Struktura vlákenného filtru se odvíjí od použitých vláken, jejich orientace a materiálových vlastností. Velmi vypovídající je typ technologie výroby, nejčastěji se filtry vyrábí naplavováním, technologií airlaid, mykáním staplových vláken a následným zpevňováním vrstvy, nebo rovnou z polymeru technologií meltblown, a z taveniny tavným zvlákňováním s přímým ukládáním ve vrstvu, či odstředivým zvlákňováním. Každá technologie má své typické rysy, které se liší průměrem a délkou vláken, jejich uspořádáním, objemností vrstvy atd.

Regenerovatelné filtry vyžadují, aby filtrace probíhala na jejich náletové straně. To klade značné nároky na pevnost náletové vrstvy. Vzhledem k všeobecně nízké mechanické odolnosti nanovláken se jako vhodnější jeví jejich využití v poslední vrstvě systému jednorázových filtrů. Z

pohledu tvaru konstrukce jsou pro aplikaci nanovláken vhodné typy uvedené v následující kapitole.

2.1.4 Typy vláknenných filtrů podle konstrukce

Ploché filtry nemají nijak zvětšenou filtrační plochu, jde o nejjednodušší provedení. Z hlediska principu filtrace mohou být povrchové, nebo hloubkové. Často se řadí za sebe. Ploché filtry mají obvykle nižší účinnost záchytu a slouží jako předfiltry třídy G dle normy ČSN EN 779.

Kapsové filtry mají ve 3 směrech přibližně stejné rozměry, jsou objemnější, materiál je umístěn do dlouhých kapes, které jsou na koncích sešity. Používají se materiály, které nelze skládat. Často se jedná o středně účinné filtry tříd M a F dle normy ČSN EN 779.

Skládané filtry jsou složené do tvaru harmoniky. Mají větší filtrační plochu než ploché, při stejné náletové rychlosti dochází k poklesu tlakového spádu a prodloužení životnosti. Materiál musí být schopný skladu bez poškození a zároveň zůstat v požadovaném tvaru (dostatečná tuhost). Obvykle se jedná o vysoce účinné filtry tříd E a H dle normy ČSN EN 1822.

Další konstrukce, které nejsou v této práci zkoumány, jsou filtry hadicové, patronové, bubnové a další. Hadicové filtry se skládají z několika metrů dlouhých úzkých obdélníků plochých filtrů, které jsou svinuty a sešity, následně jsou naskládány vedle sebe. Svíčkové filtry (patronové) jsou perforované dutinky obalené plochým, nebo skládaným filtrem. Bubnový filtr je zjednodušeně rotující patrona s možností mechanické regenerace povrchu.

2.1.5 Normy

Vzduchová filtrace je legislativně obsáhlá. Řízení probíhá pomocí norem a Česká republika se řídí těmi evropskými, dochází i ke sjednocování s mezinárodními ISO normami. Vzhledem k tématu této práce bylo přihlédnuto k některým normám, které budou přibližně popsány.

ČSN EN 779:2012 „Filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic pro všeobecné větrání“ klasifikovala třídy filtrů na hrubé, střední a jemné. U hrubých se sledovala střední účinnost záchytu syntetického prachu, která musela být alespoň poloviční. U středních a jemných se hodnotil stupeň odlučivosti pro velikost částic pouze 0,4 μm a dle procentuální účinnosti byly filtry zařazovány do tříd. Ovšem právě kvůli tomuto hodnocení pouze jedné konkrétní velikosti zařazení příliš neodráželo reálné chování filtru, a proto od 1. 12. 2017 přestává platit.

Tab. 1 Hodnocení filtrů podle normy ČSN EN 779: 2012

Skupina	Třída filtrace	Koncová tlaková ztráta (Pa)	Střední stupeň odlučivosti (A_m) syntetického prachu (%)	Střední stupeň účinnosti (E_m) částic 0.4 μm (%)
Hrubý prach	G1	250	$50 \leq a_m < 65$	-
	G2	250	$65 \leq a_m < 80$	-
	G3	250	$80 \leq a_m < 90$	-
	G4	250	$90 \leq a_m$	-
Středně hrubý prach	M5	450	-	$40 \leq E_m < 60$
	M6	450	-	$60 \leq E_m < 80$
Jemný prach	F7	450	-	$80 \leq E_m < 90$
	F8	450	-	$90 \leq E_m < 95$
	F9	450	-	$95 \leq E_m$

Tabulka převzata z [1filter, 2013]

Norma byla nahrazena ČSN EN ISO 16890:2016 „Vzduchové filtry pro všeobecné větrání“, která ve čtyřech částech popisuje technické specifikace, měření a stanovení účinnosti v německé preciznosti. Nová norma vznikla na základě vlivu jemného prachu na lidské zdraví ve spolupráci World Health Organization, United States Environmental Protection Agency a Evropské unie.

Na částice ve vzduchu je pohlíženo komplexněji. Má 3 základní třídy velikosti částic- particulate matter (PM). Na základě PM vznikly 3 kategorie, PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 . Hodnotí se efektivita záchytu (ePM) frakce aerosolu ve vzduchu ve velikosti od 0,3 μm do 1, 2,5, nebo 10 μm . Výrobek z dané kategorie je plně srovnatelný se všemi vzorky ve stejné třídě. Klasifikace probíhá tak, že pro zařazení v kategorii ePM_x musí pro danou frakci částic $x=\{1;2,5;10\}$ dosahovat alespoň 50% účinnosti záchytu (ePM_{\min}). Konkrétní procento se pak zaokrouhluje dolů s přesností na 5 %. Pokud je počáteční účinnost pod 50 %, zařazuje se do třídy ISO Coarse (hrubý).

Tab. 2 Hodnocení podle ČSN EN ISO 16890:2016

	$E_{PM1\min}$	$E_{PM2,5\min}$	E_{PM10}	Třída
ISO ePM1	≥ 50			ePM1
ISO ePM2,5		≥ 50		ePM2,5
ISO ePM10			≥ 50	ePM10
ISO Coarse			< 50	ISO Coarse

Pro vysoce účinné filtry existuje norma ČSN EN 1822:2010 „Vysoce účinné filtry vzduchu (HEPA a ULPA)“. HEPA znamená High Efficiency Particulate Air filter, tedy vysoce efektivní vzduchový filtr a ULPA Ultra Low Penetration Air filter, filtr pro vzduch s velmi nízkým obsahem částic. Třídí filtry, které dosáhly vysoké účinnosti v předchozí kategorii, a zaměřuje se na průnik částic o velikosti 100-300 nm, které patří k nejhůře zachytitelným částicím.

Tab. 3 Hodnocení podle ČSN EN 1822: 2010

Skupina filtrů	Třída filtrace	Účinnost (%)	Průnik (%)
E EPA	E 10	≥ 85	≤ 15
	E 11	≥ 95	≤ 5
	E 12	≥ 99.5	≤ 0.5
H HEPA	H13	≥ 99.95	≤ 0.05
	H 14	≥ 99.995	≤ 0.005
U ULPA	U 15	$\geq 99.999\ 5$	$\leq 0.000\ 5$
	U 16	$\geq 99.999\ 95$	$\leq 0.000\ 05$
	U 17	$\geq 99.999\ 995$	$\leq 0.000\ 005$

Pro testování filtrů norma předkládá 2 principy, a to testování celého filtru, pak se hodnotí masa vzduchu za filtrem jako celek, nebo se filtr proměřuje po částech, kde se v lokálních místech povoluje malá odchylka. Běžně se u filtru provádí jedno komplexní (a nákladné) měření. Odpadá hodnocení statistických dat a práce s nimi při zařazování do třídy filtrace.

Dílčí vzorky o menší ploše se mohou hodnotit na základě průměru měření, nebo přísněji, a to na základě nejhoršího výsledku. Při lokální vadě v materiálu dochází v daném místě k poklesu efektivnosti zachytu. Otázkou je, jaký vliv to bude mít na celkový proud vzduchu za filtrem. Normy se nezabývají přímo testováním vyvíjeného filtru.

2.1.6 Životnost filtru

Důležitou vlastností je životnost filtru, což je doba, za kterou dochází k ucpaní filtru a je nutná výměna. Filtry se buď regenerují, nebo vyměňují. Definovat konkrétní čas je složité, závisí na konkrétním znečištění.

Normy proto udávají použitelnost do určitého tlakového spádu. Tento přístup vychází z hlediska spotřeby energie při použití v klimatizační jednotce. Je potřeba více energie na profukování vzduchu přes ucpaný filtr, i když roste jeho efektivita. Náklady se ale budou zvyšovat i s častým vyměňováním. Z toho důvodu se přistupuje k víceúrovňové filtraci, kde jsou postupně zachytá-

vány nejdříve hrubé, a postupně jemnější částice. Dochází tak k prodloužení životnosti dražších účinných filtrů.

Odolnost vůči vlivům prostředí je důležitou podmínkou použitelnosti, rozdělují se na tepelně odolné, mechanicky odolné a chemicky odolné. Pro funkci je nezbytná stabilita materiálu.

Dalším faktorem je mikrobiologická aktivita na filtru, který se při vystavení vyšší vlhkosti a zachyceným částicím může stát živnou půdou pro mikroorganismy. Takovýto filtr pak neplní svou funkci z hlediska ochrany zdraví.

Reálná životnost filtru závisí na konkrétních podmínkách aplikace, zejména koncentraci nečistot ve vzduchu. Jednorázové filtry se obvykle vyměňují po půl až roce činnosti. Průběžně regenerovatelné průmyslové filtry mají životnost několik let až několik desítek let.

2.1.7 Aplikace jemné filtrace a vysoce účinných filtrů

Filtrace jemného a středně hrubého prachu se zaměřuje především na částice od 0,5 do 5 μm , větší částice jsou zachyceny díky menším pórům. Při běžném větrání se jedná především o jemný prach.

Používají se jako druhý stupeň filtrace v klimatizační jednotce. Nejčastěji se jedná o netkané textilie z vláknitvorných polymerů či skelná vlákna. Při vysoké účinnosti zachytu pro interval velikostí částic normovaný ČSN EN 779 nebo ČSN EN ISO 16890 se přistupuje k hodnocení průniku menších částic podle ČSN EN 1822.

Tato kategorie je známá pod názvem HEPA filtry. Byly tajně vyvíjeny pro armádní účely v průběhu 2. světové války jako ochrana před biologickými, chemickými a radioaktivními částicemi, které měly všechny zachytit. Prvními používanými materiály byly azbest a celulóza. Nejdříve pro respirátory a poté poskládaný filtr. Postupně se HEPA stalo synonymem vysoce účinných filtrů [First, 1998]. Jejich účinnost zachytu částic je od 85% do 99,99...95 %, podle normy ČSN EN 1822. Používají se na konci klimatizačních jednotek, jsou na výstupu vzduchu z vysavače, v mikrobiologických laboratořích, farmaceutických provozech, uplatní se i při výrobě elektroniky, v čistých provozech, ve flowboxech, při lakování [Sutherland, 2008].

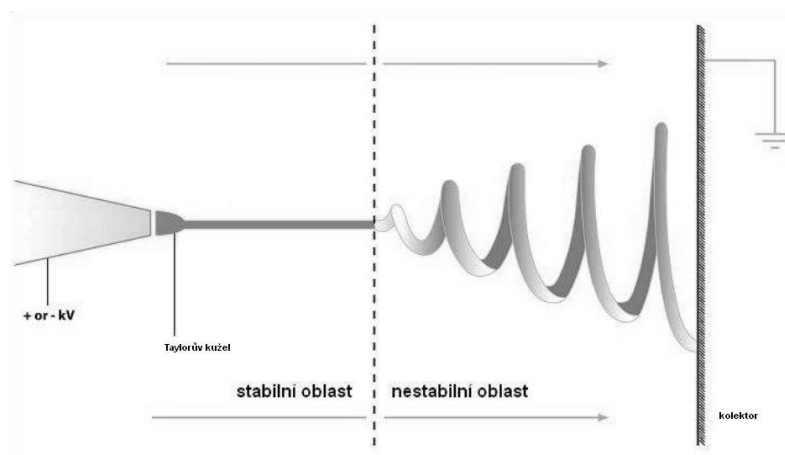
Nejčastěji se vyrábí naplavováním krátkých skelných vláken, což má nevýhodu ve velkém objemu vody a malé produktivitě, či vrstva vzniká rovnou z taveniny. Další možností je technologie meltblown z termoplastických vláknitvorných polymerů. Vlákna mají průměr v řádu jednotek až desítek mikrometrů.

2.2 Nanovlákna

Filtrační vrstva z nanovláken je součástí experimentu této práce. Z názvu nanovlákna vyplývá, že nejméně jeden rozměr mají v nanometrech, tedy od 1 do 100 nm. Ovšem častěji se používá rozšířená definice se submikronovým průměrem vláken, do 1000 nm. Délka vlákna je mnohonásobně větší, v makroskopickém měřítku. Nanovlákna mají vysoký specifický povrch, jsou vysoce porézní a póry jsou velmi malé, vrstva je prodyšná. Tyto vlastnosti jsou předurčující pro využití ve filtraci. Mají nízkou hmotnost.

K výrobě lze použít mnoho technologií a stále se vyvíjí další. V průmyslovém měřítku se používá především elektrospinning. Strojní zařízení existují i pro forcespinning, které využívá odstředivé síly rotoru, obdobně jako při výrobě mikrovláken. Tavné zvlákňování, s využitím zařízení pro výrobu bikomponentních vláken typu ostrovy v moři, s následným rozpuštěním spojitě fáze vlákna, či vláken typu segmentový koláč s následným rozvolněním. Dále melt-blown, rozfukování taveniny, které může probíhat na běžných strojních zařízeních s úpravou procesních podmínek (vyšší index toku polymeru) a výměny zvlákňovací hlavy za menší průměry trysek [Yarin, Pourdeyhimi, Ramakrishna, 2014]. AC spinning využívá střídavý proud a není potřeba kolektoru. Pro výrobu jednotlivých nanovláken lze použít drawing, kdy vlákna vznikají tažením z polymerní kapky. Speciální je výroba šablonou, fázová separace a samosestavování molekul [Yarin, Pourdeyhimi, Ramakrishna 2014].

Pro experiment byla vrstva vyrobena na Nanospideru elektrostatickým zvlákňováním, což je metoda výroby nanovláken z roztoku nebo taveniny polymeru za vysokého napětí. Ovlivňování kapky v elektrostatickém poli byl popsán již v16. století [Kuželová Košťáková, 2018]. První nanovlákna jsou spojována s patentem Formhalse (1934), který vylepšil pokusy Zeleneho. Nnedaly se využít v textilním průmyslu, a jejich rozvoj začíná znovu až kolem roku 2000 (Reneker) [Yarin, Pourdeyhimi, Ramakrishna 2014]. A dnes zažíváme boom nanotechnologií.



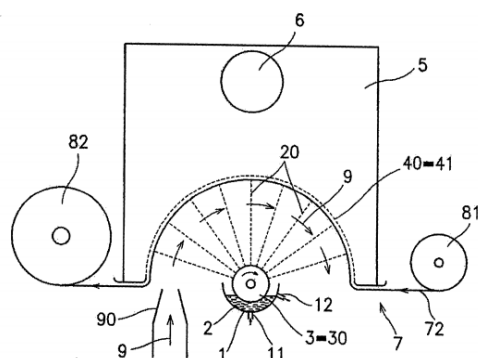
Obr. 3 Elektrostatické zvlákňování [Kuželová Košťáková, 2018]

Elektrostatické zvlákňování je samoorganizovaný proces. Probíhá v elektrostatickém poli při napětí v řádu kilovoltů. Roztok polymeru je v kontaktu s nabíjenou elektrodou. Je dávkován v tenké vrstvě na povrch, kde nejprve tvoří kapku. V kapce se orientují makromolekulární řetězce a na jejím povrchu se hromadí náboj. Jakmile jsou povrchové síly polymeru překonány, kapka se vytahuje směrem k elektrodě. Vzniká Taylorův kužel. Když je kapalina dostatečně viskoelastická, nedochází k rozpadu proudu na kapky vlivem povrchového napětí. Následuje krátká stabilní zóna proudu, která se zužuje a dochází k vypařování rozpouštědla, v nestabilní zóně dochází k rotaci polymerního proudu, takzvané bičování. Následně nanovlákna dopadají na kolektor, opačnou elektrodu [Yarin, Pourdeyhimi, Ramakrishna, 2014].

2.2.1 Nanospider

Katedra netkaných textilií a nanomateriálů vyvinula stroj pro kontinuální výrobu nanovláken Nanospider [Jirsák et al., 2004] a firma Elmarco jej začala vyrábět.

V první generaci Nanospideru byl zvlákňovací elektrodou váleček brodící se v polymerním roztoku, a na jeho povrchu docházelo ke vzniku Taylorových kuželů. Poté byla technologie vylepšována a dnes se používá struna, na kterou je dávkováno malé množství polymeru. Takto nedochází ke změně roztoku v průběhu zvlákňování a vyráběná vrstva je homogennější.



Obr. 4 Schéma stroje Nanospider [Jirsák et al., 2004] a Obr. 5 Dnešní podoba stroje Nanospider se zvlákňovací strunou [Elmarco, nedatováno a]

Parametry zařízení jsou používané napětí, vzdálenost elektrod, materiál a rychlost odtahu podkladu. Proces ovlivňují parametry prostředí (teplota, vlhkost), materiálu (roztok, vodivost, povrchové napětí, molekulová hmotnost polymeru, atd.) [Elmarco, nedatováno b].

2.2.2 Nanovláknenné filtry

Počátky byly položeny se submikronovými průměry skelných vláken, ale jejich výskyt byl víceméně nahodilý a tato vlákna skla jsou více náchylná k degradaci. Jako první se objevily „filtry s nanovláknem“. Uvozovky jsou namístě, protože filtry sice prokazatelně nanovláknem obsahovaly, ovšem v takové míře a struktuře, že nepřispívaly k účelu výrobku. S rozvojem kontinuální výroby nanovláken se rozvíjely i aplikace, a tak se začaly využívat nanovláknenné vrstvy funkčně, nejen jako marketingový slogan. Nevýhodou je nutnost ochrany vrstvy vůči mechanickému poškození, a to je předmětem aplikovaného výzkumu.

Ve Spojených státech amerických se vzduchovými filtry s nanovláknem zabývá firma Donaldson od 80. let minulého století. Dnes je prodává pod obchodní značkou Ultra-Web, mezi výrobky patří automobilové filtry a filtry pro klimatizační jednotky [Donaldson, 2019].

V České republice se filtrací zabývá například firma Pardam, která vyrábí nanovláknem především odstředivou technologii. Mezi jejich výrobky patří respirátory a membrány pro kapalinovou filtraci v potravinářství [Pardam, 2019]. Další českou firmou je Nanovia, nabízí výrobky pro použití v klimatizačních jednotkách a pro vysavačové filtry, chirurgické roušky a bariéry proti alergenům (roztočům) [Nanovia, 2016]. Také Elmarco, firma která se zabývá strojním zařízením pro elektrostatické zvláknění, vyvinula laminovaný filtr [Elmarco, 2013]. Firma Nafigate vyvinula síť do oken [Nafigate Nanocleaner, 2019].

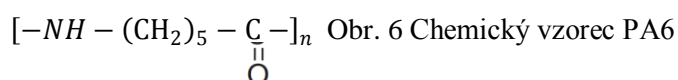
Z publikovaných vědeckých článků o nanovláknem ve vzduchové filtraci bylo zjištěno, že probíhá výzkum použitelných polymerů a jejich funkcionalizace [Sundarrjan et al., 2014]. Výzkumem polyamidu 6 a vzorováním výroby nanovláknenných vrstev se zabývali [Matulevicius et al., 2014]. S PA6 pracovali i [Zhang et. al, 2017], kteří vyvinuli filtr s výslednou efektivitou 99.996% pro velikost částic 300-500 nm.

Na TUL probíhá výzkum mnoha vývojových i aplikačních směrů nanovláken. Tato práce navazuje na projekt Technologické agentury ČR řešitele J. Hruzy, který byl zakončen mimo jiné „Prototypem filtru s obsahem nanovláken pro částicovou filtraci“ [Hruza a Hanuš, 2013].

2.3 Charakterizace materiálů

2.3.1 Polyamid 6

Polyamid 6 je termoplastický polymer. Vyrábí se polykondenzací kaprolaktamu.

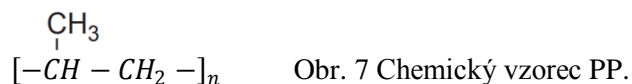


Polyamidy jsou první užívaná syntetická vlákna.. V Československu se jeho syntézou zabýval Otto Wichterle, rozšířil se název silon, obdoba západního nylonu (DuPont Nylon 6,6 1931 [Yarin, Pourdeyhimi, Ramakrishna 2014]). Ve stejné době se touto syntézou zabýval v Německu Paul Schlank. Polyamid dnes vyrábí například firma BASF, nabízí ho pod obchodním názvem Ultramid B24.

Teplota tání PA6 je 220 °C a skelný přechod nastává při 50°C. Hustota je 1 140 kg/m³. Limitní oxidační číslo je 20,1%. Je odolný vůči alkáliím a zředěným kyselinám. Mezi jeho přednosti patří dobré mechanické vlastnosti, zejména odolnost vůči oděru, pružnost, díky malé bobtnavosti se snadno pere a rychle schne. Na světle degraduje, první známkou je žloutnutí. [Militký, 2012]

Ultramid B24 se zpracovává tavným zvlákňováním, jedná se o klasické textilní vlákno. Polymer má nízkou viskozitu, umožňuje vysokorychlostní výrobu, je UV stabilizovaný, odolný vůči opotřebení. Používá se pro plavky, sportovní oblečení, spodní prádlo. [BASF, 2011]

2.3.2 Polypropylen



Polypropylen je termoplastický polyolefin. V průmyslu používá izotaktický izomer, který se vyrábí řetězovou koordinační polymerací propenu za pomoci Ziegler-Nattových katalyzátorů. Jeho krystalinita se pohybuje do 67 %, většinou se vyskytuje 60%, teplota tání je 170°C, tepelná odolnost do 100°C, hustota 910 kg.m⁻³.

PP je elektricky nevodivý, hydrofobní, úhel smočení vodou se pohybuje okolo 100°. Má vysokou odolnost vůči chemikáliím i za zvýšené teploty, odolává dlouhodobé přítomnosti olejů. Rozpouští se v aromatických uhlovodících. Nižší odolnost má proti oxidačním činidlům. Je minimálně navlhavý, odolný proti oděru, není odolný vůči mrazu (T_g -15°C) a degraduje vlivem UV záření. Limitní oxidační číslo má 17-19 % O₂, více se taví, než hoří [Wypych, 2016].

Používá se v širokém spektru aplikací. Vlákna pro netkané textilie i funkční oblečení, folie a obalové materiály, obaly v potravinářství, součást automobilových dílů, septiky, trubky. Je levný. Při filtraci se uplatní především díky pevnosti, chemické stabilitě. Při použití v kombinaci s polyetylenem slouží nížetající PE jako pojivo.

PP lze zpracovávat tavným zvlákňováním, technologiemi spunbond i meltblown. Staplová vlákna se získají nastříháním (nebo natrháním) kabelů a jsou zpracovány klasickými textilními technologiemi. U netkaných textilií se používá zejména mykání s následným vpichováním.

2.3.3 Sklo

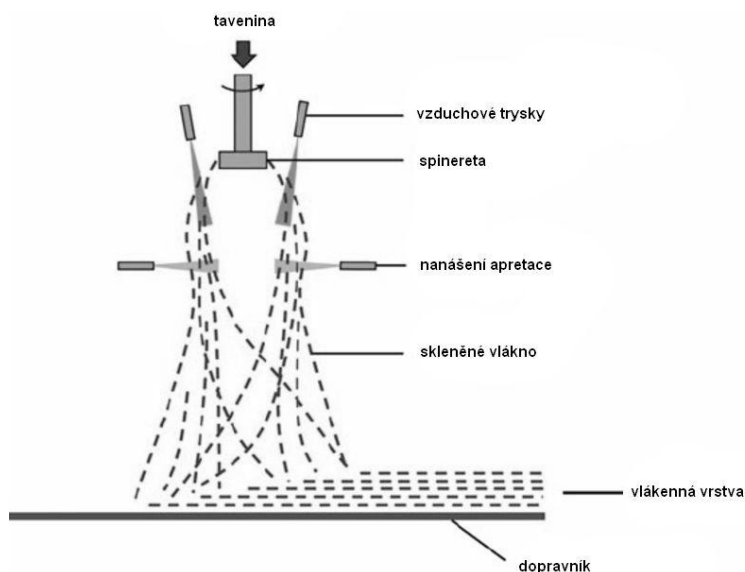
Sklo je anorganický materiál s téměř amorfní strukturou. Hustota je asi $2\,400\text{ kg/m}^3$. Nejčastěji zastoupené je e-sklo, které pro výrobu vláken neobsahuje oxid boritý, což má vliv na menší viskozitu taveniny i nižší cenu. Obsahuje oxid křemičitý (59 %), vápenatý (22,6 %), hlinitý (12,1 %), hořečnatý (3,4 %) a malé množství oxidu sodného, draselného a železitého [Jones a Huff, 2009].

Sklo je nehořlavé, nevodivé, odolné vůči vlhkosti a chemikáliím, zejména kyselinám. Vlákna jsou s menším průměrem ohebnější, klesá odolnost vůči chemikáliím. Nejsou odolná vůči dlouhodobému statickému namáhání. Lom je křehký. Vyrábí se tavným zvlákňováním a následným zpracováním ve vrstvu, nebo výrobou staplových vláken, které se dále zpracovávají zejména naplavováním. Další technologií je tvorba vrstvy odstředivým zvlákňováním.

2.4 Technologie přípravy a modifikace filtračních vláknenných vrstev

2.4.1 Odstředivé zvlákňování

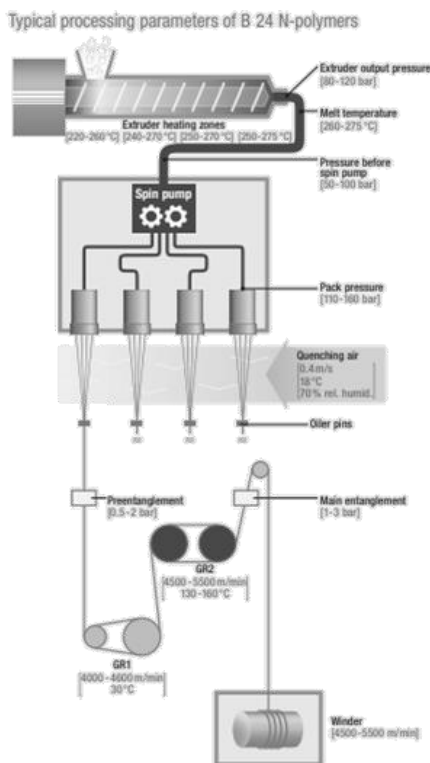
Odstředivé zvlákňování je technologie výroby cukrové vaty, minerálních vláken, a dnes i nanovláken. Využívá odstředivých sil vznikajících na rotující spinneretě, což je zásobník s otvory, či jehlami po obvodu, v některých případech stačí rotující disk. Do spinnerety se dávkuje tavenina o teplotě kolem 1000°C (v případě skla), rotací se vytlačují vlákna, která jsou vzduchovými tryskami strhávána na dopravník, kde může být pokladová textilie. Vlákna mají délku několik centimetrů s průměrem pod $10\text{ }\mu\text{m}$ (v případě skla). V průběhu letu rychle chladnou a je nanášena apretace. Vrstva s náhodným uspořádáním vláken pokračuje do pece, kde se vysuší apretace [Jones a Huff 2009].



Obr. 8 Schéma odstředivého zvlákňování. Upraveno podle [Zhang, 2014]

2.4.2 Tavné zvlákňování

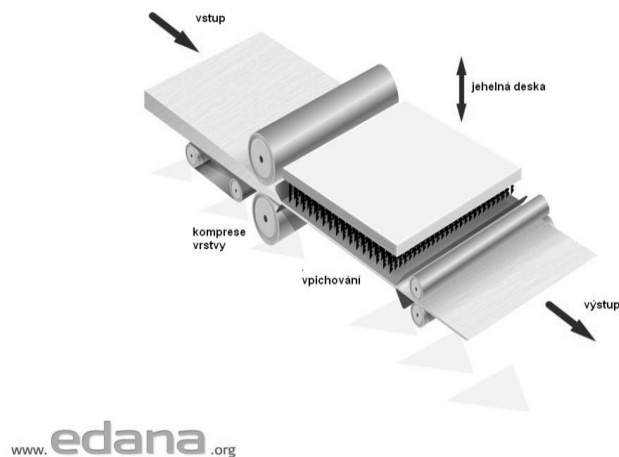
Tavné zvlákňování je proces výroby syntetických vláken. Průměry vláken jsou v mikrometrech, ovlivňuje se především průměrem zvlákňovacích trysek, viskozitou taveniny a aditivy. Probíhá postupným roztavením pelet plastu v extrudéru. Vzniklá tavenina je dávkována do zvlákňovací hlavy, kde je protlačována otvory. Vlákna jsou ofukována studeným vzduchem, může se nanášet sizing. Probíhá dlužení a nakonec jsou vlákna navijena na cívky. Pro výrobu staplových vláken následuje operace trhání, nebo řezání.



Obr. 9 Tavné vlákňování PA6 [BASF, 2011]

2.4.3 Vpichování

Vpichování je mechanická technologie zpevňování vlákenné vrstvy, připravené nejčastěji mykáním staplových vláken. Jeho podstatou je provazování vláknů z vrstvy, které jsou přeorientovány v důsledku průniku jehel s ostny. Soudržnost je zajištěna třením mezi vlákny. Vlákenná vrstva je přiváděna podávacím zařízením, které vrstvu zároveň ztenčuje. Následuje část pracovního ústrojí, kde se mezi dvěma perforovanými rošty se pohybují jehly s vpichovacími ostny. Jsou uloženy v jehelné desce, která se pohybuje periodicky nahoru a dolů a proniká kolmo vlákennou vrstvou a přeorientovává zachycená vlákna. Vrstva je vedena po opěrném roštu a stěrací rošt zajišťuje, že se jehly vysunou z vrstvy. Výstupem je zpevněná vlákenná vrstva. Pevnost závisí především na počtu vpichů na jednotku plochy a hloubce vpichu [Jirsák a Kalinová, 2003].



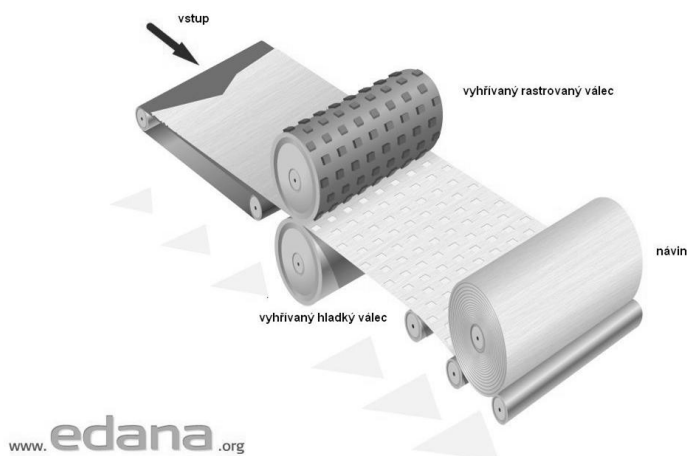
Obr. 10 Vpichování. Upraveno dle [Edana, nedatováno]

2.4.4 Kalandrování

Kalandrování je technologie termického zpevňování vláknenné vrstvy, která probíhá mezi dvěma válci. Tam dochází k ohřátí a přitlačení vrstvy. Obvykle se pojí vrstvy o plošné hmotnosti 10-100 g/m² [Jirsák a Kalinová, 2003].

Často se používá v dokončovací operaci při výrobě spunbondu, který prochází mezi 2 vyhřívanými válci, z nichž jeden je rastrovaný (Obr.11). Vzniká typická struktura natavených vláken v místech vzoru válce.

Kalandrování bylo použito při dokončování výroby polypropylenového základního materiálu, a to pro upravení jedné strany vrstvy, pouze 1 válec byl vyhříváný.



Obr. 11 Kalandrování. Upraveno podle [Edana, nedatováno]

2.4.5 Spunbond

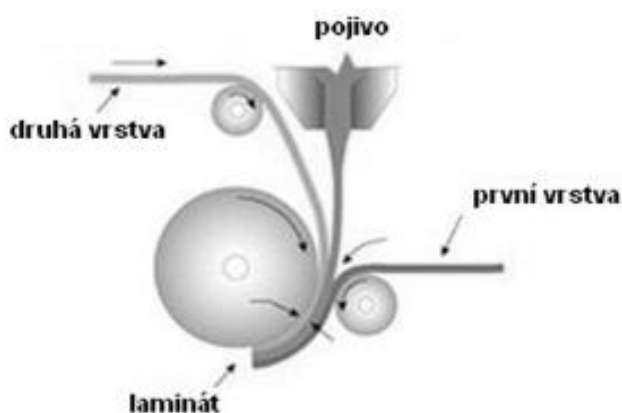
Spunbond je vysoce produktivní technologie výroby NT. Tavenina polymeru je zvlákňována jako při tavném zvlákňování, vlákna dopadají na pohybující se dopravník, vrstva je zpevněna a navíjena. Nejčastěji se používá polypropylen, méně polyester, v principu lze zvláknit každý tavitelný lineární vláknovný polymer.

Tavení polymerního granulátu probíhá v extrudéru. Následuje zvlákňování pod hubicí, protlačování skrz zvlákňovací trysku, odkud jsou vlákna odtahována gravitační silou (v dlouhé šachtě), nebo vzduchovou tryskou, nebo mezi galetami. Vlákenná vrstva vzniká na dopravníku, kam se nekonečná vlákna přímo ukládají. Zvlákňovací hlava má plnou šíři stroje., případně ukládání pomáhají výkyvné mechanismy. Zpevnění probíhá vzájemným slepením nevychladlých vláken, nebo chemicky, tepelně, nebo vpichováním [Jirsák a Kalinová, 2003].

2.4.6 Laminování

Laminování je dokončovací operace, slouží ke spojení více vrstev materiálu. Obvykle se používá za účelem modifikace vlastností jako je prodyšnost, propustnost, stabilita rozměrů nebo povrchových vlastností. Může probíhat za sucha, nebo mokra, tedy z rozpouštědlového systému, který obvykle přináší větší ekologickou zátěž a nutnost sušení.

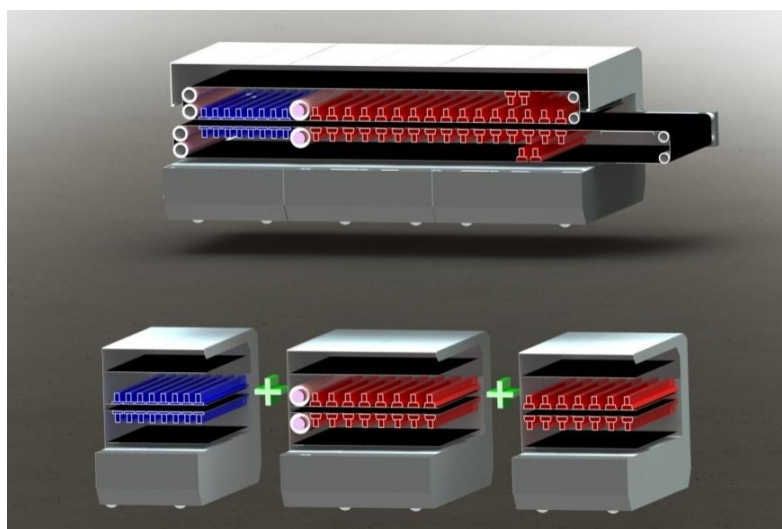
Laminování za sucha probíhá pomocí termoplastického adheziva za zvýšené teploty nejčastěji mezi 75 a 200°C a přítlaku. Vzniká kompozitní materiál, laminát. Tlak je použit pro přiblížení materiálů k sobě, nikoliv k velkým trvalým deformacím na základních materiálech [Russel, 2007]. Pro pojení vlákných syntetických materiálů je nutné zohlednit teplotu tání všech používaných materiálů a vhodně zvolit pojivo i teplotu.



Obr. 12 Obecné schéma laminace pomocí válců. Pojivo je ve formě taveniny. Upraveno podle [Patidar, 2015]

V případě laminování se využívá stejných technik jako při termickém pojení, ovšem pro filtry se nehodí použití nadbytku pojiva a využití koheze, protože dochází ke ztrátě prodyšnosti a funkce vrstev. Je nutné optimalizovat parametry, aby nedocházelo k přílišné redukci pórů.

Jednotlivé vrstvy jsou přiváděny ke stroji a jsou navrstveny na sebe. Potom se vrstvy v první zóně přehřívají, pak dochází k natavení pojiva a samotnému pojení. Třetí částí je chladicí zóna. V průmyslu se používá kontinuální výroba, buď se zařízením s temperovanými, nebo nevyhřívávanými válci, kalandrem, nebo laminační linkou (obr. 13). V malém měřítku lze využít nízkotlaké lisování, které bylo použito i v této práci, parametry byl simulován laminační stroj.



Obr. 13 Laminovací stroj. Zprava přichází materiál do zóny přehřívání, pojení a chlazení
[Reliant machinery, nedatováno]

2.4.6.1 Pojiva

Pro laminování se používají pojiva v různých formách, např. mřížky, prášky, vlákenné vrstvy (dále bude tento pojem nazýván pavučiny) či ve formě taveniny (hot-melt) v nánosu bodovém, vzorovaném (nebo plošném). Při použití vlákenných materiálů se tento výčet rozrůstá o bikomponentní vlákna a směsi vláken ve vrstvě. Cílem je vytvořit aglomerační spoje, nevzniká souvislý film pojiva. Při použití bikomponentních vláken vznikají bodové spoje [Jirsák a Kalinová, 2003].

Důležitým parametrem je teplota pojení a stabilita ostatních používaných materiálů při této teplotě. Je nutné zohlednit adhezi používaných materiálů včetně používaných apretací z předchozí výroby.

Nejpoužívanějšími materiály jsou polyamidy, polyestery a kopolymery, polyolefiny a polyuretany. Viskozita taveniny při pojení ovlivňuje průnik pojiva do dalších vrstev.

Další možností pojení je ultrazvukem, energie kmitavého pohybu taví termoplastický podíl ve vrstvách. Není nutné přidávat další pojivo při použití tavitelných základních materiálů, což je velkou výhodou [Jirsák a Kalinová, 2003]. Laboratoř tímto strojem nedisponuje, a tak v této práci nemohlo být použito.

Při výrobě nanovlákné vrstvy se nabízí zvláknovat rovnou na předfiltr coby podkladovou textilií. Tato metoda vyřeší spojení předfiltru s nanovláknou, ovšem neposkytuje ochrannou krycí vrstvu pro nanovlákná. Navíc se nehodí pro vzorování.

2.4.7 Princip měření efektivity zachytu

MFP 1000 HEPA od německé firmy Palas je spektrometrický přístroj pro testování malých, především plochých, filtrů. Snímá částice prošlé materiálem, vyhodnocuje jejich počet a velikost pomocí optického detektoru. Částice jsou buď emulze dietylhexylsebakátu (DEHS), nebo aerosol NaCl, případně KCl. DEHS je vysoce viskózní bezbarvá nezapáchající kapalina, která se používá pro tvorbu pevného aerosolu. Velkou výhodou je vypařování ze vzorku (částice o velikosti 300 nm se vypaří za 4h) a tím pádem nedochází ke znehodnocování vzorků [Palas, 2016].

Částice jsou vzduchem hnány danou rychlostí skrz testovaný materiál, který je ukotven pomocí pneumatického držáku. Pak je vzduch definovaně zředěn tak, aby optický počítač částic mohl zaznamenat jednotlivé částice a jejich velikost. Určí je na základě jejich průletu paprskem, který částečně blokuje. Fotodetektor zaznamená pokles signálu a na základě jejich počtu je zjištěn počet částic a z amplitudy signálu velikost. Průtok částic musí být nízký a kapalina vysoce čistá.

Přetížení kontroluje software FTC, taktéž vyhodnocení. Získané informace o distribuci velikostí prošlých a zachycených částic jsou zpracovány v účinnost zachytu, která se nejčastěji vyhodnocuje pro nejhůře zachytitelné částice E_{MPPS} a dále podle norem. Rozsah částic je od velikosti 120 nm do 3 μ m, což znamená malou odchylku od normy ČSN EN 1822, která zohledňuje částice od 100 do 300 nm.

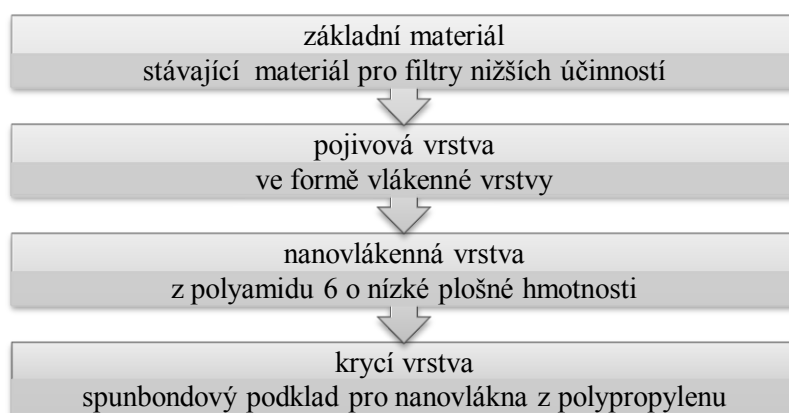
3 Praktická část

Cílem této práce je zlepšit filtrační účinnost vzduchových filtrů (tříd G a M dle ČSN EN 779) laminací nanovlákné vrstvy o nízké plošné hmotnosti s ohledem na zachování prodyšnosti. Práce na experimentu probíhala v laboratoři filtrace na CxI. Při realizaci byl kladen důraz zejména na parametry laminace a materiály filtru.

Praktická část je rozdělena na hlavní kapitoly Materiály, Používané přístroje, Příprava vzorků, Hodnocení vyrobených nanovlákných filtrů a Testování stability vybraného vzorku.

3.1 Materiály

Vyvíjený filtr má vícevrstvou konstrukci. Základem je komerčně používaný filtr, který se samostatně používá pro vzduchovou filtraci nižších kategorií. Dle starší normy ČSN EN 779 jsou to třídy G a M, dle nové ČSN EN ISO 16890 jsou to ISO ePM1 70% a ISO ePM2,5(<50%). To znamená méně, než 50% účinnost zachytu částic do 2,5 mikrometru. Další vrstvou je pojivo ve formě pavučiny o nízké plošné hmotnosti a hlavní filtrační vrstvou jsou nanovlákná, která byla zvláknována na spunbondový poklad, který zároveň funguje jako jejich ochranná vrstva.



Obr. 13 Znárodnění konstrukce filtru. Směr proudění vzduchu představují šipky.

Tab. 4 Seznam použitých materiálů

Typ	Funkce	Forma	Označení
Základní materiál	tvoří předfiltr pro účinnější vrstvu	Vpichovaná NT	VP
		NT z odstředivě zvlákněného skla	SK
		Podkladová spunbond textilie spojená se skelnou NT adhezí při výrobě	společně s předchozí
Pojivo	spojuje předfiltr s účinným filtrem	Monokomponentní vlákenná vrstva	coPA
		Monokomponentní vlákenná vrstva	coPES
		Bikomponentní vlákenná vrstva	biko

Typ	funkce	Forma	Označení
Nanovláknna	tvoří hlavní filtrační vrstvu	Nanovláknenná vrstva	03/05
Krycí vrstva	zajišťuje ochranu nanovláken	Podkladová vrstva nanovláken spojená adhezí vzniklou při výrobě	společně s předchozí

Tab. 5 Parametry použitých materiálů

Označení	Materiál	Plošná hmotnost (g/m ²)	Průměr vláken (μm)
VP	Polypropylen	320	12,7
SK	Sklo	80	2,0
s předchozí	Polyester	s předchozí	30
coPA	Kopolyamid	10	45
coPES	Kopolyester	8	20
biko	Polypropylen a polyetylen	18	15
03/05	Polyamid 6	vzorování 0,3-1,1	0,1
s předchozí	Polypropylen	20	desítky

3.1.1 Základní materiály

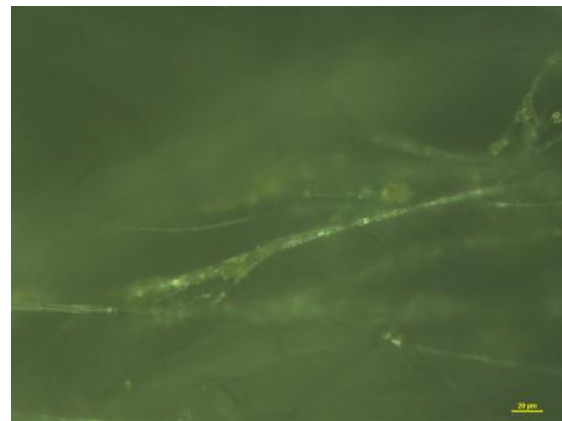
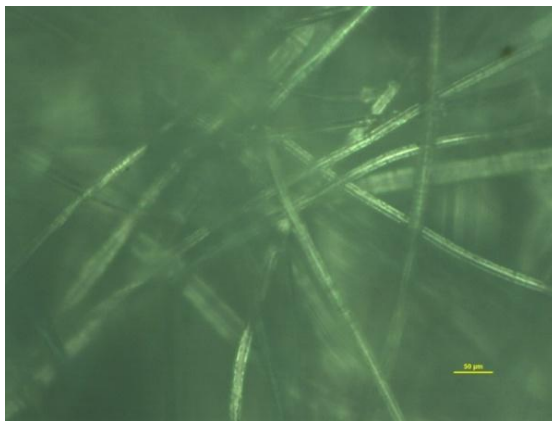
Pro experiment byly vybrány 2 základní materiály komerčně používané k filtraci vzduchu. Netkaná textilie dodaná firmou Gea je připravená technologií odstředivého zvláknování skla, která se běžně používá pro filtraci v budovách, je vhodná pro filtraci (středně) jemného prachu. Patří do třídy M6 podle ČSN EN 779 v případě přísného hodnocení. V jednom měření hodnota efektivity zachytu pro velikost částic 0,4 μm poklesla pod 80%, i když celkový průměr zůstal v kategorii o třídu vyšší, tedy F7. Tato textilie byla vybrána pro časté zastoupení ve filtračních zařízeních, kde se používá zejména pro svou životnost. Spodní strana filtru je zpevněna polyesterovou podkladovou textilií typu spunbond pojenou rastrovaným kalandrem. Průměr vláken je asi 30 μm.

Jako druhý materiál byla vybrána netkaná textilie z firmy Mitop vyrobená ze staplových polypropylenových vláken, zpevněná technologií vpichování, s jednou stranou termicky pojenou kalandrem. Používá se pro filtraci hrubého prachu kategorie G3 podle ČSN EN 779. Termoplasty jsou ve filtraci konkurentem sklených vláken, jsou obecně levnější s nižší odolností.



Obr. 14 a Obr. 15 Základní materiály. Ve spodní části je lícová strana, v horní části je rub. Nalevo je vpichovaný polypropylenový filtr, napravo je filtr ze skla s pokladovou textilií vyrobenou technologií spunbond.

K jejich charakterizaci byla provedena obrazová analýza, byly změřeny průměry vláken. Zároveň pohled mikroskopem identifikoval technologii výroby skleněného materiálu, s typickými vadami na vláčknech, které vznikají při odstředivém zvlákňování.



Obr. 16 Polypropylenová vlákna s měřítkem 50 μm a Obr. 17 Skleněná s měřítkem 20 μm .

Průměr PP vláken je $12,72 \pm 2,48 \mu\text{m}$, skleněná vlákna mají $2,04 \pm 0,70 \mu\text{m}$. Měření proběhlo za použití optického mikroskopu Nikon a softwaru NIS Elements.

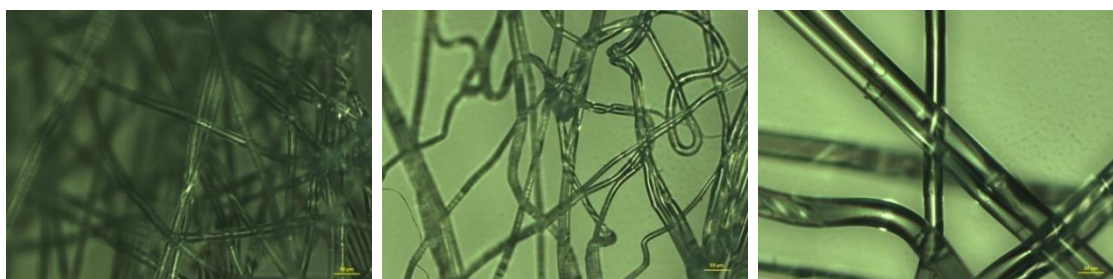
3.1.2 Pojiva

Jako pojivo byly vybrány 3 vlákenné vrstvy. Bikomponentní pavučina z vláken typu jádro-plášť z polypropylenu a polyetyleny v poměru 4:1 o plošné hmotnosti 18 g/m^2 od firmy PFNonvovens

(dříve Pegas), dále pavučina z kopolyesteru o plošné hmotnosti 8 g/m² od firmy Protechnic a kopolyamidová pavučina PA1203 o plošné hmotnosti 10 g/m² od firmy Spunfab.



Obr. 18 a Obr. 19 a Obr. 20 Pohled na pavučiny pojiva. Zleva PP/PE, coPES, coPA.



Obr. 21 a Obr. 22 a Obr. 23 Mikroskopický pohled na pavučiny pojiva. Zleva PP/PE, coPES, coPA. Měřítko 50 μm. Průměr vláken jednotlivých vrstev je orientačně 20 μm, 15 μm a 45 μm.

3.1.3 Nanovlákná

Nanovláknenná vrstva byla zvolena z polyamidu 6. Má nízké průměry vláken a jeho zvlákňování je dobře prozkoumané, což umožňuje výrobu homogenních vrstev. PA6 byl použit k předchozímu testování [Hrůza, 2005]. Volba vrstev nízkých plošných hmotností navazuje na předchozí výzkum [Hanuš a Hrůza, 2013] a konkrétní výběr probíhal na základě měření prodyšnosti a efektivity zachytu. Předmětem experimentu je zachování vhodných filtračních vlastností, především prodyšnosti.

Nanovláknenná vrstva byla vyrobena na stroji Nanospider 1WS500U technologií kontinuálního bezjehlového elektrostatického zvlákňování. Nanovlákná byla zvlákňována z roztoku na polypropylenový spunbond o plošné hmotnosti 20 g/m² s antistatickou úpravou.

3.2 Používané přístroje

3.2.1 Lis

Pro spojení dílčích vrstev filtru byl použit hydraulický lis HVL 150 s vyhřívanými deskami. Variabilní parametry jsou teplota, tlak a čas. Na lisu byly zvoleny následující podmínky. Tlak

byl nastaven co nejmenší, aby nedošlo k poškození nanovláken. Při využití průmyslových laminovacích strojů nebývá aplikován vyšší přítlak. Vzorky byly chráněny vložením mezi pryžové podložky, což je metoda, která se v laboratoři filtrace osvědčila. Rozmezí teplot bylo zvoleno vzhledem k materiálům tak, aby pojivová vrstva pojila a ostatní materiály se netavily a zejména nesrážely. Čas byl nastaven konstantní, 1 minuta postačuje k prohřátí vzorku a podobá se průmyslové výrobě při použití laminovací linky. Lis je zobrazen na Obr. 24.

3.2.2 Měření prodyšnosti

Měření prodyšnosti všech vzorků probíhalo na přístroji SDL ATLAS M02IA. Přístroj je zobrazen na Obr. 25. Testovaná plocha byla 20 cm² za tlakového spádu 200 Pa dle normy ČSN EN ISO 7231. Postup spočíval ve vložení vzorku nad měřící prostor, ukotvení pomocí upínací hlavy, které spouštělo samotné měření množství vzduchu před a za textilií za stanovených podmínek.

Důležité je, aby vzduch proudil vzorkem kolmo na plochu a nedocházelo k obtékání, které znemožňuje porovnání dat kvůli nerovnoměrnému proudění vzduchu. Plocha vzorku byla rovnoměrně proměřena. Výsledek je uveden s jednotkou l/m²s.



Obr. 24 Lis a Obr. 25 Přístroj na měření prodyšnosti

3.2.3 Testování jemné filtrace atmosférického vzduchu

Pro měření účinnosti záchytu byl použit přístroj Palas MFP 1000 HEPA s diagnostickým softwarem FTC. Aerosol DEHS byl rozprašován v částicích o velikosti od 120 nm do 2,5 μm.

Před každým měřením probíhala kalibrace přístroje, kdy test proběhnul bez vzorku. Poté se nastavilo optimální ředění vzduchu tak, aby optický počítač částic dokázal odlišit jednotlivé částice (při nedodržení této podmínky bylo nutné nastavit větší definované ředění vzduchu a test

opakovat). Následovalo vložení vzorku nad kruhový otvor o ploše 100 cm² a zajištění. Pomocí softwaru byl spuštěn test a aerosol DEHS byl rozprašován na testovaný vzorek.

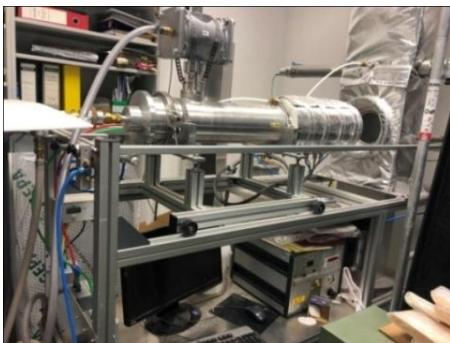
Počet a velikost prošlých částic byl zaznamenáván. Na tomto základě byla zjištěna efektivita zachytu filtru, především nejhůře zachytitelných částic E_{MPPS} a další charakteristiky. Hodnocení probíhalo především na základě norem pro vzduchovou filtraci, konkrétně ČSN EN 1822. Zároveň byl měřen i tlakový spád na externím měřiči s rozsahem 0-2000 Pa (z důvodu poruchy interního tlakoměru). Nárůst tlaku je také nutné zohledňovat, a to zejména pro použitelnost filtrů.



Obr. 26 a Obr. 27 Přístroj MFP 1000 HEPA a detail záobníku DEHS

3.2.4 Simulace namáhání filtru prouděním vzduchu

Vybraný vzorek filtru s nejlepšími vlastnostmi byl namáhán prouděním vzduchu. Pro simulaci byl použit přístroj VDI 3926 Filter Tester, primárně určený pro testování filtrace horkých spalin. Pro tuto práci byl použit v režimu profukování vzorku vzduchem při laboratorní teplotě 20°C, které probíhalo průtokem čistého vzduchu o rychlosti 5 cm³/s po dobu 1 hodiny. Přístroj simuloval průtok pomocí 2 ventilátorů. Nebyly přidávány žádné částice.



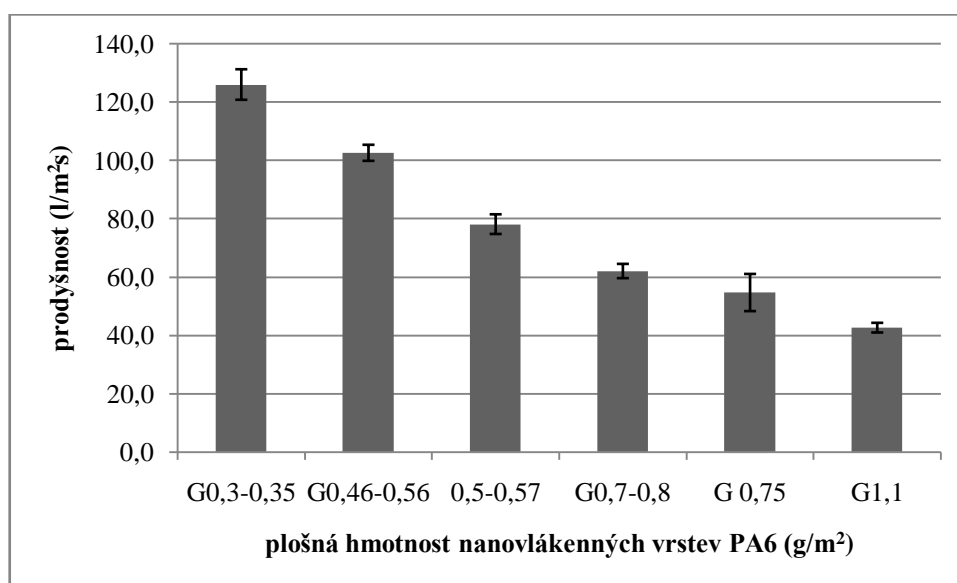
Obr. 28 a Obr. 29 Přístroj a detail držáku uchycení filtru.

3.3 Příprava vzorků

3.3.1 Výběr nanovláknenné vrstvy

Spodní hranicí vyrobiteľnosti je plošná hmotnosť približne $0,1 \text{ g/m}^2$, ale stále vykazuje veľkou variabilitu. Od $0,3 \text{ g/m}^2$ je vrstva dostatečne homogénna a stabilná. I tak je nutné presne kontrolovať parametre roztoku a priebeh zvlákňovania. Roztok je preto ve stroji maximálne hodinu.

Hornú hranicu plošnej hmotnosti pre experiment bola hodnota $1,1 \text{ g/m}^2$. Výber dvoch plošných hmotností nanovláknenné vrstvy probíhal na základe merení vstupných parametrov, prvým bolo merenie prodyšnosti. Odlišné plošné hmotnosti vrstev vycházely z aplikácie na dva odlišné základní filtry. Měření prodyšnosti bylo provedeno rovnoměrně po ploše vzorků.



Graf 1. Měření prodyšnosti nanovláknenných vrstev s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.

Vzhľadom k aplikácii s predfiltrami relatívne nízkych tried boli vybrány vzorky s vyššou prodyšnosťou. Vyřazeny tak byly 2 nanovláknenné vrstvy s plošnou hmotnosťou $0,75$ a $1,1 \text{ g/m}^2$ z dôvodu malej prodyšnosti ve srovnání s vrstvou o nejmenší plošné hmotnosti ($0,30\text{-}0,35 \text{ g/m}^2$).

Poté se přistoupilo k měření na přístroji Palas, kde byla zjištěna efektivita zachytu pro nejhůře zachytitelné částice. Na základě výsledků byly pro experiment zvoleny plošné hmotnosti $0,30\text{-}0,35 \text{ g/m}^2$ a $0,46\text{-}0,54 \text{ g/m}^2$. V měření vykazovaly vysokou účinnost zachytu a zároveň vysokou míru prodyšnosti. Konkrétní hodnoty jsou v Tab. 6.

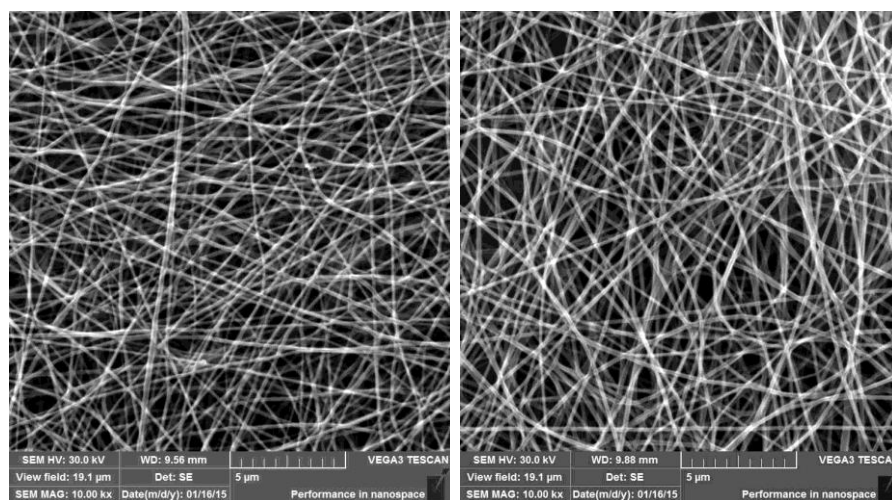
Tab. 6 Prodyšnost a účinnost záchytu nanovlákněných vrstev

Plošná hmotnost (g/m^2)	0,30-0,35	0,46-0,54	0,5-0,57	0,7-0,8	0,75	1,1
Prodyšnost průměr ($\text{l/m}^2\text{s}$)	126,0	102,6	78,1	62,0	54,7	42,6
s ($\text{l/m}^2\text{s}$)	5,2	2,75	3,38	2,45	6,37	1,66
$E_{\text{MPPS}}(\%)$	90,67	96,11	97,86	99,54	X	X

3.3.2 Parametry nanovláken

Vybrané 2 vrstvy byly vyrobeny zvlákňováním z roztoku 12% PA6 ve směsi kyseliny octové a mravenčí v poměru 2:1, který byl postupně dávkován na strunu v elektrostatickém poli za rozdílu potenciálů 70 kV, při vlhkosti vzduchu 23 % ($0,30-0,35 \text{ g/m}^2$) nebo 27 % ($0,46-0,54 \text{ g/m}^2$). Rychlost odtahu materiálu byla 190 a 140 mm/min. Elektroda a kolektor byly vzdáleny 175 mm.

Průměry nanovláken jsou u nižší plošné hmotnosti $111,4 \pm 17,4 \text{ nm}$ a vyšší $127,5 \pm 20,7 \text{ nm}$.



Obr. 30 a Obr. 31 Snímky nanovlákněných vrstev ze skenovacího elektronového mikroskopu.

Nalevo je nižší plošná hmotnost a napravo vyšší. [Klára Kučerová]

3.3.3 Parametry základní vrstvy

Prodyšnost a základní parametry byly změřeny i na základních materiálech. Jejich plošná hmotnost byla změřena na 8 vzorcích o velikosti $10,0 \times 10,0 \text{ cm}$. Norma pro netkané textilie stanovená Edanou, ČSN EN 29073-1 (806131) byla nahrazena z důvodu požadované velké plochy vzorků.

Tab. 7 Parametry základních vrstev

	VP	SK
Plošná hmotnost- průměr (g/m ²)	324	79
Prodyšnost- průměr (l/m ² s)	695,9	225,8
Směrodatná odchylka (l/m ² s)	46,6	32,5
Třída účinnosti dle ČSN EN 779	G3	M6

3.3.4 Laminace filtrů

Vzorky byly připravovány ručně nařezáním dílčích částí jednotlivých materiálů a následnou kompletací a laminováním. Vzhledem k parametrům lisu byla velikost vzorků 32x 32 cm.

Pro laminaci filtrů bylo zapotřebí připravit jednotlivé vrstvy vstupních materiálů. Z rolí vstupního materiálu byly ručně pomocí nožiku vyřezány čtverce za použití šablony a navrstveny na sebe v pořadí základní materiál, pojivo a nanovlákná vrstva na spunbondovém podkladu. Práce s nanovláknem byla maximálně opatrná.

Připravený materiál byl přemístěn k lisu. Obě desky byly temperovány. Vzorek byl vložen mezi dvě přehřáté pryžové gumy oddělené pečicím papírem od kovových desek lisu.

Laminace probíhala na lisu 1 minutu za tlaku desek 14 kN. Teplota byla zvolena 120 a 130 °C pro pojiva kopolyamid a kopolyester. Pro pojivo z PP/PE bylo vyzkoušeno rozmezí teplot 120-140 °C po 5°C intervalech. Při vyšší teplotě by docházelo ke srážení polypropyleny, při nižší teplotě nedošlo k roztavení pojiva. Nanovlákná adheze k podkladovému materiálu byla uznána jako postačující pro manipulaci a nebyla vylepšována. Průběžně byla tato adheze testována při měřeních a přesunech vzorků.

Tab. 8 Laminace vzorků s pojivem z kopolyamidu

Vzorek	Teplota (°C)	Tlak (kN)	Čas (min)
VP coPA 120	120	14	1
SK coPA 03 120	120	14	1
SK coPA 05 120	120	14	1
VP coPA 130	130	14	1
SK coPA 03 130	130	14	1
SK coPA 05 130	130	14	1

Laminace pojivem z kopolyamidu proběhla úspěšně za výše uvedených podmínek (Tab. 8).

Tab. 9 Laminace vzorků s pojivem z kopolyesteru

Vzorek	Teplota (°C)	Tlak (kN)	Čas (min)
VP coPES 120	120	14	1
SK coPES 03 120	120	14	1
SK coPES 05 120	120	14	1
VP coPES 130	130	14	1
SK coPES 03 130	130	14	1
SK coPES 05 130	130	14	1

Laminace pojivem z kopolyesteru proběhla úspěšně za výše uvedených podmínek.

Tab. 10 Laminace vzorků s pojivem z PP/PE bikomponentní pavučiny

Vzorek	Teplota (°C)	Tlak (kN)	Čas (min)	Úspěšnost pojení
VP biko 120	120	14	1	Ne
VP biko 125	125	14	1	Ne
VP biko 130	130	14	1	Ne
VP biko 135	135	14	1	Ano
VP biko 140	140	14	1	Ano
SK biko 03 120	120	14	1	Ne
SK biko 03 125	125	14	1	Ne
SK biko 03 130	130	14	1	Ne
SK biko 03 135	135	14	1	Ano
SK biko 03 140	140	14	1	Ano
SK biko 05 130	130	14	1	Ne
SK biko 05 135	135	14	1	Ano
SK biko 05 140	140	14	1	Ano

Pojení bikomponentní pavučinou bylo testováno od 120 °C, ke spojení všech vrstev došlo až při 135 °C. Se základní polypropylenovou vrstvou vznikly 2 vzorky, při 135 °C bylo spojení úspěšné, při o 5°C vyšší teplotě již začínalo docházet k natavování základního materiálu. Se skleněnou vrstvou bylo nakonec úspěšné pouze pojení při 135 °C s nanovláknem o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m², protože ostatní „úspěšné“ vzorky se po transportu k měřicím přístrojům rozpojily od základního materiálu, i když adheze nanovláken a pojiva byla dostatečná.

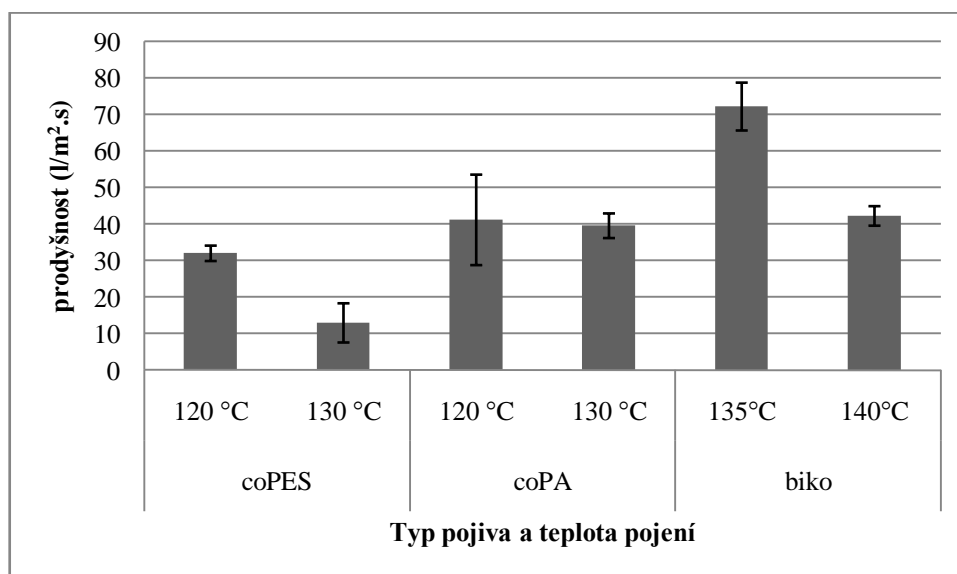
Po přípravě vzorků následovalo měření parametrů, tedy prodyšnosti a účinnosti zachytu filtru.

3.4 Hodnocení nanovlákného filtru na vpichované textilii

Základní materiál vpichované textilie z polypropylenu vykazuje sám nízkou filtrační efektivitu a řadí se do třídy zachytávající hrubý prach, konkrétně G3 podle normy ČSN EN 779. Proto bylo zlepšování efektivitu zachytu testováno pouze s nanovláknou o plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m².

Laminace probíhala s pojivem v podobě pavučiny kopolyamidu a kopolyesteru při teplotě 120 a 130 °C a bikomponentního PP/PE při teplotě 135 a 140°C.

3.4.1 Prodyšnost



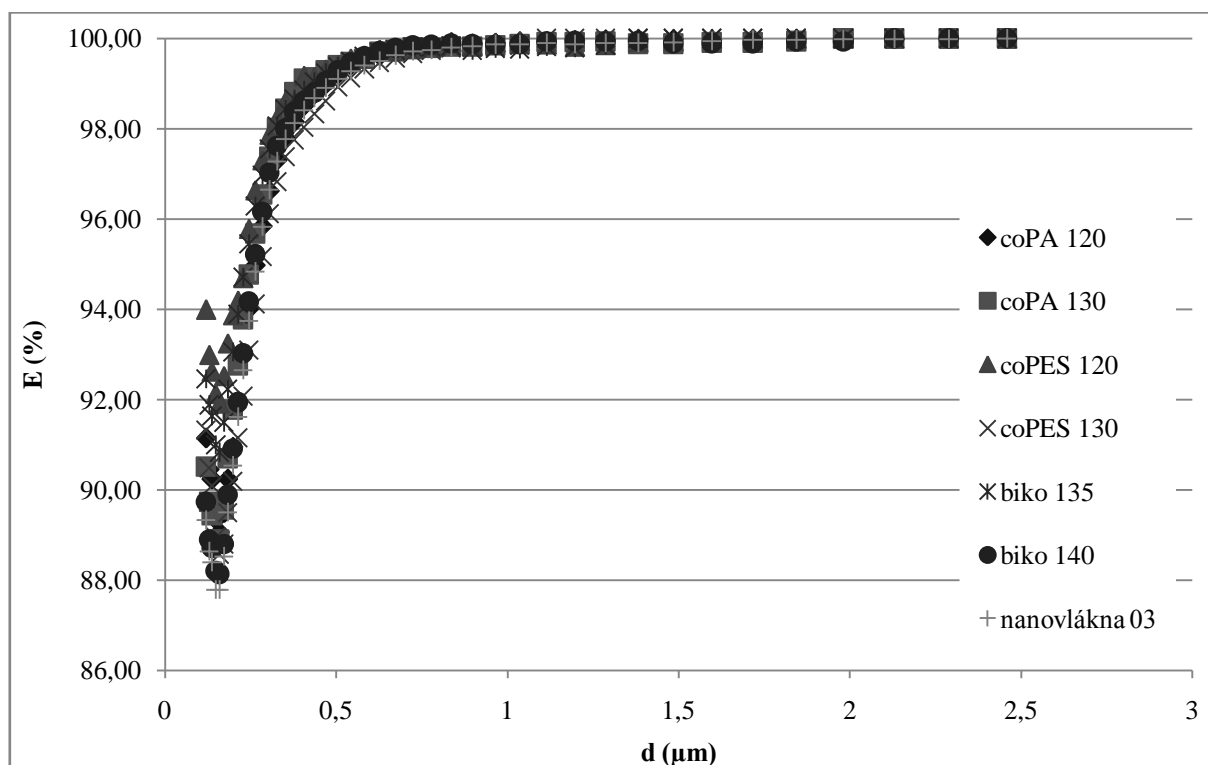
Graf 2 Prodyšnost filtrů ze základního materiálu PP s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.

3.4.2 Efektivita zachytu částic

Tab. 11 Měření efektivitu zachytu

Vzorek	počáteční tlak (Pa)	tlak na konci testu(Pa)	průměr E _{0,12-0,3μm} (%)	směrodatná odchylka (%)	průměr E _{0,3-1μm} (%)	směrodatná odchylka (%)	filtrační třída
VP	11,3	12,7	-	-	-	-	G3
nanovlákná 03	77,5	660,0	87,783	1,95	96,65	0,05	E10
biko 140	275,0	1030,0	88,136	0,31	97,02	0,33	E10
coPES 130	514,3	mimo rozsah	88,573	0,61	96,12	0,12	E10
coPA 130	300,0	1003,3	88,889	1,24	97,37	0,43	E10

Vzorek	počáteční tlak (Pa)	tlak na konci testu(Pa)	průměr $E_{0.12-0.3\mu\text{m}}$ (%)	směrodatná odchylka (%)	průměr $E_{0.3-1\mu\text{m}}$ (%)	směrodatná odchylka (%)	filtrační třída
coPA 120	257,3	821,0	89,071	0,97	96,63	0,49	E10
biko 135	161,0	363,3	90,830	1,81	97,55	0,70	E10
coPES 120	406,7	1949,7	91,919	5,06	97,87	1,34	E10



Graf 3 Efektivita záchytu jednotlivých vzorků pro různé velikosti zachytávaných částic.

3.4.3 Diskuze

Nejvyšší prodyšnost má filtr pojený za 135°C bikomponentním pojivem, za vyšší teploty již docházelo k natavování vláken a zmenšování pórů. V případě pojení kopolyesterem má situace stejný trend, celkově je prodyšnost ještě menší. Při pojení kopolyamidem je prodyšnost za obou teplot přibližně stejná, hodnoty se s úvahou směrodatných odchylek překrývají.

Hodnoty počátečního tlakového spádu filtru by měly být nepřímo úměrné hodnotám prodyšnosti. Výsledky tomuto předpokladu zhruba odpovídají. Zároveň lze pozorovat vliv parametrů laminace na zvýšení počátečního tlaku oproti původní nanovlákně přibližně dvojnásobně až šestinásobně.

Z tohoto pohledu vycházejí jako nejlepší vzorky bikomponentního, a pak kopolyamidového pojiva.

Hodnoty konečného tlakového spádu vypovídají o rovnoměrnosti pojení vzorku a o vhodnosti kombinace plošné hmotnosti nanovláken s materiálem předfiltru. Ke zvýšení konečného tlakového spádu dochází tak, že během 1 minuty testu částice nalétávají na měřený vzorek a mění jeho strukturu. Nejmenší nárůst tlakového spádu byl zaznamenán u vzorku pojeného bikomponentním pojivem, největší nárůst byl zaznamenán při pojení kopolyesterem.

Struktura vpichované textilie je specifická. Obsahuje velké množství vazných bodů, kde jsou vlákna do sebe zaklesnuta. Soudržnost zajišťuje tření. Ve vazných bodech se nachází také meze- ra po vstupu jehly, která je dobře pozorovatelná. Proto se vpichované textilie používají pouze pro filtraci hrubého prachu. Celkově je struktura vpichované textilie poměrně otevřená. Velikost pórů je v řádech stovek mikrometrů.

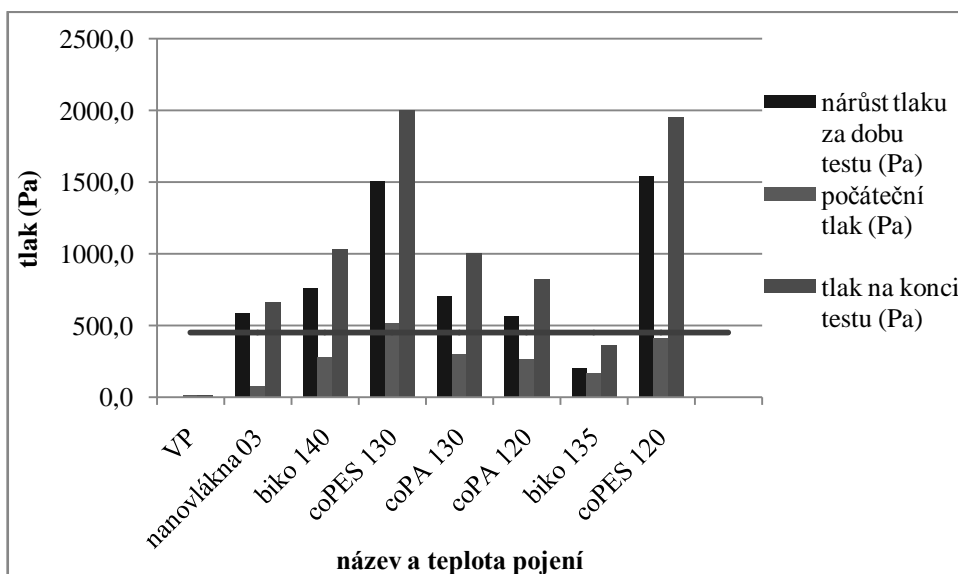
S přidáním více vrstev se póry zmenšují, ale spodní vrstvy jsou více namáhány. Příliš otevřená struktura předfiltru nemá dostatečnou předfiltrační účinnost. Pojivo může účinnost více zhoršit zvýšením lokální rychlosti toku. Částice nalétávají rovnou na nanovlákná, kde dochází k rychlému ucpaní pórů.

K horším výsledkům pavučin kopolyamidu a kopolyesteru pravděpodobně došlo především kvůli malé afinitě s PP a struktuře. Mohlo dojít k zalepení nanovláknenné vrstvy, nárůstu tlaku, který následně lehce rozvolnil nanovlákná včetně poklesu efektivit y záchytu. Struktura pojiv byla velmi málo zaplněná, zvláště kopolyamidová vrstva měla vlákna s větším průměrem a většimi mezerami. Kopolyesterová pavučina měla nižší plošnou hmotnost a vlákna měla menší průměr.

Bikomponentní pavučina měla zhruba 2x vyšší plošnou hmotnost z polymerů o nejnižší hustotě, vlákna byla průměrem blízko k kopolyesteru a díky bikomponentní struktuře se netavila celá, vznikaly bodové spoje. Vrstva pravděpodobně dokázala poskytnout jakýsi předfiltr více odkrytým nanovláknům, což se projevilo na malých hodnotách tlaků (při 135°C). Extrémní pokles účinnosti při pojení touto vrstvou při 140°C lze připsat přílišnému natavení pojiva a jeho srážením, což drobně porušilo zejména neúčinnější nanovláknennou vrstvu.

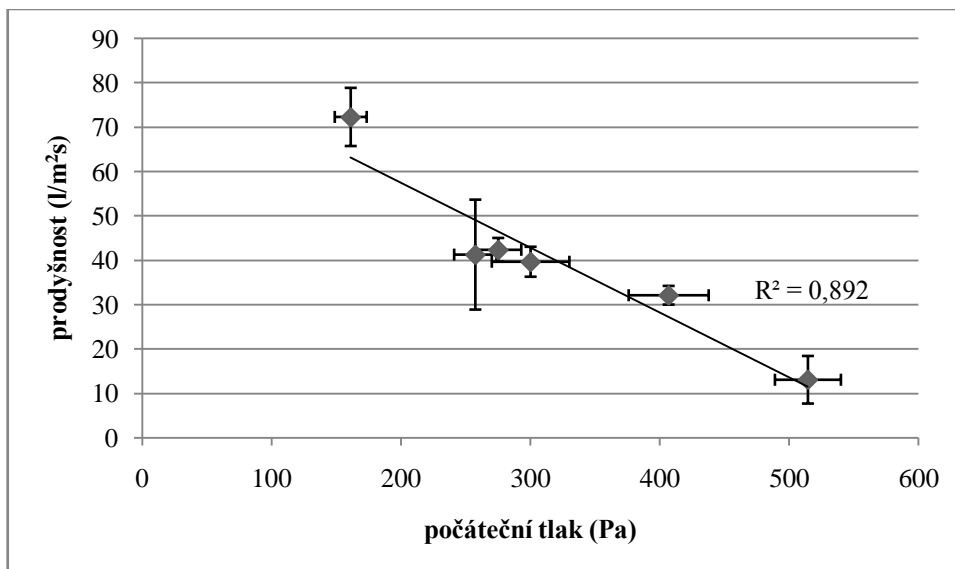
Nejlépejší kombinace bylo docíleno u vzorku pojeného bikomponentním pojivem za 135 °C, tlaku 14 kN po 1 minutu základního polypropylenového předfiltru s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m² a to díky výše zmíněným parametrům.

3.4.4 Další hodnocení



Graf 4 Naměřené hodnoty tlaku, s vyznačenou hranicí 450 Pa.

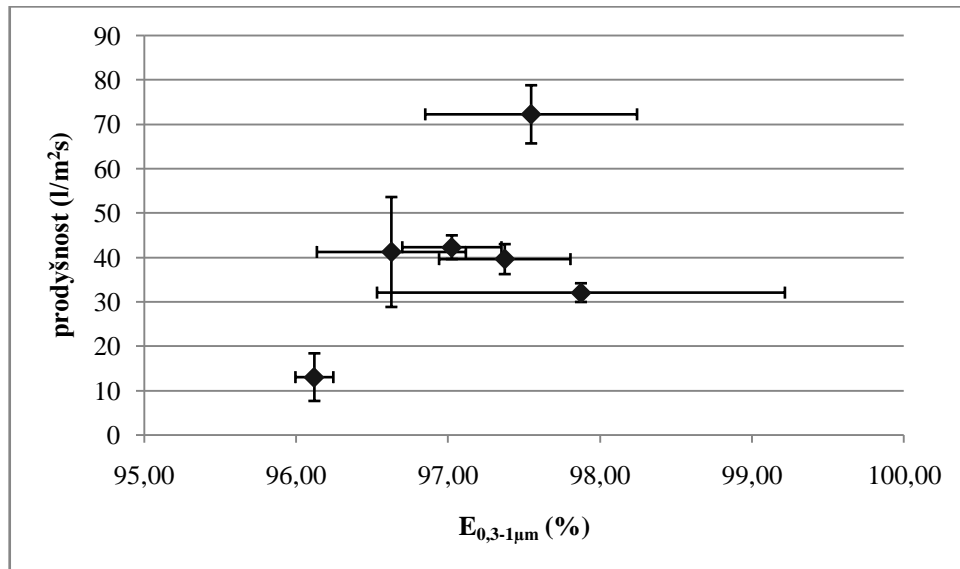
Hodnota 450 Pa představuje hranici výměny filtru podle norem. I když výsledný filtr bude mít větší plochu, je zajímavé sledovat počáteční tlak a tlakový spád právě s touto hranicí. Vzorek pojený bikomponentním pojivem za 135 °C vykazuje nízké tlaky, což je příznivé pro jeho využití.



Graf 5 Závislost prodyšnosti na počátečním tlaku s chybovými úsečkami směrodatných odchylek

Z grafu je patrné, že prodyšnost s počátečním tlakem mají lineární závislost se spolehlivostí 0,89. To odpovídá Darcyho zákonu. Vyšší prodyšnost znamená menší odpor proti průchodu

tekutiny. Relativně vysoká variabilita měření daná zejména nehomogenitou materiálu překračuje rozdíly mezi měřenými hodnotami pouze v některých případech.



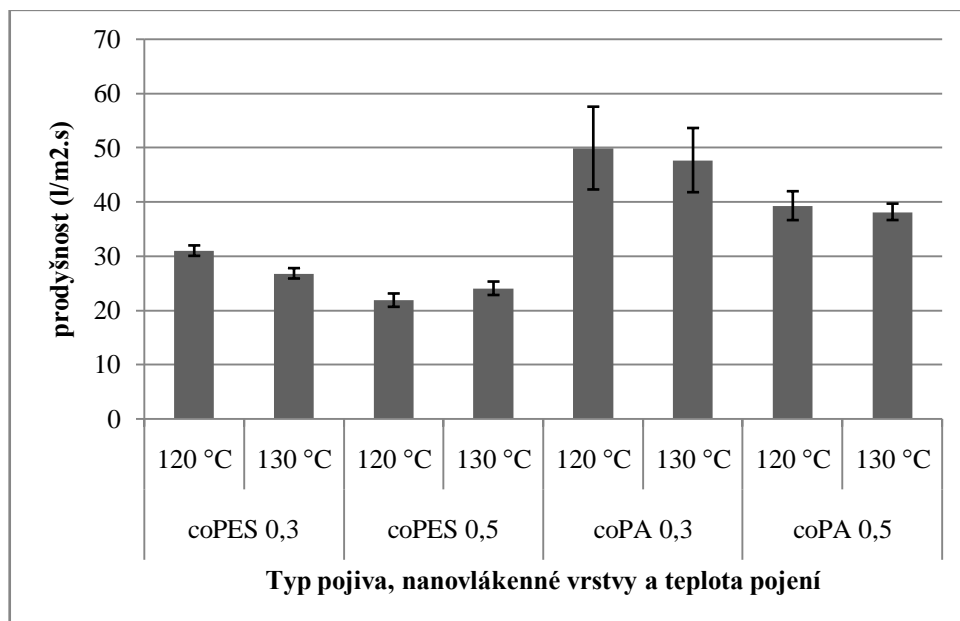
Graf 6 Závislost prodyšnosti na efektivitě záchytu částic v rozmezí 0,3-1 μm s chybovými úsečkami směrodatných odchylek

Z tohoto grafu je patrné, že prodyšnost s efektivitou záchytu nejsou v závislosti. Efektivita záchytu zaznamenává minima, která mohou být lokální, a jako v tomto případě, se na prodyšnosti neprojeví. V zásadě platí, že nehomogenita struktury materiálu se výrazněji projevuje na účinnosti záchytu, než na prodyšnosti. Na účinnost záchytu částic o velikosti 0,1 – 0,5 μm má negativní vliv rychlost proudění, která může být vlivem menší prodyšnosti vyšší.

3.5 Hodnocení nanovláčenného filtru na materiálu ze skleněných vláken

Netkaná textilie ze skelných vláken s polyesterovým podkladem dosahuje samostatné účinnosti odlučování třídy ePM1 70% podle ČSN EN ISO 16890. Bylo přistoupeno ke zlepšování filtračních vlastností oběma typy nanovláčenných vrstev za využití 3 typů pojiva.

3.5.1 Prodyšnost



Graf 7 Prodyšnost filtrů ze základního materiálu sklo s chybovými úsečkami.

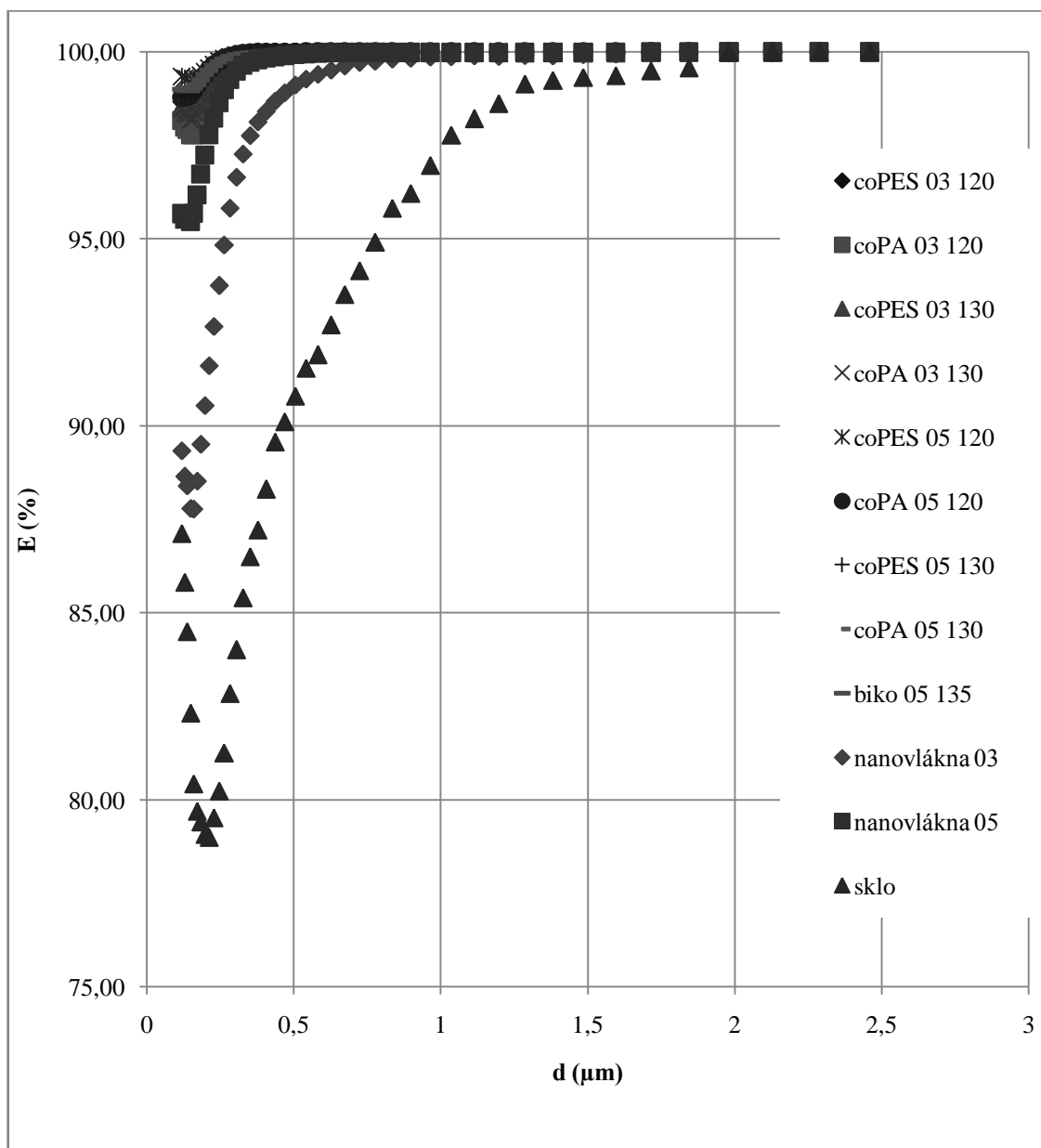
Nejvyšší prodyšnost vykazuje filtr s nanovláčennou vrstvou o nižší plošné hmotnosti pojený kopolyamidem. Pojení nanovláčien o vyšší plošné hmotnosti má nižší prodyšnost než lehčí nanovláčenná vrstva. Pojení kopolyesterem má celkově nízkou prodyšnost. Filtr pojený pomocí bikomponentní pavučiny se rozpojil po měření efektivity záchytu, a prodyšnost již nebyla měřena, proto se neobjevuje v tomto grafu.

3.5.2 Efektivita zachytu částic

Tab. 12 Přehled měření pro základní materiál SK

Vzorek	počáteční tlak (Pa)	tlak na konci testu (Pa)	průměr $E_{0.12-0.3\mu m}$ (%)	směrodatná odchylka (%)	průměr $E_{0.3-1\mu m}$ (%)	směrodatná odchylka (%)	filtrační třída
SK	36,7	37,7	-	-	75,501	0,99	M6/ ISO ePM1 70%
nanovlákna 03	77,5	660,0	87,7829	1,95	96,649	0,05	E10
nanovlákna 05	114,4	353,0	95,457	0,80	99,49	1,11	E10
coPA 03 120	232,0	256,3	97,777	0,42	99,63	0,13	E11
coPA 03 130	211,0	232,7	98,176	0,34	99,74	0,04	E11
coPES 03 130	401,5	485,3	98,384	0,49	99,79	0,09	E11
coPES 03 120	348,7	400,7	98,519	0,57	99,81	0,09	E11
coPA 05 120	270,0	286,0	98,781	0,13	99,93	0,01	E11
coPES 05 130	456,0	502,0	98,803	0,06	99,89	0,01	E11
biko 05 135	257,0	273,7	98,978	0,47	99,92	0,02	E11
coPA 05 130	272,7	294,0	99,043	0,31	99,95	0,01	E11
coPES 05 120	512,0	581,5	99,192	0,28	99,91	0,05	E11

Všechny vytvořené vzorky vykazují účinnost kategorie E11 podle ČSN EN 1822.



Graf 8 Efektivita záchytu všech vzorků v závislosti na velikosti částic

3.5.3 Diskuze

Předpoklad je, že počáteční tlakový spád filtru by měl být nepřímo úměrný prodyšnosti. Výsledky tomuto předpokladu odpovídají. Lze pozorovat vliv parametrů laminace a použité vrstvy nanovláken na zvýšení počátečního tlaku i na rozdíl přírůstku tlakového spádu za dobu testu. Z tohoto pohledu vycházejí jako nejlepší vzorky kopolyamidového pojiva, jehož vzorky mají vyšší prodyšnost a menší hodnoty tlaků než u kopolyesterových vzorků. Mezi sebou (coPA) se liší s použitím rozdílných nanovláknenných vrstev, kdy se s vyšší plošnou hmotností zvýšil počáteční tlak o zhruba 18 % a prodyšnost klesla o 21%.

Pojení s nanovlákný o plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m² kopolyamidem se docílilo velmi nízkého tlakového spádu a účinnosti vyšší než samotná nanovláknenná vrstva. Rozdíl v teplotách pojení není příliš znatelný, pojivo má širší teplotní optimum. Pojení kopolyesterem s nižší plošnou hmotností nanovláken mělo vyšší nárůst tlaku při měření, zejména při 130°C, kdy pravděpodobně docházelo k většímu natavení, což vedlo k zmenšení pórů a většímu namáhání nanovláknenné vrstvy.

S vyšší plošnou hmotností vrstvy nanovláken se docílilo vyšší účinnosti záchytu. Nárůst tlaku při pojení kopolyesterem (za 130°C) může být z důvodu hustší struktury tenčích vláken, které více zalepily nanovláknennou vrstvu a dochází k jejímu většímu namáhání.

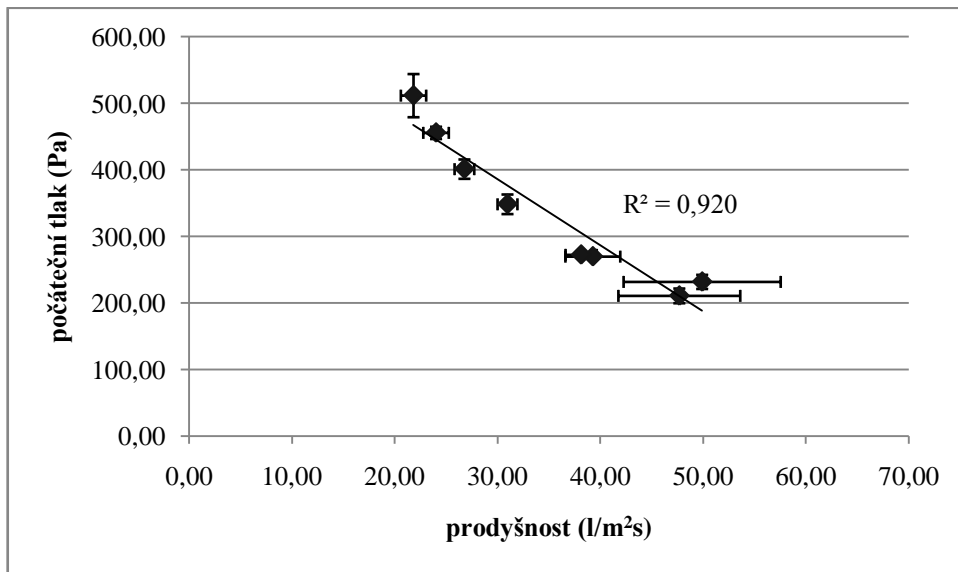
Bikomponentní pojivo se podařilo spojit pouze za 135°C a po testování efektivity záchytu se rozpojilo. Výsledky byly příznivé, účinnost je již na 99% záchytu částic pro částice mezi 120 a 300 nm, ale pro aplikaci je důležitá i mechanická stabilita. Afinity k podkladové textilií předfiltru nebyla dostatečná. S kopolyesterem za 120°C bylo dosaženo stejně jako u polypropylenového základního materiálu maximální efektivity, konkrétně 99,19±0,28 %, ale nevýhodou je vysoký počáteční tlak.

Jako nejlepší vzorek byl vyhodnocen filtr s nanovlákný o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m² pojený kopolyamidovou pavučinou za 130°C, a to díky vysoké účinnosti záchytu částic, v rozmezí 120-300 nm 99,04±0,31 % a nízkým hodnotám tlaků.

Pro materiálové složení základního filtru se ukázalo jako vhodné pojení kopolyamidem, jehož vlákna s menším počtem o větším průměru zajistila pevné spoje. Adheze s podkladovou textilií skleněného předfiltru se ukázala jako dobrá, materiálová afinita s nanovlákný byla předpokládána, jejich povrch navíc předurčuje dobrou adhezi. Bylo zjištěno, že větší průměr vláken za 120 ani 130°C nezpůsobil problémy v neprůchodnosti vrstvy. Vyšší směrodatné odchylky při měření prodyšnosti jsou důsledkem tlustších vláken a větších mezer, tudíž se projevovala nehomogenita pojivové vrstvy v ploše, která se projevila při měření menší testované plochy prodyšnosti.

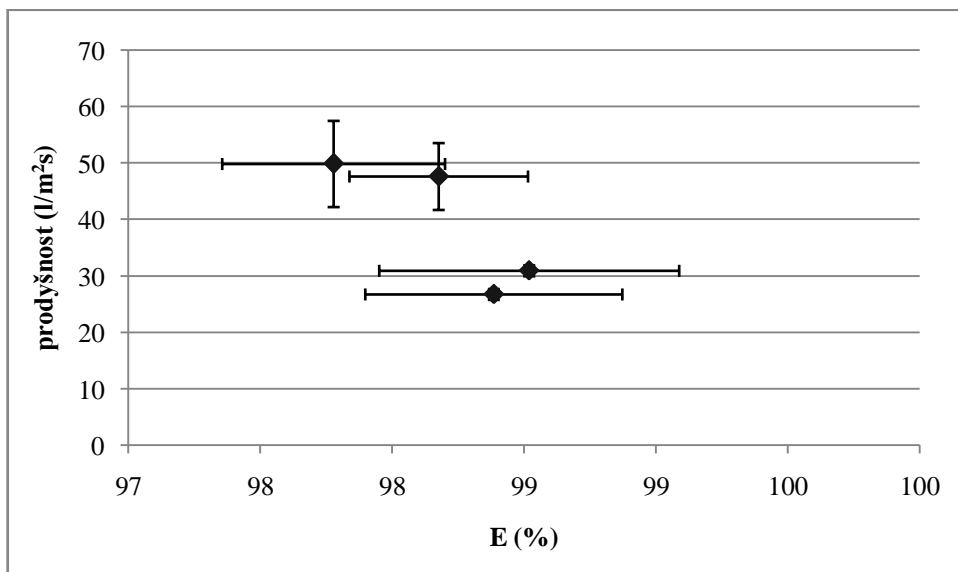
Kopolyesterová vrstva nevytvořila vhodné spoje, vrstva byla méně prodyšná a obsahovala více nehomogenit. Pojení bikomponentním pojivem se neukázalo jako vhodné z důvodu nedostatečné materiálové afinity s podkladovou textilií skleněného předfiltru. Ačkoliv nebyla předpokládána přílišná afinita ani s PA6, nanovlákná mají velký povrch, ke spojení došlo.

3.5.4 Další hodnocení



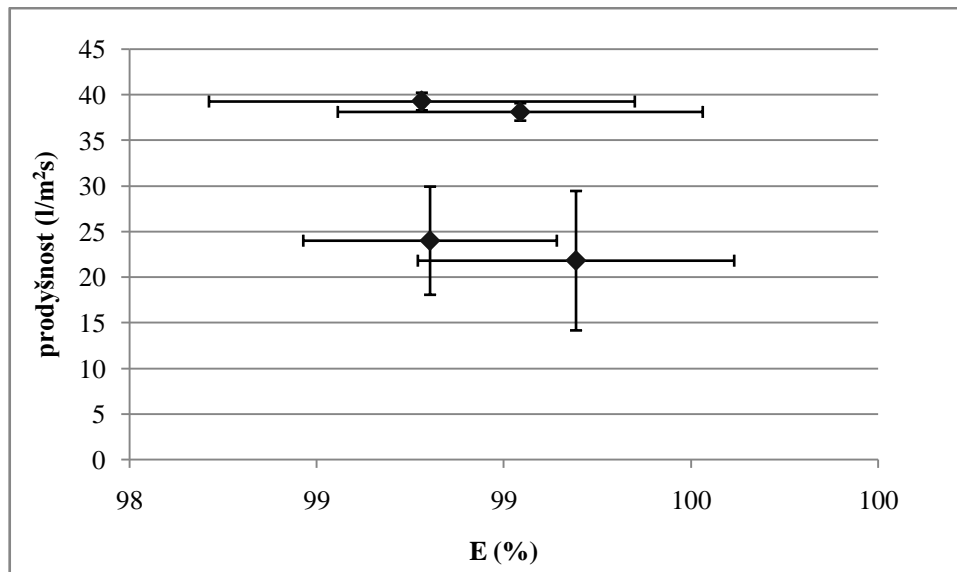
Graf 9 Závislost počátečního tlaku a prodyšnosti s chybovými úsečkami směrodatných odchylek

Počáteční tlak s prodyšností mají lineární závislost se spolehlivostí 0,92, což odpovídá Darcyho zákonu. Menší prodyšnost znamená větší odpor proti průchodu tekutiny.



Graf 10 Vzorky SK s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m²

Graf 10 zobrazuje závislost prodyšnosti a efektivity záchytu pro částice o velikosti 120-300 nm. S úvahou směrodatných odchylek není patrná prokazatelná závislost stejně jako pro vyšší plošnou hmotnost na následujícím grafu.



Graf 11 Vzorky SK s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m²

Vztah mezi prodýšností a efektivitou záchytu ovlivňuje nehomogenita. Ovšem na efektivitě záchytu se projeví mnohem dříve, než na prodýšnosti. Velké směrodatné odchylky opět ukazují na nehomogenitu materiálu.

3.6 Testování stability vybraného vzorku

Vzorek SK coPA 05 130, tedy laminát ze skelných vláken na podkladu spunbondové NT pojený pavučinou z kopolyamidu za 130°C s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m² z PA6 za 14 kN po dobu 1 minuty, s účinností záchytu pro nejhůře zachytitelné částice 99,04 ± 0,31 % byl podroben dalším dvěma testům, aby se zjistila odolnost nutná k výrobě a dalšímu využití.

3.6.1 Skládání

Prvním testem bylo ruční skládání vzorku, které mělo přibližně simulovat, zda filtr vydrží manipulaci a skládání, které by probíhalo při strojní výrobě. Bohužel laboratoř nedisponuje vlastním přístrojem na výrobu skládaných filtrů. Výsledek skládání je na fotografiích, Obr. 32-34. Sklady byly ještě na chvíli zatíženy, přitlačeny a uvolněny. Následně byl vzorek změřen na přístroji Palas pro zjištění efektivity záchytu částic. Při skládání došlo k částečnému odlepení spunbondu od nanovláken, ale po zalepení do rámečku by nedocházelo ke ztrátě funkce krycí vrstvy.



Obr. 32 Skládání a přitlačení



Obr. 33 a Obr. 34 Po uvolnění. Částečné odlepení krycí vrstvy.

Tab. 13 Efektivita záchytu vzorku skleněné základní textilie pojené kopolyamidem za 130°C s nanovláknny o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m².

Efektivita záchytu	Průměr- původní	Směrodatná odchylka	Průměr- po skládání	Směrodatná odchylka
E (MPPS) (%)	99,02	0,29	99,02	0,34
E (400 nm) (%)	99,99	0,00	99,98	0,01
E (120- 300 nm) (%)	99,02	0,11	99,02	0,15
E (0,3 - 1μm) (%)	99,95	0,29	99,91	0,34

Tab. 14 Měření tlaku na vzorku skleněné základní textilie pojené kopolyamidem za 130°C s nanovláknny o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m²

Tlak	Průměr tlaku před skládáním	Směrodatná odchylka	Průměr po skládání	Směrodatná odchylka
Počáteční tlak (Pa)	272,7	1,25	255,3	3,86
Tlak na konci testu (Pa)	294,0	2,94	264,0	0,82
Nárůst tlaku při testu (Pa)	21,3	3,77	8,7	3,77

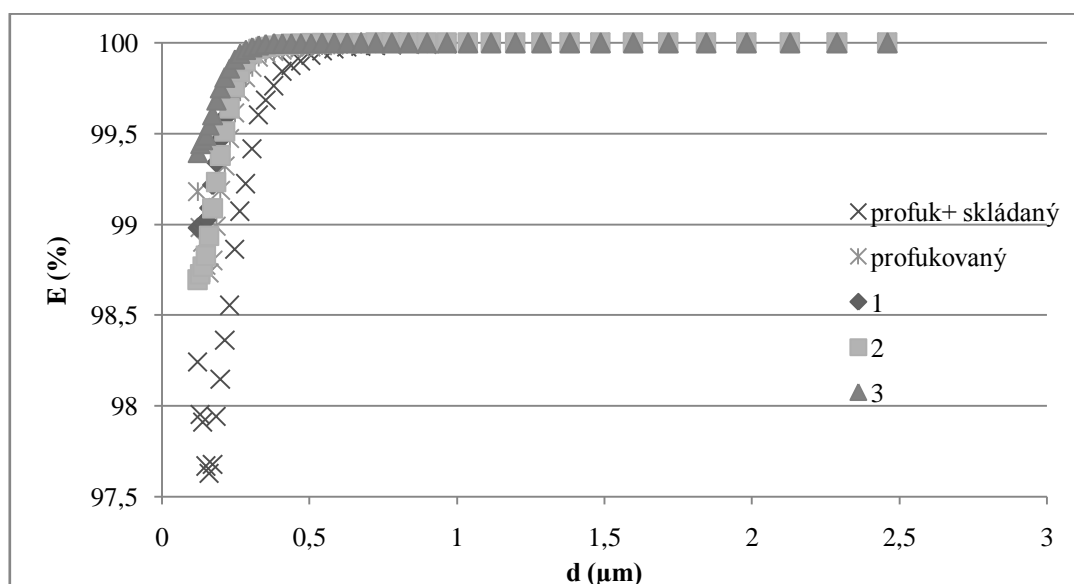
3.6.2 Simulace namáhání prouděním vzduchu

Další měření probíhalo na přístroji VDI 3926 Filter Tester, v režimu, který simuluje průtok pomocí 2 ventilátorů, bez částic a za laboratorní teploty. Ze vzorku byl vyražen kruh o průměru 140 mm, který byl upevněn do testovací hlavy o testovací ploše 100 cm² v měřící komoře přístroje. Poté byl vzorek 1 h profukován čistým vzduchem za průtoku 5 cm/s. Tento test sloužil k zjištění mechanické stability v provozu. Následně byla opět zjištěna efektivita záchytu, která prozradí případné poškození.

Test byl proveden na 2 vzorcích SK coPA 05 130, a to na původním a skládaném.

Tab. 15 Srovnání testovaných vzorků

Vzorek SK coPA 0,5 130	průměr základního měření	průměr skládaného vzorku	profukovaný vzorek	profukovaný a skládaný vzorek
Počáteční tlak (Pa)	273,0	255,3	256,0	246,0
Tlak na konci testu (Pa)	294	264,0	266,0	254,0
Nárůst tlaku při testu (Pa)	21,3	8,7	10,0	8,0
E _{MPPS} (%)	98,69	98,55	98,73	97,62



Graf 12 Srovnání základního měření (1-3) s profukovaným a skládaným i profukovaným vzorkem

Základní měření je první měření připravovaného laminovaného filtru. Skládaný označuje vzorek laminovaného filtru, který byl ručně poskládan a relaxován. Profukovaný označuje vzorek lami-

novaného filtru, který byl testován na přístroji profukováním. Profukovaný+ skládaný označuje vzorek, který byl nejdříve ručně poskládán, relaxován a následně byl testován na přístroji profukováním.

3.6.3 Diskuze

Skládání ovlivnilo tlakový spád, a to pozitivně, došlo k jeho poklesu, v průměru o 12,7 Pa. To může být způsobeno uvolněním pnutí v ohybech díky pohybům při skládání a následném rozvolnění. Dalším důvodem je i nepatrné zvětšení plochy, které vzniklo z důvodu trvalých deformací v materiálech. Měření probíhalo v plochém tvaru.

Výše uvedená měření byla provedena na vzorcích o stejném materiálovém složení. Při následujících operacích došlo ke snížení počátečního tlaku i tlakového spádu. Což pravděpodobně ukazuje na uvolnění napětí vloženém laminací. Jednotlivá vlákna se vlivem malého napětí stálého profukování pomalu relaxovala z pnutí, fixace pojivem byla zároveň dostatečně pevná a umožnila i relaxaci.

U předskládaného a profukovaného vzorku došlo k největšímu poklesu počátečního tlaku o 20 Pa. Bohužel pro nejmenší částice v rozmezí 120-190 nm došlo k poklesu účinnosti, E_{MPPS} je 97,62 %. Pravděpodobně došlo k posunům nanovláken ve vrstvě, kudy již dokázaly projít malé částice. Například v místech uvolněného ohybu. V reálném filtru by ohyb nebyl znovu relaxovaný, vlivem skládání dochází ke změnám struktury. Filtr zůstává ve třídě E11 podle ČSN EN 1822.

4 Závěr

Atmosférická filtrace je jeden z aspektů ochrany zdraví i životního prostředí. Vysoce účinné filtry se soustředí na velmi malé částice (často menší jak 2,5 μm), které nemusí být lidským okem pozorovatelné.

Cílem práce byl vývoj vysoce účinného filtru pomocí nanovlákněné vrstvy o velmi nízké plošné hmotnosti. V experimentu byly úspěšně optimalizovány parametry typu pojiva a teploty na základě měření filtračních vlastností konkrétních materiálů.

Byla připravena škála vzorků a sledovány filtrační vlastnosti. Z filtračních vlastností byla měřena prodyšnost, počátečný tlakový spád, konečný tlakový spád po minutě dávkování částic a účinnosti záchytu jednotlivých velikostí částic v rozsahu 0,12 – 2,5 μm . Pro vyhodnocení je zásadní velikost nejvíce pronikajících částic (MPPS). Z jejich počtu pak vychází nejnižší a uváděné procento odlučivosti filtru. Další hodnocení vychází z norem, konkrétně ČSN EN 779, ČSN EN ISO 16890 a ČSN EN 1822.

Měření probíhalo na menších vzorcích, než u reálného filtru, především kvůli dostupným přístrojům. Vyhodnocování bylo provedeno na základě nejhoršího výsledku, což odpovídá konceptu normy ČSN EN 1822. Vady v materiálu a nehomogenita se projevují v poklesu efektivity záchytu, a proto byl zvolen tento přísnější přístup, i když by průměr měření ještě zůstal ve vyšší filtrační třídě.

Filtrační charakteristiky byly dány používanými materiály. S polypropylenovým vpichovaným základním filtrem bylo vytvořeno 6 typů vzorků. Samostatně se používá pro hrubou filtraci. Z tohoto důvodu bylo laminování prováděno pouze pomocí nanovlákněné vrstvy o nižší plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m^2 . Nejlepších výsledků bylo dosaženo u vzorku VP biko 135. Tento filtr vykazuje velkou efektivitu záchytu částic, E_{MPPS} je $90,83 \pm 1,81$ %, podle normy ČSN EN 1822 se řadí do třídy E10.

Ukázalo se, že otevřená struktura vpichované textilie klade nároky na pojivou vrstvu i jako předfiltr nanovlákněné vrstvy, jinak dochází k jejímu velkému namáhání, což se projevuje na zvýšení tlakového spádu a vede ke snížení efektivity záchytu. Struktura monokomponentních vlákněných vrstev byla příliš otevřená a neobjemná. Výhodou bikomponentního pojiva se ukázala vyšší plošná hmotnost a bikomponentní složení vláken, které tvoří bodové spoje.

Se základním filtrem připraveným technologií odstředivého zvlákňování skla na podkladovou spunbondovou netkanou textilií z polyesteru bylo vytvořeno 9 soudržných typů vzorků. Samostatná odlučivost základního materiálu je třídy ISO ePM1 70%. Optimálních výsledků bylo

docíleno u vzorku SK coPA 05 130. Účinnost záchytu výsledného materiálu je $99,04 \pm 0,31$ %, podle normy ČSN EN 1822 se řadí do třídy E11.

U tohoto filtru se neukázalo jako vhodné bikomponentní pojivo, a to z důvodu malé afinity s podkladovou textilií z předfiltru, ve všech případech došlo k rozpojení. Většina vytvořených vzorků se liší minimálně v účinnosti záchytu. Z hlediska tlaku je vhodné pojení kopolyamidem, počáteční tlaky jsou nízké a nedochází k přílišnému nárůstu vlivem zanášení částicemi po dobu testování, což je výhodné pro použití. Vlákná mají větší průměr a poskytují pevné spoje. Vyšší směrodatné odchylky prodyšnosti lze připisovat nehomogenitě pojivové vrstvy na malé testovací ploše tohoto měření. Kopolyesterová vrstva způsobovala vyšší nárůst tlaků, to přináší celkově nehomogenní tok, což ztěžuje jednoznačnou interpretaci výsledků.

S vybraným vzorkem vyvíjeného filtru byla provedena simulace operace výroby skládání a test stability v profukování. Nebyly zaznamenány závažné problémy. Vzorek lze doporučit k dalšímu vývoji aplikace například pro klimatizační jednotky ve formě skládaného filtru.

V dalším výzkumu by bylo vhodné reálné testování navrhnutého filtru ve skládané podobě.

Využití nanovlákných vrstev pro vysoce účinné filtry se jeví jako aplikovatelné. Navíc laminace je bezrozpouštědlová technologie, kterou lze využívat kontinuálně, stejně jako výrobu předfiltrů, pojiv a nanovláken, ačkoliv zde se ještě nedosahuje průmyslových rychlostí v desítkách metrů za minutu.

Seznam použité literatury

1FILTER, 2013. Norma EN 779:2012 [online] Dostupné z: <http://1filter.cz/norma-en-779-2012.html>

BASF, 2011. Ultramid Brochure [online] Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Marius_Murariu2/post/Impurities_present_in_caprolactam_producing_high_molecular_weight_nylon/attachment/59d6479879197b80779a26d3/AS%3A463182645993472%401487442756056/download/Ultramid_Fibers_Brochure.pdf

BROWN, R. C. 1993. *Air filtration*. 2nd edition, Sheffield.

ČSN EN 1822 1-5: 2010. Vysoce účinné filtry vzduchu (HEPA a ULPA). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

ČSN EN 29073-1 (806131): 1994. Textilie. Zkušební metody pro netkané textilie. Část 1: Zjišťování plošné hmotnosti. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994.

ČSN EN 779: 2012. Particulate air filters for general ventilation. Requirements, testing, marking. Bruxelles: European Comitee for Standardization, 2012.

ČSN EN ISO 7231 (645423): 2010. Měkké lehčené polymerní materiály - Stanovení hodnoty propustnosti vzduchu při konstantním tlaku. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

DONALDSON, 2019. Ultra-Web® Media Technology [online] [vid. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.donaldson.com/en-be/industrial-dust-fume-mist/technical-articles/ultra-web-media-technology/>

EDANA, nedatováno. Bonding [online] [vid. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.edana.org/discover-nonwovens/how-they're-made/bonding>

ELMARCO, 2013. Filtrace vzduchu- hloubková [online]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/aplikace/filtrace-vzduchu-hloubkova/>

ELMARCO, nedatováno a. Technologie Nanospider [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/fotogalerie/technologie-nanospider/>

ELMARCO, nedatováno b. Technologie [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/technologie/>

- FIRST, M. W., 1998. HEPA filters. *Journal of the American Biological Safety Association*, 3(1) pp. 33-42.
- HOLLEROVÁ, J. 2007. Prašnost na pracovišti. Státní zdravotnický ústav. [online] [cit. 2019-01-10]. Dostupné z <http://www.szu.cz/tema/pracovni-prostredi/prasnost-na-pracovisti-1>
- HRŮZA J. a J. HANUŠ, 2013. Prototyp filtru s obsahem nanovláken pro částicovou filtraci [prototyp] Technická univerzita v Liberci, RIV/46747885:24220/13:#0002586.
- HRŮZA, J. 2005. *Zlepšování filtračních vlastností vlákných materiálů*. Disertační práce. TUL. Liberec.
- JIRSÁK, O. a K. KALINOVÁ, 2003. *Netkané textilie*. Liberec: Technická univerzita v Liberci. ISBN 978-80-7083-746-7.
- JIRSÁK, O. et al. *Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvlákňováním a zařízení k provádění způsobu* [patent]. Technická univerzita v Liberci, udělen 2004-09-14, CZ294274.
- JONES, F. R. a N. T. HUFF, 2009. The structure and properties of glass fibres In: Eichhorn, S. J. et al. *Handbook of textile fibre structure Volume 2: Natural, regenerated, inorganic and specialist fibres*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- KUŽELOVÁ KOŠŤÁKOVÁ, E. 2018. Úvod do nanomateriálů. [online]. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/689/course/section/11112/Prezentace1_uvod_do_nanomaterialu-elektrospinning.pdf
- LOOMIS, D., J. DEMENT, D. RICHARDSON, a S. WOLF. 2009. Asbestos fibre dimensions and lung cancer mortality among workers exposed to chrysotile. *Occupational and environmental medicine*, 67(9), 580-4.
- MATULEVICIUS J. et al., 2014. Design and Characterization of Electrospun Polyamide Nanofiber Media for Air Filtration Applications. *Journal of Nanomaterials*. 2014. 1-13.
- MILITKÝ, J. 2012. *Textilní vlákna Klasická a speciální*. Technická univerzita v Liberci.
- NAFIGATE NANOCLEANER, 2019. Nanocleaner [online] [vid. 2019-03-31]. Dostupné z: <http://www.nafigate-nanocleaner.com/cs/nanocleaner>
- NANOVIA, 2016. Produkty Nanovia [online] [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: www.nanovia.cz/produkty/
- PALAS, 2016. DEHS. [online] Dostupné z: <https://www.palas.de/en/product/dehs>

PARDAM, 2018. NANO4FIBERS Group s.r.o. Products. [online] [vid. 2019-02-10]. Dostupné z: <http://www.nano4fibersgroup.cz/>

PATIDAR, 2015. Plastic Extrusion. [online] Dostupné z: <http://www.patidarcorporation.com/wp-content/uploads/2015/04/Plastic-Extrusion.jpg>

RELIANT MACHINERY, nedatováno. Powerbond Modular Laminating Range. [online] [vid. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://reliant-machinery.com/wp-content/uploads/2015/02/Copy-of-powerbond-module1.jpg>

RUSSEL S. J., 2007. *Handbook of Nonwovens*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.

SUNDARRJAN et al., 2014. Electrospun Nanofibers for Air Filtration Applications, *Procedia-Engineering* 75 (2014) 159 – 163

SUTHERLAND, K., 2008. *Filters and filtration handbook*. 5. ed. Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann. ISBN 978-1-85617-464-0.

VYDLÁKOVÁ, J. 2010 Inhalační alergený a spouštěče alergických onemocnění. *Interní Medicina* 2010; 12(2): 101–103

WYPYCH, G. 2016. *Handbook of Polymers*, 2nd Edition, ChemTecPublishing, Toronto.

YARIN, A. L., B. POURDEYHIMI a S. RAMAKRISHNA, 2014. *Fundamentals and Applications of Micro- and Nanofibers*. Cambridge University Press.

ZHANG S. et. al, 2017. A controlled Design of Ripple-Like Polyamide-6 Nanofiber/ Nets Membrane for High-Efficiency Air Filter. *Advanced Science News*. Small 13, 1603151.

Zhang, X. 2014. Figure 3 [online] Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Xiangwu_Zhang/publication/265298027/figure/fig3/AS:321945070522369@1453769094086/Schematic-of-a-typical-centrifugal-spinning-process-used-in-the-fiberglass-industry.png

Seznam obrázků

Obr. 1 Principy hloubkové filtrace, R- poloměr vlákna. [Hrůza, 2005].....	13
Obr. 2 Zobrazení penetrace částic s ohledem na jejich velikost. Upraveno podle [First, 1998]..	14
Obr. 3 Elektrostatické zvlákňování [Kuželová Košťáková, 2018]	19
Obr. 4 Schéma stroje Nanospider [Jirsák et al., 2004] a Obr. 5 Dnešní podoba stroje Nanospider se zvlákňovací strunou [Elmarco, nedatováno a]	20
Obr. 6 Chemický vzorec PA6.....	21
Obr. 7 Chemický vzorec PP.	22
Obr. 8 Schéma odstředivého zvlákňování. Upraveno podle [Zhang, 2014].....	23
Obr. 9 Tavné vlákňování PA6 [BASF, 2011].....	24
Obr. 10 Vpichování. Upraveno dle [Edana, nedatováno]	25
Obr. 11 Kalandrování. Upraveno podle [Edana, nedatováno].....	25
Obr. 12 Obecné schéma laminace pomocí válců. Pojivo je ve formě taveniny. Upraveno podle [Patidar, 2015]	26
Obr. 13 Znázornění konstrukce filtru. Směr proudění vzduchu představují šipky.	29
Obr. 14 a Obr. 15 Základní materiály. Ve spodní části je lícová strana, v horní části je rub. Nalevo je vpichovaný polypropylenový filtr, napravo je filtr ze skla s pokladovou textilií vyrobenou technologií spunbond.	31
Obr. 16 Polypropylenová vlákna s měřítkem 50 μm a Obr. 17 Skleněná s měřítkem 20 μm	31
Obr. 18 a Obr. 19 a Obr. 20 Pohled na pavučiny pojiva. Zleva PP/PE, coPES, coPA.	32
Obr. 21 a Obr. 22 a Obr. 23 Mikroskopický pohled na pavučiny pojiva. Zleva PP/PE, coPES, coPA. Měřítka 50 μm . Průměr vláken jednotlivých vrstev je orientačně 20 μm , 15 μm a 45 μm	32
Obr. 24 Lis a Obr. 25 Příklad na měření prodyšnosti	33
Obr. 26 a Obr. 27 Příklad MFP 1000 HEPA a detail záobníku DEHS	34
Obr. 28 a Obr. 29 Příklad a detail držáku uchycení filtru.	34
Obr. 30 a Obr. 31 Snímky nanovlákných vrstev ze skenovacího elektronového mikroskopu. Nalevo je nižší plošná hmotnost a napravo vyšší. [Klára Kučerová].....	36
Obr. 32 Skládání a přitlačení	50
Obr. 33 a Obr. 34 Po uvolnění. Částečné odlepení krycí vrstvy.	50

Seznam tabulek

Tab. 1 Hodnocení filtrů podle normy ČSN EN 779: 2012	16
Tab. 2 Hodnocení podle ČSN EN ISO 16890:2016	16
Tab. 3 Hodnocení podle ČSN EN 1822: 2010	17
Tab. 4 Seznam použitých materiálů.....	29
Tab. 5 Parametry použitých materiálů	30
Tab. 6 Prodyšnost a účinnost záchytu nanovlákných vrstev.....	36
Tab. 7 Parametry základních vrstev	37
Tab. 8 Laminace vzorků s pojivem z kopolyamidu	37
Tab. 9 Laminace vzorků s pojivem z kopolyesteru	38
Tab. 10 Laminace vzorků s pojivem z PP/PE bikomponentní pavučiny.....	38
Tab. 11 Měření efektivity záchytu	39
Tab. 12 Přehled měření pro základní materiál SK	45
Tab. 13 Efektivita záchytu vzorku skleněné základní textilie pojené kopolyamidem za 130°C s nanovláknem o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m ²	50
Tab. 14 Měření tlaku na vzorku skleněné základní textilie pojené kopolyamidem za 130°C s nanovláknem o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m ²	50
Tab. 15 Srovnání testovaných vzorků	51

Seznam grafů

Graf 1. Měření prodyšnosti nanovláknenných vrstev s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.	35
Graf 2 Prodyšnost filtrů ze základního materiálu PP s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.	39
Graf 3 Efektivita záchytu jednotlivých vzorků pro různé velikosti zachytávaných částic.	40
Graf 4 Naměřené hodnoty tlaku, s vyznačenou hranicí 450 Pa.	42
Graf 5 Závislost prodyšnosti na počátečním tlaku s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.	42
Graf 6 Závislost prodyšnosti na efektivitě záchytu částic v rozmezí 0,3-1 μm s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.	43
Graf 7 Prodyšnost filtrů ze základního materiálu sklo s chybovými úsečkami.	44
Graf 8 Efektivita záchytu všech vzorků v závislosti na velikosti částic.	46
Graf 9 Závislost počátečního tlaku a prodyšnosti s chybovými úsečkami směrodatných odchylek.	48
Graf 10 Vzorky SK s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,30-0,35 g/m^2	48
Graf 11 Vzorky SK s nanovláknennou vrstvou o plošné hmotnosti 0,46-0,54 g/m^2	49
Graf 12 Srovnání základního měření (1-3) s profukovaným a skládaným i profukovaným vzorkem.	51