

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ**

Obor 3106 – T004 Netkané textilie

**NOVÉ ZPŮSOBY ZLEPŠOVÁNÍ FILTRAČNÍCH
VLASTNOSTÍ VLÁKENNÝCH MATERIÁLŮ**

**NEW METHODS OF IMPROVING FILTRATION
PROPERTIES OF FIBROUS MATERIALS**

Autor: Jitka Poláchová
Vedoucí práce: Ing. Jakub Hrůza

Rozsah práce:

Počet stran: 45
Počet tabulek: 4
Počet obrázků: 31
Počet příloh: 5

16. 5. 2005

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Liberci, dne 16. 5. 2005

.....

Podpis

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená *diplomová (bakalářská)* práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním *diplomové (bakalářské)* práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou diplomovou (*bakalářskou*) práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové (*bakalářské*) práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové (*bakalářské*) práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové (*bakalářské*) práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si svou diplomovou práci mohu vyzvednout v Univerzitní knihovně TUL po uplynutí pěti let po obhajobě.

V Liberci, dne 16 .5. 2005

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucímu práce Ing. Jakubovi Hrůzovi za odborné vedení, cenné rady, podněty a připomínky, které mi při vypracování této práce poskytl.

Anotace

Tato práce se zabývá problematikou filtrace a zkoumá nové způsoby zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů. K tomu využívá techniku přidání nanovláknenné vrstvy, úpravu filtračního povrchu skládáním a nánosu povrchového náboje. Zároveň byly uvedené techniky vzájemně kombinovány. Práce současně sleduje závislost efektivity a tlakového spádu na parametrech použitých technik, jako je typ a plošná hmotnost nanovláknenné vrstvy nebo počet a výška skladů skládaných filtrů.

Klíčová slova: Filtrace, nanovláknena, skládání, elektrostatický náboj

Annotation

This diploma thesis deals with filtration issues and it examines new methods of improving filtration properties of fibrous materials. To achieve these aims, there were employed techniques of inserting nanofibres, pleating filtration surface and charging. These methods were combined together. This diploma thesis also study the dependency of efficiency and pressure drop on parameters of used techniques such as type and area density of nanofibre layer or number and height of pleats of pleated filters.

Keywords: Filtration, nanofibers, pleating, electrostatic charge

Obsah

1	Základní filtrační charakteristiky	8
2	Filtrační mechanismy	9
2.1	Mechanismus uchycení částic nabitými filtračními vlákny	10
2.2	Techniky přípravy permanentně nabitých vlákenných útvarů	11
3.1	Charakteristika a výroba nanovláken	14
3.2	Elektrospinning a modifikace elektrospinningu	15
3.3	Princip nanofiltrace	16
4	Vliv filtrační plochy na tlakový spád	18
6	Označení a popis jednotlivých typů vzorků	20
7	Testování filtračních vlastností	23
7.1	Měření efektivity a tlakového spádu aerosolem NaCl	23
7.2	Filtrační vlastnosti plochých vzorků meltblownu	25
7.3	Techniky pro zlepšení filtračních vlastností	27
7.3.1	Přidání nanovláknenné vrstvy	27
7.3.2	Úprava filtrační plochy naskládáním	30
7.3.3	Kombinace techniky vložení nanovláknenné vrstvy a skládání filtrů	36
7.3.4	Kombinace techniky nánosu náboje, nanovláknenné vrstvy a skládání	38
7.4	Přehled změn filtračních vlastností v závislosti na použité technice	40
8	Závěr	42
9	Literatura:	44

Seznam použitých symbolů

A	plošný obsah filtru [m^2]
σ	hustota povrchového náboje [C.m^{-2}]
E	efektivita filtru (odlučivost) [%]
f	frekvence [Hz]
G_1	hmotnostní proudy disperzního podíl před filtrem [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]
G_2	hmotnostní proudy disperzního podíl za filtrem [$\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$]
h	výška skladů filtru [m]
k	koeficient propustnosti [s.kg^{-1}]
Kn	Kundsenovo číslo [-]
l	vzdálenost mezi elektrodou a sběrným kolektorem [m]
λ	střední volná dráha molekul plynu [m]
MB	vlákenná vrstva vyrobená technologií meltblown
n	počet skladů filtru [m^{-1}]
N	nanovláknenná vrstva
NaCl	chlorid sodný
η	dynamická viskozita [Pa.s]
O	objemová nanovláknenná vrstva
P	plošná nanovláknenná vrstva
P	průnik filtru [%]
p_1	tlak před filtrem [Pa]
p_2	tlak za filtrem [Pa]
Δp	tlakový spád filtru [Pa]
Q	průtok disperzního systému filtračním materiálem [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]
r_f	specifický rozměr (poloměr vlákna) [m]
S	vlákenná vrstva vyrobená technologií spunbond
S_1	pojivá spunbondová vrstva
t	tloušťka filtru [m]
T	čas [s]
τ	tečné napětí [Pa]
U	napětí mezi zvlákňovací jednotkou a sběrným kolektorem [V]
U_1	napětí mezi zvlákňovací jednotkou a elektrodou [V]

U_2	napětí mezi elektrodou a sběrným kolektorem[V]
U_A	napětí na testovaném vzorku [V]
U_B	maximální napětí na tzv. 100%-ním vzorku [V]
v_x	rychlost proudu vzduchu ve směru osy x [m.s ⁻¹]

Úvod

Ve vzduchu, který nás obklopuje, se nachází mnoho nejrozumnějších cizích látek, které částečně vznikají v důsledku přírodních procesů, ale většina je vyvolána lidskými činnostmi. Patří sem například výfukové plyny spalovacích motorů, odpadní plyny z průmyslových výrobních procesů a podobně. Směs prachu obsahuje také křemičitany různého původu, jako je kouř, saze, kovový prach a v neposlední řadě také přirozené organismy, jako jsou bakterie, plísně, pyly a zárodky.

Poznatky o škodlivých koncentracích těchto látek a jejich účincích vedly v mnoha oblastech k používání vzduchových filtrů. Slouží například k čištění přiváděného vzduchu ve větracích a klimatizačních zařízeních, čistí přiváděný a odpadní vzduch laboratoří a nemocnic, odpadní vzduch jaderných elektráren a jsou součástí čistících zařízení mnoha různých průmyslových procesů. Stručně řečeno, technický pokrok vede ke zkoumání nových materiálů, jejich struktur ovlivňující filtrační vlastnosti a vývoji nových technik pro dosažení stále kvalitnějších filtrů.

Tato práce se zaměřila na tři techniky zlepšení filtračních vlastností vláknenných filtrů a jejich kombinace. Jednou z nich je použití nanovláknenné vrstvy pro zvýšení odloučení částic. Velkou předností těchto vláken s průměrem menším než 1 μm je klouzání vzduchu na povrchu vlákna, díky kterému nedochází k takovému nárůstu tlakového spádu jako v případě klasických vláken. Zvýšení efektivity vláknenných filtračních materiálů je však podstatně jednodušší než udržení či dosažení nízkého tlakového spádu. Možnost eliminace tlakového spádu, která je předmětem druhé zkoumané techniky, spočívá ve zvětšení filtrační plochy skládáním. Výroba nabitých vláknenných materiálů, zjišťování vlivu velikosti vloženého náboje na filtrační vlastnosti a sledování životnosti náboje, bylo již předmětem mnoha prací a výzkumů. Tato práce však rozšiřuje problematiku nabíjení o studium vlivu náboje na skládané filtry s přidanou nanovláknennou vrstvou. Nános povrchový náboj je třetí zkoumanou technikou.

1 Základní filtrační charakteristiky

Jak uvádí Lukáš [1] je filtrace jedním ze separačních procesů a jejím cílem je separace disperzního podílu nebo disperzní fáze od disperzního prostředí daného disperzního systému. Disperzním podílem přitom rozumíme částice rozptýlené v disperzním prostředí, kterým může být plyn (nebo směs plynů, nejčastěji vzduch) nebo kapalina. Podle charakteru disperzního prostředí je možno filtraci rozdělit na filtraci lyosolů a aerosolů. Z fenomenologického hlediska může být filtrační proces charakterizován několika parametry.

Tlakový spád filtru Δp je definován rovnicí

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (1.1)$$

kde p_1 je tlak před filtrem a p_2 tlak za filtrem. V první fázi filtrace, v případě čistého filtru, závisí hodnota tlakového spádu na vlastnostech disperzního prostředí a vlastnostech porózního materiálu tvořící filtr. Během dlouhodobé filtrace však důsledkem usazování jednotlivých disperzních částic ve filtru dochází ke strukturním změnám a tzv. zanášení filtru. V takovém případě jak hodnota tlakového spádu, tak i odlučivost, daná vztahem (1.2), závisí také na vlastnostech částic usazených na povrchu či uvnitř filtru [2].

Jestliže G_1 a G_2 označují hmotnostní proudy disperzního podílu před filtrem a za filtrem, pak efektivitu neboli odlučivost filtru lze definovat vztahem

$$E = 1 - \frac{G_2}{G_1} \quad (1.2)$$

Průnik filtru P je vlastnost související s efektivitou. Je určen vztahem

$$P = \frac{G_2}{G_1} \quad (1.3)$$

a dosazením do rovnice (1.2) vyplývá relace

$$E + P = 1 \quad (1.4).$$

2 Filtrační mechanismy

Bylo zjištěno, že ve filtraci aerosolů vláknitými filtry působí řada mechanismů. Tyto níže uvedené filtrační mechanismy jsou podrobně popsány a vysvětleny v práci Josefa Picha [2].

Difusní usazování

V důsledku Brownova pohybu nesplývají trajektorie částic s proudnicemi plynu, částice difundují z proudu plynu k jednotlivým vláknům a usazují se na nich. Intenzita Brownova pohybu a s tím související účinnost difusního usazování roste se snižující se velikostí částic. Největší účinek Brownova pohybu se projevuje především při malých rychlostech.

Přímá interpretace

Tento mechanismus přímo souvisí s velikostí částic. K zachycení částice dochází již v okamžiku, kdy se přiblíží k povrchu vlákna na vzdálenost jejího poloměru.

Gravitační usazování

Jednotlivé částice mají určitou sedimentační rychlost podmíněnou účinkem gravitačního pole. V důsledku toho se trajektorie částic odchyľují od proudnic plynu a částice se mohou v důsledku tohoto odchyľení usadit na vlákne. I tento mechanismus usazování se projevuje především při malých rychlostech a při kolmém průchodu vzduchu přes filtr.

Elektrostatické usazování

Jednotlivé disperzní částice i vlákna filtru mohou nést určitý elektrostatický náboj. V důsledku sil působících mezi těmito náboji (Coulombovy, indukční a jiné síly) může rovněž dojít k usazení částic na vlákne. V případě tohoto mechanismu však účinek elektrostatických sil roste s růstem velikosti částic a se snižující se rychlostí proudění.

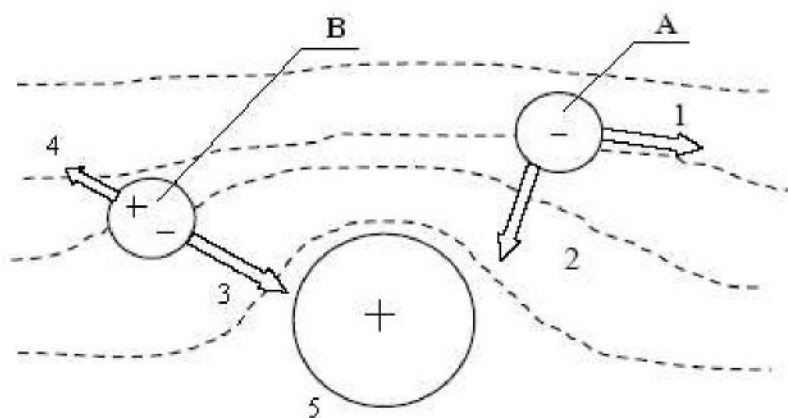
Setrvačné usazování částic

Jednotlivé částice v důsledku své setrvačnosti nesledují zakřivení proudnic vlivem kolmého postavení vlákna ke směru proudění, ale pohybují se proti vláknu a následně se na něm usazují. Intenzita tohoto mechanismu roste se vzrůstající velikostí částic a rychlosti proudění.

2.1 Mechanismus uchycení částic nabitými filtračními vlákny

Elektrostaticky nabitý filtr poskytuje nízký průnik submikronových částic, přičemž vykazuje nízký tlakový spád. Nízký průnik vyplývá ze zvětšení účinků mechanického usazení (difúze, přímé uchycení, setrvačnost) elektrostatickými přitažlivými silami.

Jestliže vlákno ve filtru nese elektrický náboj, přidružené elektrické pole může působit na letící částici dvěma způsoby [3], znázorněnými na obr. 1. Uchycení opačně nabitých částic (A) Coulombovskými silami je samozřejmé. Uchycení neutrálních částic (B) nastává s působením polarizačních sil. Elektrické pole vlákna indukuje dipól v neutrální a pak ji přitahuje. Pevnost indukovaného dipólu závisí na objemu a dielektrické konstantě částice, popsané v Pichovi [2]. Složka, která je bližší vláknu, vykazuje přitažlivé síly (3) větší než odpudivé (4), působící na protilehlé straně, protože se elektrické pole zmenšuje se vzdáleností od vláken. Tato slabá nerovnováha je důvodem, že je částice přitahována ať už je jakýkoliv znak náboje ve vláknu. Efektivita tohoto mechanismu a Coulombovského vlivu závisí na podílu unášecí rychlosti částice (2), pod vlivem elektrické síly má tendenci přitahovat je na vlákno, a rychlosti proudícího pole (1), která je odnáší pryč. Všechny elektrostatické filtry tedy mají větší efektivitu při nízkých filtračních rychlostech, protože při nízké rychlosti mají síly více času působit [4].



Obr. 1: Znáznornění uchycení opačně nabité částice (A) a neutrální částice (B) nabitým filtračním vláknem (5), publikováno v disertační práci Kolínové [4]. (1) rychlost proudícího vzduchu, (2) unášecí rychlost elektrostatických sil, (3) přitažlivá síla v záporné části indukovaného dipólu převyšuje odporovou sílu (4) v kladné části.

2.2 Techniky přípravy permanentně nabitých vláknenných útvarů

Příprava vláknenných elektretů pro filtrační účely může probíhat v podobě třech postupů. Triboelektrické nabíjení vláken třením, např. v průběhu procesu mykání, koronovým výbojem či elektrostatickým zvlákňováním. Proces nabíjení je účinný v případě, že probíhá nad teplotou skelného přechodu daného polymeru. Životnost takto získaného náboje je několik roků, i když se zpočátku sleduje určitý pokles intenzity a následná stabilita. Zrychlenou degradaci náboje může způsobit například spolupůsobení relativní vlhkosti a energie ve formě tepla nebo záření [5].

Triboelektrické nabíjení

Jedná se o metodu nabíjení vláken třením v průběhu mykání, kterou se zabýval Smith a kolektiv. Využil různých schopností jednotlivých typů vláken vytvářet statický náboj vzájemným třením nebo třením s kovy. Podmínkou účinnosti této metody je existence elektrického pole mezi vlákny, tzn. přítomnost kladných a záporných nábojů.

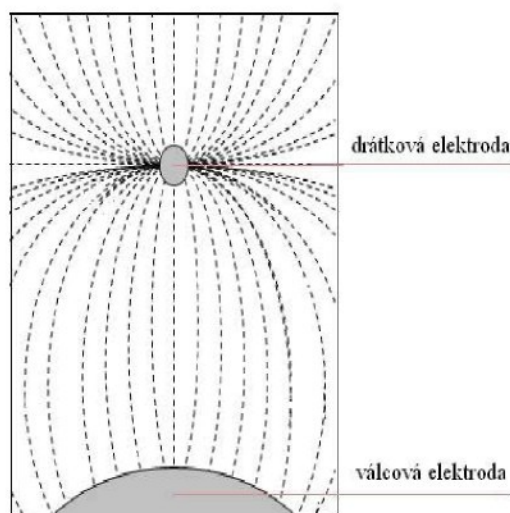
Byly vyzkoušeny různé směsi vláken bez antistatické preparace, což značně komplikuje zpracovatelnost vláken a ve většině případů byl vzniklý náboj nízký a nestabilní [5].

Elektrostatické zvlákňování

Technologie elektrostatického zvlákňování je založena na formování taveniny polymeru ve vlákna působením silného elektrostatického pole (30 kV). Vzniklá vlákna jsou současně vlivem pole ukládána na podložku, nejčastěji textilní materiál, pohybující se po povrchu protielektrody. Elektrostatickým zvlákňováním lze zpracovávat prakticky všechny tavitelné polymery. Nejčastěji jsou to polypropylen, polyetylen, polykarbonáty a polyamidy. V tavenině polymeru jsou makromolekuly a zejména jejich jednotlivé funkční skupiny dostatečně pohyblivé. Působí-li na ně stejnosměrné elektrické pole, orientují se v něm polární skupiny vzhledem k jeho směru. Po zchlazení polymeru se pohyblivost řetězců drasticky sníží a zaujaté polohy jsou dlouhodobě fixovány. Kolem vláken pak existuje permanentní elektrické pole [6].

Koronové nabíjení

Existuje velké množství elektrizačních zařízení, která vytváří koronový výboj. Jeden ze strojů, použitý také v rámci tohoto experimentu, je k dispozici na katedře Netkaných textilií. K nabíjení vlákenné vrstvy využívá soustavy válcové a drátkové elektrody s rozdílným potenciálem. Velký rozdíl průměrů elektrod, jak ukazuje obr. 2, je příčinou vzniku nehomogenního elektrostatického pole, které způsobuje polarizaci vzduchových částic. Vzniklé ionty se na základě Coulombova zákona pohybují směrem k opačné elektrodě a jsou nuceny projít přivedeným vlákenným materiálem na němž indukují náboj.

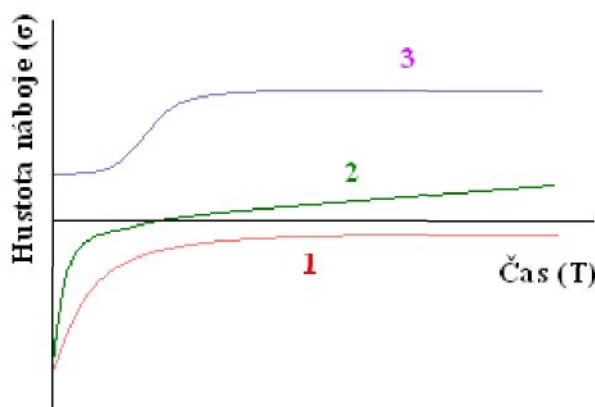


Obr. 2: Zobrazení nehomogenního elektrostatického pole mezi dvěma elektrodami elektrizačního zařízení.

Životnost náboje elektretů

Elektret je konstantní elektrizované dielektrikum, které se od jiných dielektriků odlišuje tím, že je schopen na svých protilehlých stranách nést náboje opačných znamének, které se mohou uchovat během dlouhé doby. Gubkin [7] uvádí, že v závislosti na velikosti polarizujícího pole a dielektrických vlastností materiálu elektretu mohou nastat tři případy průběhu změny hustoty jeho povrchového náboje v závislosti na čase. Rozhodující roli přitom hraje intenzita pole polarizace. V prvním případě, charakterizujícím křivkou 1 na obr. 3, se heteronáboj elektretu (náboj se zápornou hodnotou povrchového náboje) za dobu několika týdnů sníží téměř na nulu. V druhém případě, jak ukazuje křivka 2, heteronáboj rychle klesá k nule, následně se mění v homonáboj (náboj s kladnou hodnotou povrchového náboje) a po dosažení maxima se téměř nemění. V posledním případě nese elektret ihned po polarizaci homonáboj, který roste do maxima a pak zůstává téměř konstantní. Křivka 3 na obrázku 3 [4].

Životnost elektretů, tedy doba během níž si udrží svůj náboj, je velmi rozdílná. Velikost povrchového náboje elektretů se mění ze dne na den a závisí nejen na již zmíněných vlastnostech elektrizovaného dielektrika a velikosti elektrického pole, ale samozřejmě také na klimatických podmínkách prostoru určeného ke skladování materiálu či použití již zhotovených výrobků. Nejstabilnější náboj vykazují elektrety z polykarbonátů a polymerů obsahujících fosfor [8].



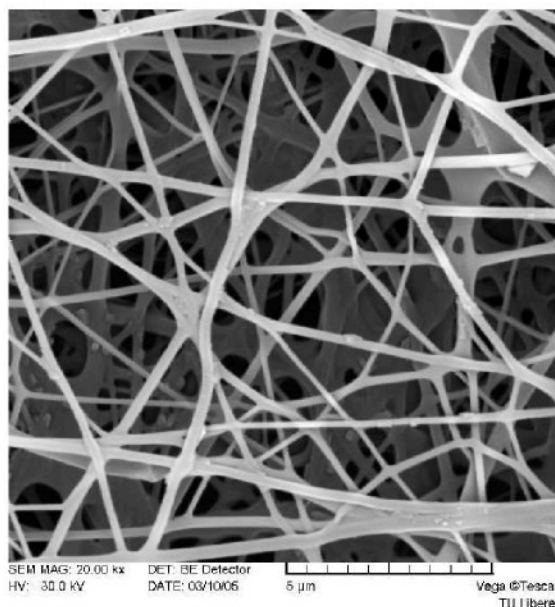
Obr. 3: Tři případy průběhu změny hustoty povrchového náboje elektretu v závislosti na čase.

3 Filtrace při malých Knudsenových číslech - nanofiltrace

Používání vláknenných filtračních materiálů má výhodu především v možnosti dosažení vysoké efektivity a nízkého odporu proudu vzduchu. Efektivita filtru je úzce spojena s průměrem vláken. Elektrospinning umožňuje výrobu materiálů o průměru vláken menších než 1 mikron. Vlákná jsou díky svému specifickému povrchu a specifickým okrajovým podmínkám, popsaným v kapitole 3.3, schopna zachytit nebezpečné bakterie, viry, ale také cigaretový kouř. Lepších filtračních vlastností může být také dosaženo vrstvením a kombinací s jinými materiály.

3.1 Charakteristika a výroba nanovláken

Za nanovlákná (obr. 4) obecně považujeme vlákna s průměrem menším než 1 μm . Pro výrobu nanovláken bylo v posledních letech použito několik technologických procesů. Za nejvhodnější je považován elektrospinning, který se zdá být do budoucna vhodnou metodou pro průmyslovou výrobu ultratenkých vláken z různých polymerů ve formě roztoku i taveniny. Přesto, že termín „elektrospinning“ byl poprvé použit v roce

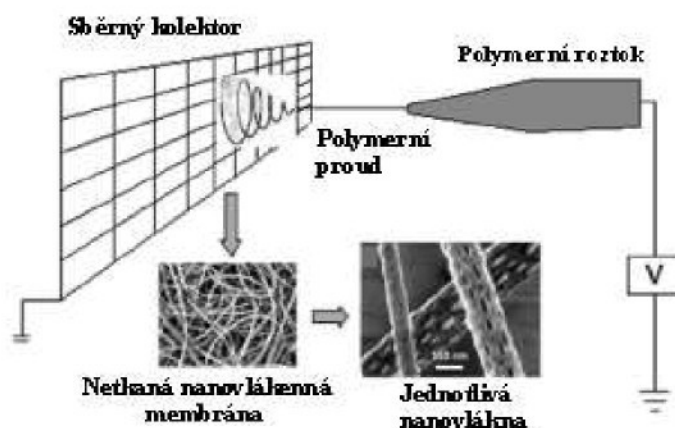


Obr. 4: Nanovláknenná vrstva z PVA vyrobená technologií electrospinningu.

1994, jeho základní idea je datována rokem 1944, kdy Formalas publikoval několik patentů [9-12], ve kterých popsal experimentální zařízení pro výrobu polymerního vlákna za použití elektrostatické síly [13]. Také katedra Netkaných textilií Technické univerzity v Liberci vyvinula a následně patentovala [14] další technologii výroby nanovláken a modifikací této technologie se podařilo docílit objemnějších vláknenných vrstev.

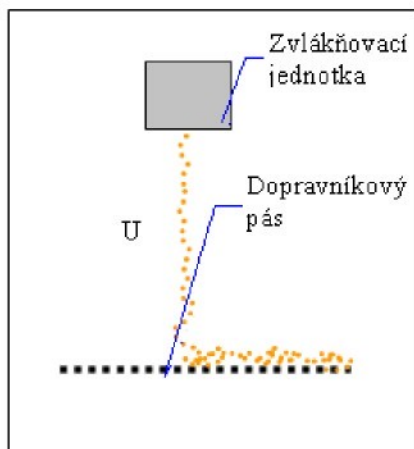
3.2 Elektrospinning a modifikace elektrospinningu

Elektrospinning je metoda umožňující výrobu extra jemných vláken submikronových průměrů. Princip vzniku vláken z polymerního roztoku je znázorněn na obr. 5.

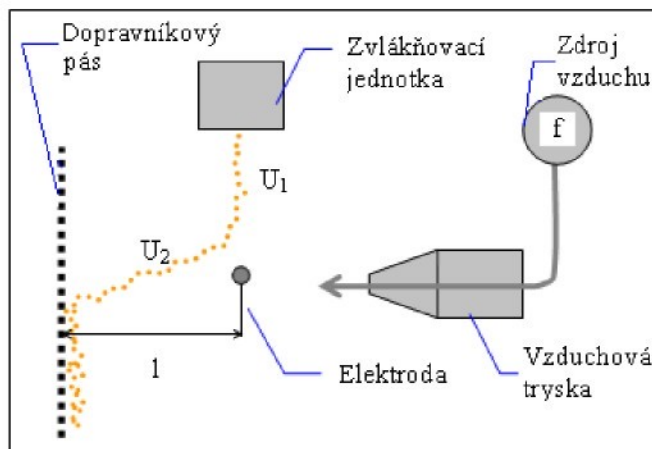


Obr. 5: Schéma, převzaté z [13], znázorňující vznik nanovláken z polymerního roztoku metodou elektrospinningu.

Polymerní roztok je vložen do silného elektrostatického pole několika tisíc voltů. Vlivem elektrostatického pole dochází ke zvláknění polymerního roztoku a transportu vláken na sběrný kolektor. Proces výroby tedy probíhá pouze v jedné operaci. Modifikovaný proces elektrospinningu, umožňující výrobu objemnějších nanovláknenných vrstev, probíhá ve dvou operacích. Vlákná vzniklá z polymerního roztoku jsou nejprve unášena působením elektrostatického pole mezi zvláknovací jednotkou a elektrodou a následně jsou ukládána na podkladovou textilií vlivem proudu vzduchu a elektrostatického pole mezi elektrodou a sběrným kolektorem. Základní princip elektrospinningu a modifikovaná metoda jsou znázorněny na obr. 6 a 7 [15].



Obr. 6: Obrázek základní metody elektrospinningu, převzatý z [15]. U je napětí mezi zvlákňovací jednotkou a dopravníkovým pásem.



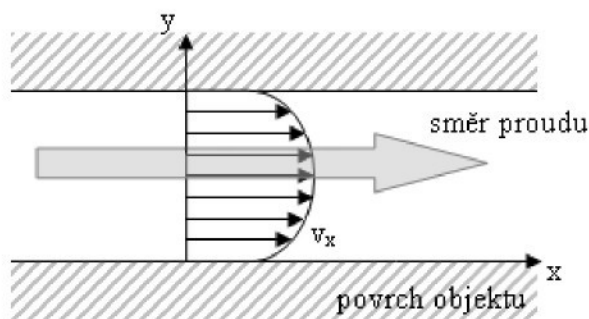
Obr. 7: Znáznornění modifikované metody elektrospinning, převzato z [15], s nastavitelnými technologickými parametry. U_1 je napětí mezi zvlákňovací jednotkou a elektrodou, U_2 je napětí mezi elektrodou a dopravníkovým pásem a f označuje frekvenci zdroje proudu vzduchu.

3.3 Princip nanofiltrace

Jeden z hlavních faktorů ovlivňující tvar proudění kapalin či plynů na povrchu objektu je brzdicí síla vztažená na jednotku plochy, neboli tečné napětí, které je přímo úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti ve směru kolmém k toku (obr.8). Závislost popisuje vztah

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y}, \quad (3.3.1)$$

kde τ je tečné napětí, $\partial v_x / \partial y$ nazýváme gradientem rychlosti ve směru kolmém k toku a η je označení dynamické viskozity [15,16,17]. Tečné napětí je projevem vnitřního tření plynu a také tření mezi plynem a povrchem objektu.

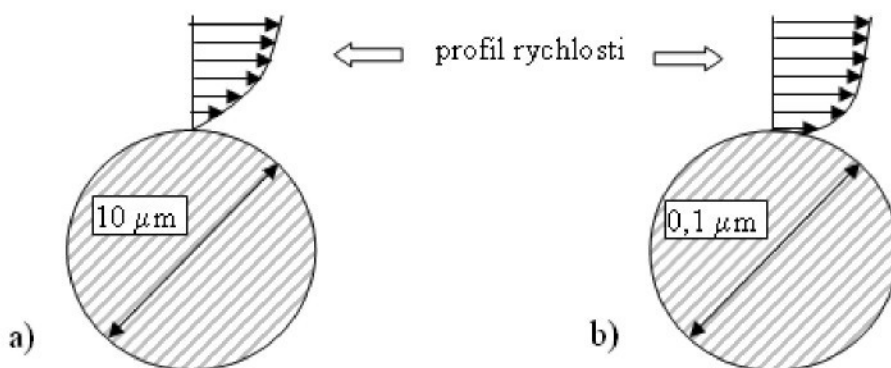


Obr.8: Zobrazení rozložení rychlosti tekutiny v_x proudící kruhovým potrubím.

Obecně filtrační teorie vychází z předpokladu, že rychlost proudění na povrchu statického objektu, a tedy i vlákna, je nulová (obr.9a). Teorie však pozbývá platnosti v případě, kdy se velikost objektu blíží nebo je menší než střední volná dráha molekul plynu. Z matematického hlediska tento případ odpovídá filtraci při malých Knudsenových číslech, neboli filtraci při klouzání plynu na povrchu vláken (obr.9b). Knudsenovo číslo Kn lze vyjádřit vztahem

$$Kn = \frac{\lambda}{r_f}, \quad (3.3.2)$$

kde λ je střední volná dráha molekul plynu a r_f je specifický rozměr (poloměr vlákna) [2,13,16,17]. Střední volná dráha molekul vzduchu je za standardních podmínek (zejména tlaku) 0,066 μm . V případě, že se hodnota Kn pohybuje kolem 0,25, je nutno specifickou podmínku klouzání plynu na povrchu, označovanou také “slip-flow“, zahrnout. Následkem “slip-flow“ je brzdící síla na povrchu vlákna menší než je tomu v případě vlákna klasického, což se projeví nižším tlakovým spádem. Navíc trajektorie proudu vzduchu kolem povrchu vlákna je těsnější a vede tak ke zvýšení efektivity [16,18,19,20].



Obr.9: Profil rychlosti proudění vzduchu na povrchu a) mikrovlákná, b) nanovlákná. Převzato z [20].

Tato teorie vychází z předpokladu, že uvažujeme pouze jedno jediné vlákno. Představme si dvě vlákenné vrstvy o přibližně stejných plošných hmotnostech, ale výrazně odlišném průměru vláken. Vrstva tvořená vlákny s menšími průměry (nanovlákná vrstva) tak obsahuje více vláken a tím pádem také více třecích ploch, což vede k růstu tlakového spádu, nicméně díky klouzání na povrchu vlákna je tento růst mnohem nižší.

4 Vliv filtrační plochy na tlakový spád

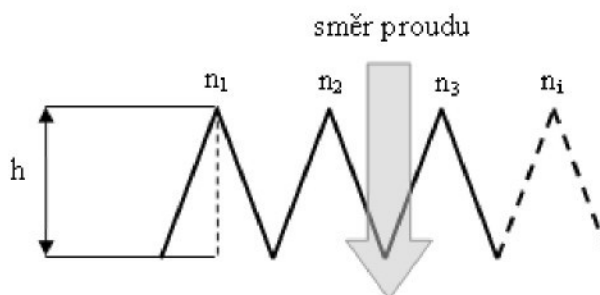
U vlákenných filtračních materiálů je dosažení vyšší efektivity podstatně snadnější než udržení nízkého tlakového spádu. Jednou z možností jak eliminovat velký tlakový spád je zvýšit filtrační plochu materiálu. Tento předpoklad vyplývá z Darcyho zákona popsaného vztahem (4.1) pro průtok disperzního systému Q homogenním filtračním materiálem o plošném obsahu A .

$$Q = k \frac{\Delta p A}{t}, \quad (4.1)$$

kde filtrační vlastnosti materiálu v daném směru toku jsou popsány koeficientem propustnosti k a Δp značí tlakový spád filtru o tloušťce t [1].

Rovnice popisuje lineární závislost mezi průtokem disperzního systému a plochou materiálu. Z tohoto vztahu vyplývá, že zvýšením plochy filtru se zvýší průtok, což vede ke snížení tlakového spádu.

Jednou z možností jak docílit větší filtrační plochy je úprava skládáním, zobrazená na obr. 10.



Obr. 10: Úprava filtrační plochy naskládáním. Efektivita a tlakový spád jsou závislé na typu materiálu, podmínkách filtrace, ale také na výšce skladů h a počtu skladů na jednotku délky n .

Graf na obr. 11 uváděný Brownem [21] vyjadřuje obecnou závislost tlakového spádu na počtu skladů. Se zvyšujícím se počtem skladů na jednotku délky hodnota tlakového spádu klesá až do okamžiku kritického počtu skladů, kde v důsledku příliš těsného kontaktu, způsobující omezení proudění, dochází k jeho opětovnému nárůstu. Ideální počet skladů a výška skladů závisí především na typu filtračního materiálu a podmínkách filtrace.

Ověření této závislosti a zjištění vlivu počtu skladů na efektivitu filtrace je jedním z cílů této práce.



Obr. 11: Obecné vyjádření závislosti tlakového spádu skládaného filtru na počtu skladů uváděné Brownem [21].

5 Předmět a cíl práce

Předmětem této práce bylo prostudovat problematiku týkající se zlepšování filtračních vlastností vlákenných materiálů za použití technik nánosu povrchového náboje, přidání nanovlákněné vrstvy a úpravy povrchu materiálu skládáním. Každá technika pozitivně ovlivňuje pouze některé filtrační parametry a na jiné může mít naopak vliv negativní. Snaha o vyzdvížení pozitivních a potlačení negativních vlastností vlákenného materiálu byla řešena kombinací jednotlivých již zmíněných technik.

6 Označení a popis jednotlivých typů vzorků

Pro experiment byly použity vzorky vrstev meltblownu z polypropylenů, dva typy nanovlákněné vrstvy z polyvinylalkoholu na spunbondovém polypropylenovém podkladu a pojivá polyetylenová vrstva (petex).

Tabulka 1 popisuje základní použité vlákenné vrstvy pro výrobu vzorků, včetně jejich plošných hmotností. V tabulce 2 jsou popsány plošné filtry z vrstev meltblownu o dvou plošných hmotnostech s přidanou plošnou nebo objemovou nanovlákněnou vrstvou různých plošných hmotností. Označení skládaných filtrů z MB kombinující počet skladů, výšku skladů nebo typ vložené nanovlákněné vrstvy uvádí tabulka 3. Jedna z použitých technik pro zvýšení efektivity filtru spočívá ve vložení povrchového náboje a vystavení nabitého vlákenného materiálu vlhkosti jako v běžných provozních podmínkách. Nabité filtry jsou v experimentu značeny hvězdičkou umístěnou za označením vzorku (např. ^^MB/N/S 120/1,2 O*) a nabité filtry vystavené vlhkosti dvěma hvězdičkami (např. ^^MB/N/S 120/1,2 O**).

Označení vrstev	Popis
MB 24	Pouze vrstva meltblown, plošná hmotnost 24 g/m ²
MB 120	Pouze vrstva meltblown, plošná hmotnost 120 g/m ²
S	Pouze spunbondová vrstva, plošná hmotnost 21 g/m ²
S ₁	Pojivá spunbondová vrstva: spunbond 17 g/m ² & polyetylenová vrstva (petex)
N 1,2 O	Pouze nanovláknenná vrstva objemová, plošná hmotnost 1,2 g/m ²
N 2,4 O	Pouze nanovláknenná vrstva objemová, plošná hmotnost 2,4 g/m ²
N 1,9 P	Pouze nanovláknenná vrstva plošná, plošná hmotnost 1,9 g/m ²
N 3,8 P	Pouze nanovláknenná vrstva plošná, plošná hmotnost 3,8 g/m ²

Tab. 1: Popis základních použitých vláknenných vrstev pro výrobu filtračních vzorků.

Označení vrstev	Popis
MB/N/S 24/1,2 O	Meltblown 24 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 1,2 g/m ² & spunbond
MB/N/S 120/1,2 O	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 1,2 g/m ² & spunbond
MB/N/S 24/2,4 O	Meltblown 24 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 2,4 g/m ² & spunbond
MB/N/S 120/2,4 O	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 2,4 g/m ² & spunbond
MB/N/S 24/1,9 P	Meltblown 24 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 1,9 g/m ² & spunbond
MB/N/S 120/1,9 P	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 1,9 g/m ² & spunbond
MB/N/S 24/3,8 P	Meltblown 24 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 3,8 g/m ² & spunbond
MB/N/S 120/3,8 P	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 3,8 g/m ² & spunbond

Tab. 2: Popis plošných filtrů z MB kombinované s nanovláknennými vrstvami.

Označení vrstev	Popis
^^MB 120/50/2	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 50 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB 120/80/2	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 80 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB 120/100/2	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 100 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB 120/147/2	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB 120/300/2	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 300 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB 120/147/1	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 1cm
^^MB 120/147/1,5	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 1,5cm
^^MB 120/147/2,5	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2,5cm
^^MB 120/147/3	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 3cm
^^MB 120/147/4	Meltblown 120 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 4cm
^^MB/N/S 120/1,2 O	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 1,2 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB/N/S 120/2,4 O	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva objemová 2,4 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB/N/S 120/1,9 P	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 1,9 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2cm
^^MB/N/S 120/3,8 P	Meltblown 120 g/m ² & nanovláknenná vrstva plošná 3,8 g/m ² & spunbond, 147 skladů/m, výška skladu 2cm

Tab. 3: Označení skládaných filtrů z MB kombinující počet skladů, výšku skladů a typ nanovláknenné vrstvy

7 Testování filtračních vlastností

Na základě rozdílných filtračních schopností filtrů, a tedy i rozdílných oblastí použití, byly pro jednotlivá filtrační media vyvinuty také rozdílné zkušební postupy.

Všechny testy tohoto experimentu byly provedeny na katedře Netkaných textilií Technické university v Liberci podle britské normy BS 4400 za použití přístroje C.E.N. BENCH RIG. Přístroj společnosti Wallisdown Ltd typu 1100 je schématicky znázorněném na obr. 12.

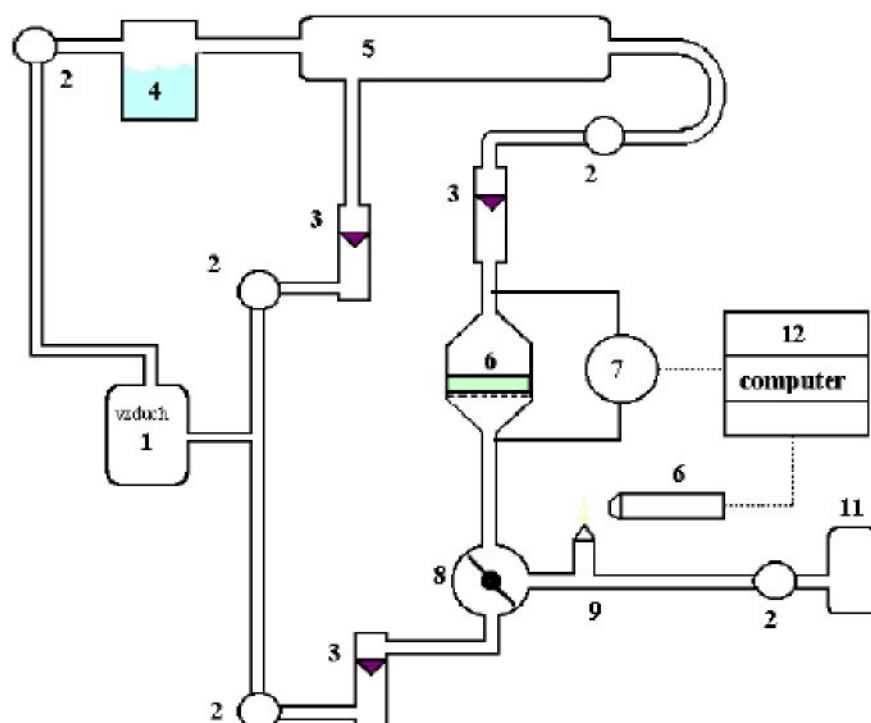
7.1 Měření efektivity a tlakového spádu aerosolem NaCl

Tato metoda je částí normy EN 143 a k testování využívá aerosol NaCl o velikosti částic 0,02 – 2 μ m se střední hodnotu 0,6 μ m. Náletová rychlost aerosolu byla 5 m/min a velikost testovací plochy vzorku 100 cm².

Roztok 10% NaCl je rozprášen a zbaven vody ve vypařovací trubici (5). Výsledkem jsou částice soli definované velikosti. Tyto částice nalétávají definovanou rychlostí na testovaný vzorek (6) (zároveň je snímán tlakový spád vzorku). V hořáku (9) hoří modrý plamen směsi vodíku a vzduchu. Projdou-li testovaným filtrem částice NaCl, obarví plamen do žluta. Čím více částic, tím větší je intenzita žluté barvy plamene. Intenzitu žluté barvy plamene snímá spektrofotometr. Výstupem je hodnota napětí v mV, hodnota průniku částic testovaným vzorkem je určena vztahem

$$P = \frac{U_A}{U_B} [\%], \quad (7.1.1)$$

kde U_A je napětí naměřené na testovaném vzorku, U_B je maximální napětí naměřené na tzv. 100%-ním vzorku, tedy za situace, kdy v měřící cele není upnut žádný vzorek [22].



Obr. 12: Schéma testovacího přístroje C.E.N. BENCH RIG, převzaté z [22]. (1) přívod stlačeného vzduchu, (2) regulační ventil, (3) průtokoměr, (4) rozprašovač, (5) vypařovací trubice, (6) měřící cela se vzorkem filtru, (7) měření tlakového spádu, (8) přepínací ventil, (9) hořák, (10) spektrofotometr snímající intenzitu žlutého světla, (11) láhev se stlačeným vodíkem, (12) počítač.

7.2 Filtrační vlastnosti plochých vzorků meltblownu

V rámci první části tohoto experimentu byly testovány vzorky dvou plošných hmotností, v oblasti filtračních materiálů velmi používaných, elektrizovaných meltblownů firmy Ecotex s.r.o. Aby bylo možno zjistit vliv elektrostatického náboje na efektivitu a tlakový spád, byla použita řada metod pro jeho odstranění. Nejprve byl materiál společně s kádinkou vody vložen do sušícího zařízení o teplotě cca 110°C a působením vzniklého vlhkého prostředí po dobu 8 hodin mělo dojít k odstranění elektrického pole z materiálu. Hustota náboje však jen mírně poklesla namísto očekávaného odstranění. Proto byla zvolena metoda ponoření textilie do vody a následného sušení za stejné teploty jako v předcházejícím případě, ale ani přímý kontakt s vodou elektrický náboj beze zbytku neodstranil. Následným měřením se také ukázalo, a jak potvrzuje Marcela Kolínová v disertační práci [4], že odstraněním elektrického náboje z povrchu vlákněné vrstvy vyrobené technologií meltblownu tak neobnovíme jeho původní efektivitu díky skrytému náboji uvnitř vlákněné vrstvy.

V rámci snahy o vybití meltblownu bylo v závěru experimentu, pro dosažení průniku kapaliny ve formě kapiček celou tloušťkou vlákněné vrstvy, využito podtlaku. Nejenže ani v tomto případě nedošlo k odstranění elektrostatického náboje, ale navíc se změnila struktura materiálu, která výrazně ovlivnila filtrační vlastnosti meltblownu. Výsledky efektivit a tlakového spádu jsou uvedeny v příloze č.1.

V průběhu experimentu, konkrétně při výrobě skládaných filtrů s vloženou nanovlákněnou vrstvou popsanou v kapitole 7.3.2, se ukázalo, že elektrostatický náboj je možné odstranit právě pomocí nanovláken. Při fixaci skladů během výroby musel filtr projít teplovzdušnou komorou, kde dodaná tepelná energie umožnila nanovlákněné vrstvě odvést náboj a to se projevilo poklesem filtrační efektivit. Nanovlákněná se tak ukázala jako možný způsob odstranění náboje z vlákněného materiálu a mohla by nalézt uplatnění například v oblasti antistatických filtrů, kde i minimální náboj vzniklý prouděním vzduchu představuje velké nebezpečí.

U plochých vzorků meltblownu byla podle normy BS 4400 testována efektivita zachytu částic a tlakový spád obou plošných hmotností 24 a 120 g/m² při zadané filtrační rychlosti. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 4. Je patrné, že s rostoucí plošnou hmotností meltblownu vzrůstá efektivita, ale současně také tlakový spád.

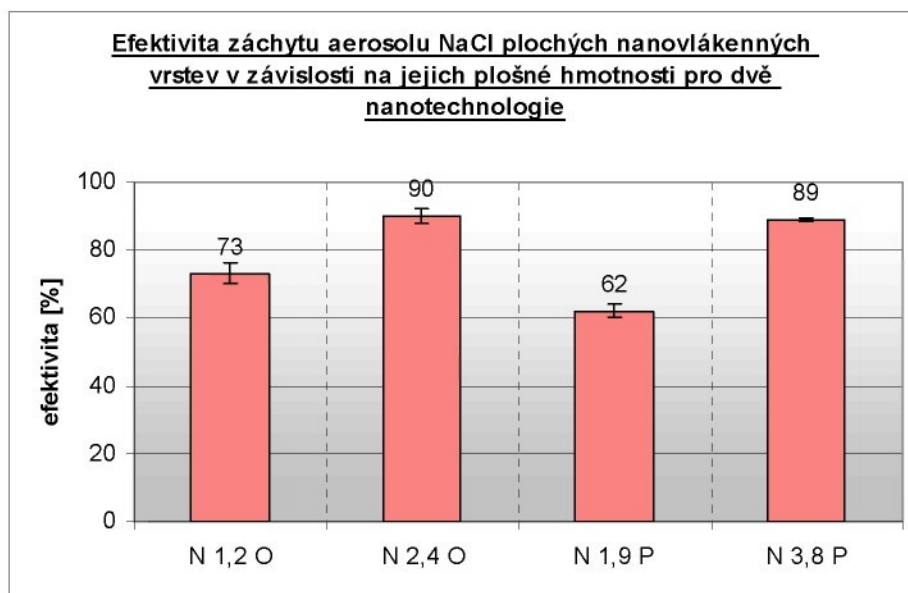
Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
MB 24	59 ± 5	30 ± 2
MB 120	98 ± 1	246 ± 5
S₁	4,6 ± 0	0 ± 0
N 1,2 O	73 ± 3	58 ± 6
N 2,4 O	90 ± 2	131 ± 6
N 1,9 P	62 ± 2	86 ± 8
N 3,8 P	89 ± 0,4	284 ± 4
MB/N/S 24/1,2/O	84 ± 2	120 ± 1
MB/N/S 24/2,4/O	93,8 ± 0,5	182 ± 30
MB/N/S 24/1,9/P	78 ± 1	151 ± 10
MB/N/S 24/3,8/P	94,8 ± 0,5	420 ± 30
MB/N/S 120/1,2/O	98,4 ± 0,1	378 ± 9
MB/N/S 120/2,4/O	99,2 ± 0,2	405 ± 20
MB/N/S 120/1,9/P	99,25 ± 0,06	410 ± 30
MB/N/S 120/3,8/P	99,43 ± 0,02	640 ± 10

Tab. 4: Výsledky testu aerosolem NaCl pro jednoduché a kombinované ploché filtry.

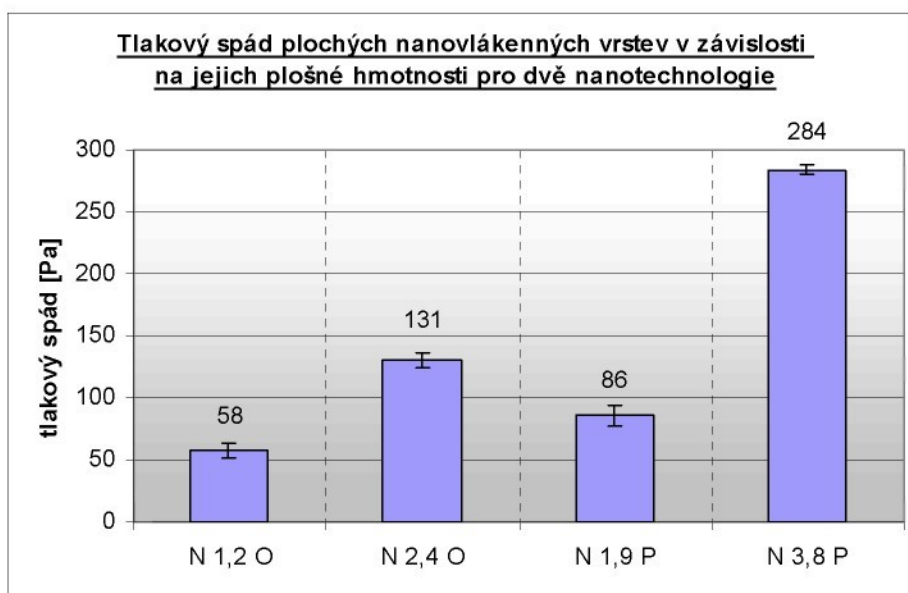
Protože výroba série skládaných vzorků vyžadovala pro zafixování skladů použití spunbodového podkladu s pojivou polyetylenovou vrstvou (petex), byla souhrnně označena “pojivá spunbondová vrstva“ součástí každého měření. Tím lze vyloučit vliv této vrstvy při vzájemném porovnání filtračních vlastností jednotlivých technik a jak uvádí tab. 4, efektivita pojivé spunbondové vrstvy je pouhých 4,6 % a proto ji můžeme ve výsledcích zanedbat.

Jitka Poláčková

Při porovnání naměřené efektivity a tlakového spádu plošné a objemové vrstvy, uvedené v tab. 4 a graficky na obr. 14 a 15, má objemová vrstva buď zhruba stejnou efektivitu a nižší tlakový spád nebo zhruba stejný tlakový spád a vyšší efektivitu nebo vyšší efektivitu a nižší tlakový spád.

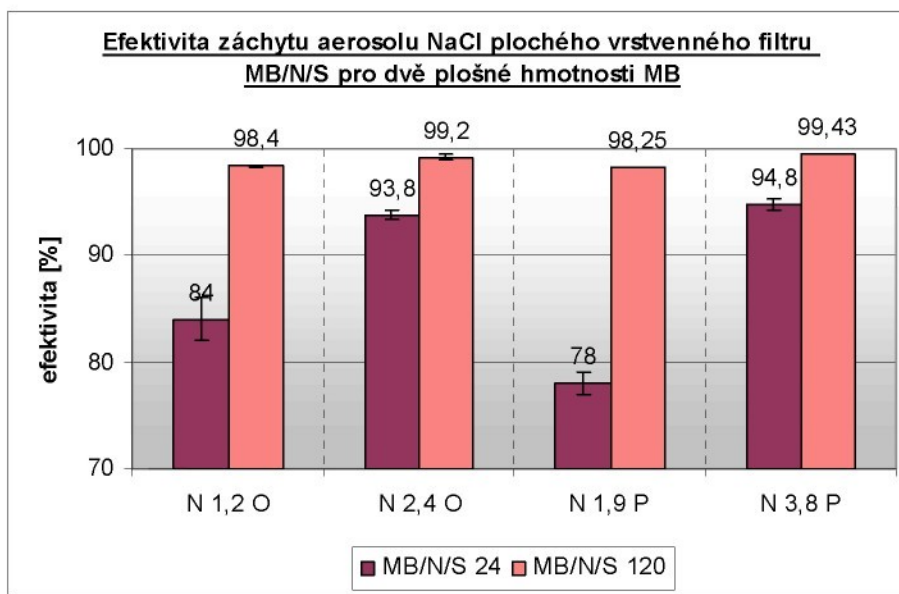


Obr.14: Grafické vyjádření efektivity plošných a objemových nanovláknenných vrstev.

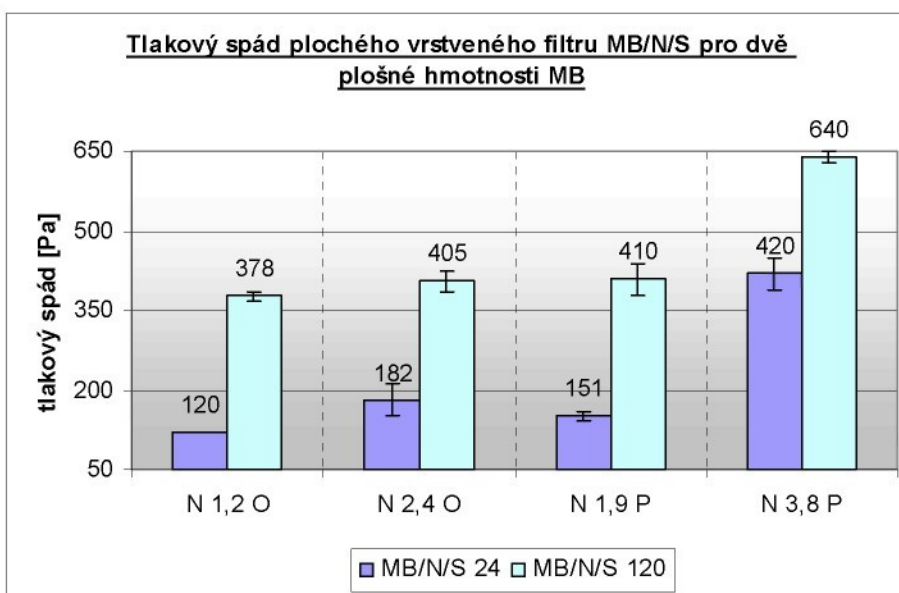


Obr.15: Grafické vyjádření tlakového spádu plošných a objemových nanovláknenných vrstev.

Vložení nanovláknenné vrstvy mezi pojivý spunbond a meltblown se výrazně zvýšila efektivita, ale současně došlo k nárůstu tlakového spádu (tab. 4). Stejně jako v případě samotných nanovláknenných vrstev, vykazují filtry s objemovou vrstvou nanovláken lepší filtrační vlastnosti, které jsou graficky vyjádřeny na obr. 16 a 17.



Obr. 16: Efektivita zachytu aerosolu NaCl plochého vrstvenného filtru MB/N/S pro dvě plošné hmotnosti MB.

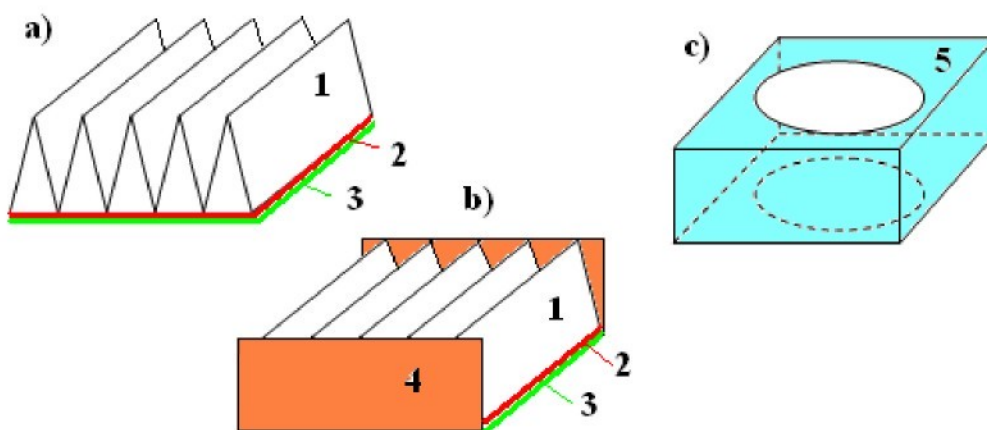


Obr. 17: Tlakový spád plochého vrstvenného filtru MB/N/S pro dvě plošné hmotnosti MB.

Efektivita vrstvených vzorků s těžším meltblownem se pohybuje nad hranicí 98%, ale v doprovodu nežádoucího vysokého tlakového spádu, řádově několik stovek Pascalů.

7.3.2 Úprava filtrační plochy naskládáním

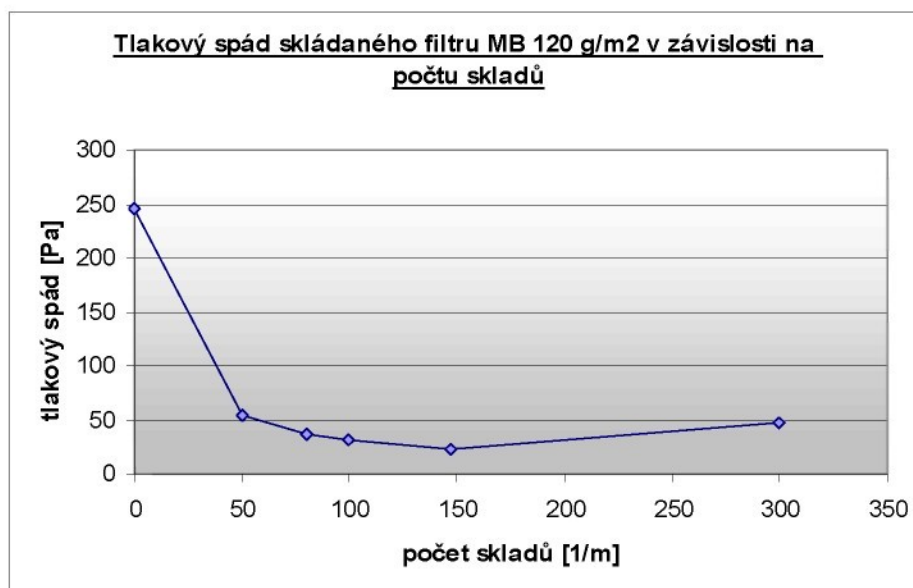
Ve snaze eliminovat velký tlakový spád bylo využito vztahu (4.1) Darcyho zákona pro průtok disperzního systému homogenním filtračním materiálem. Rovnice vyjadřuje lineární závislost mezi průtokem disperzního systému a plochou filtru. Z této závislosti vyplývá, že zvýšením plochy filtru se zvýší průtok, který má za následek snížení tlakového spádu. Jednou z možností jak dosáhnou větší filtrační plochy je úprava materiálu skládáním. Protože ideální počet skladů, jak uvádí Brown [21], závisí na typu filtračního materiálu a podmínkách filtrace, byla nejprve zjištěna závislost počtu skladů a výšky skladů na filtrační vlastnosti samotného meltblownu.



Obr. 18: Výroba vzorku skládaného filtru. a) Naskládání meltblownu (1) a zafixování skladů pomocí pojivové vrstvy (2) na podkladový spunbond (3). b) Utěsnění bočních okrajů (4) a c) vložení celého vzorku do krabičky (5) z důvodu zamezení úniku vzduchu.

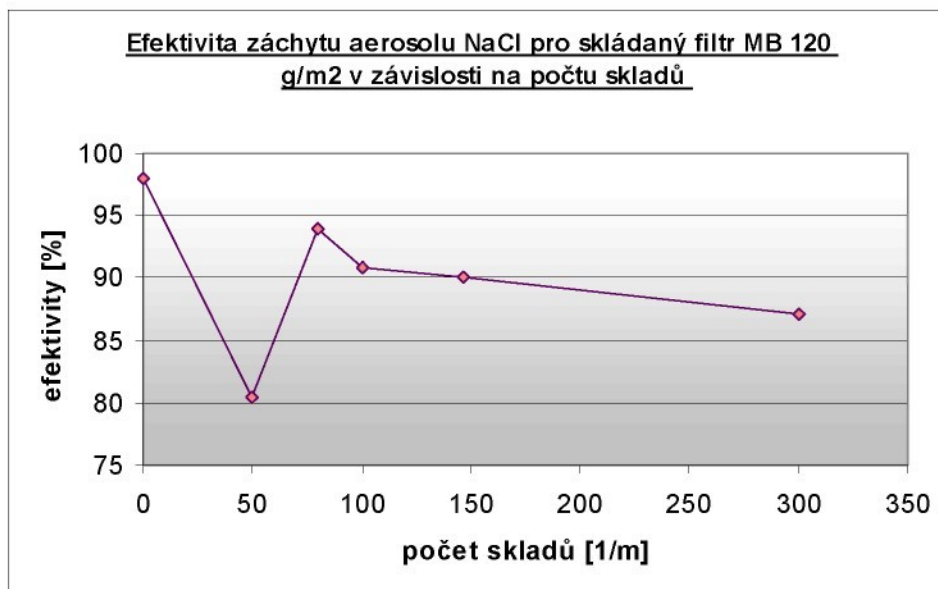
Postup výroby skládaných filtrů je zobrazen na obr. 18. Naskládané vzorky meltblownu (1) o různém počtu skladů byly zafixovány v teplovzdušné pojící komoře při teplotě 130°C a rychlosti síťového dopravníku 0,25 m/min na již výše zmíněný pojivý spunbond S_I (3). Zajištěním bočních okrajů (4) a vložením celého vzorku do papírové krabičky (5) byly vzorky zabezpečeny proti postrannímu úniku vzduchu. Velikost vzorků (15x15 cm) byla limitovaná šířkou objemové nanovlákněné vrstvy.

Výsledky testu filtračních vlastností aerosolem NaCl jsou uvedeny v příloze č.3 a vyjádřeny graficky na obr. 19, 20 jako závislost efektivity a tlakového spádu na počtu skladů



Obr. 19: Závislost tlakového spádu skládaného filtru z MB na počtu skladů.

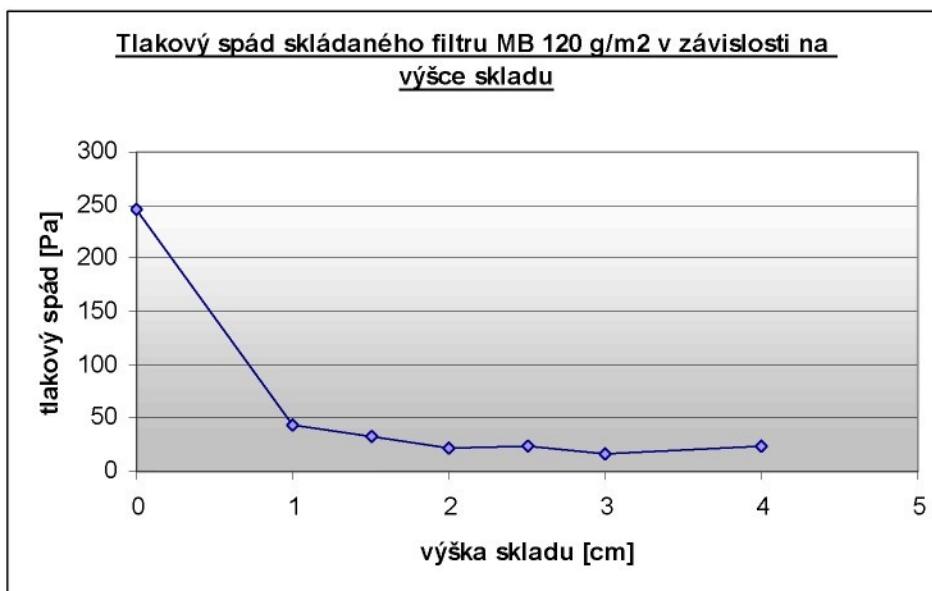
Z obr. 19 je zřejmé, že s rostoucím počtem skladů na jednotku délky hodnota tlakového spádu exponenciálně klesá a při kritické hodnotě cca 150 skladů/m, vlivem těsného kontaktu skladů, tlakový spád opět mírně roste. Tím se také potvrzuje obecné vyjádření závislosti tlakového spádu skládaného filtru na počtu skladů publikované Brownem [25].



Obr. 20: Závislost efektivity zachytu aerosolu NaCl skládaného filtru z MB na počtu skladů.

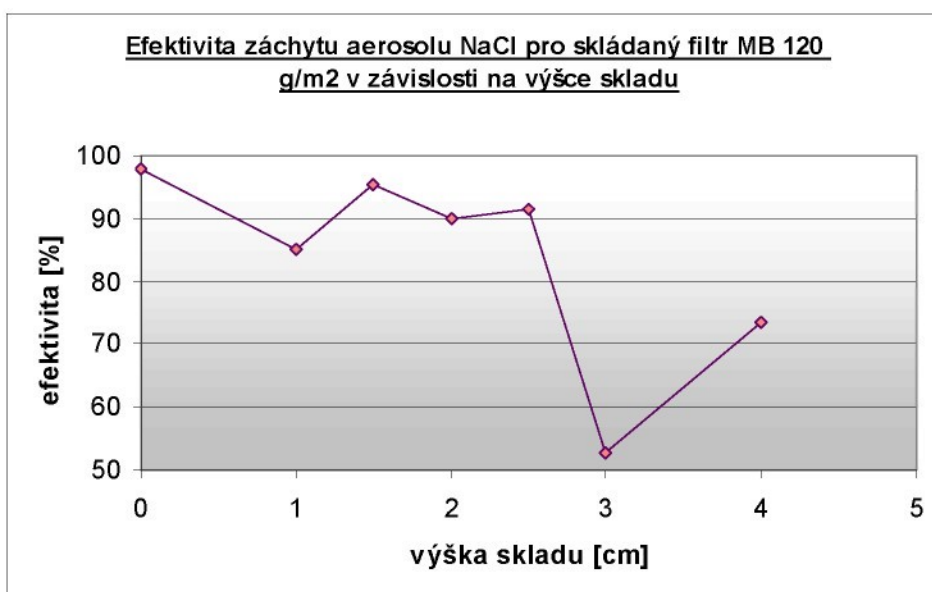
Změnu efektivity (obr. 20) však nelze popsat žádnou jednoduchou závislostí. Pouze v případě, že bychom u vzorku s 50 sklady/m připustili možnost chybného měření či vadného vzorku, mohli bychom závislost efektivity na počtu skladů považovat za klesající. Protože záměrem tohoto měření bylo nalézt filtr s takovým počtem skladů, aby jeho efektivita byla co nejvyšší a to při minimálním tlakovém spádu, není tento vzorek s poměrně vysokým tlakovým spádem stěžejní a za optimální byl zvolen filtr s počtem skladů cca 150/m.

Dalším parametrem ovlivňujícím filtrační vlastnosti skládaných filtrů je výška skladů, jejíž vliv byl testován na skládaném melblownu se 147 sklady/m, vyrobeném stejným výše uvedeným způsobem (obr. 18). Závislost tlakového spádu na výšce skladů, jak ukazuje obr. 21, je obdobná jako v případě počtu skladů. Dá se předpokládat, že s rostoucí výškou skladů klesá hodnota tlakového spádu exponenciálně.



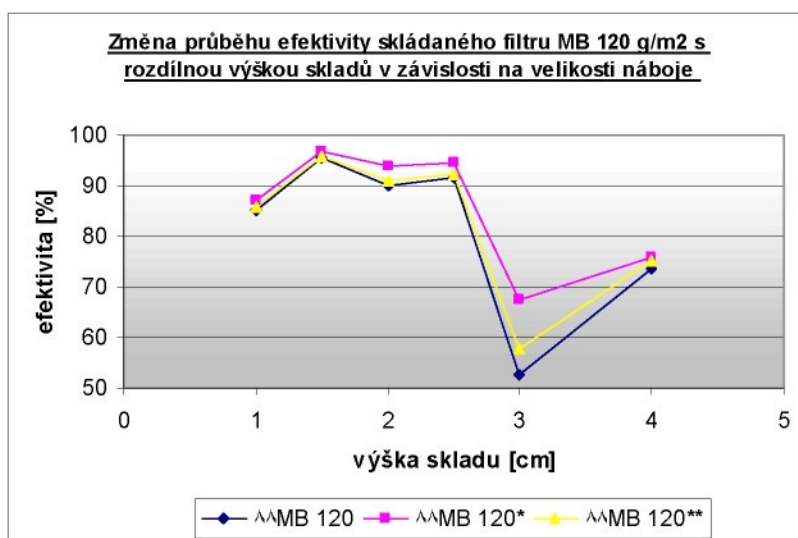
Obr. 21: Závislost tlakového spádu meltblownového skládaného filtru na výšce skladů.

Efektivita vyjádřená jako funkce výšky skladu na obr. 22 nemá jednoznačnou závislost. Do výšky 2,5 cm se pohybuje okolo 90% a s rostoucí výškou skladů jsou hodnoty výrazně nižší.

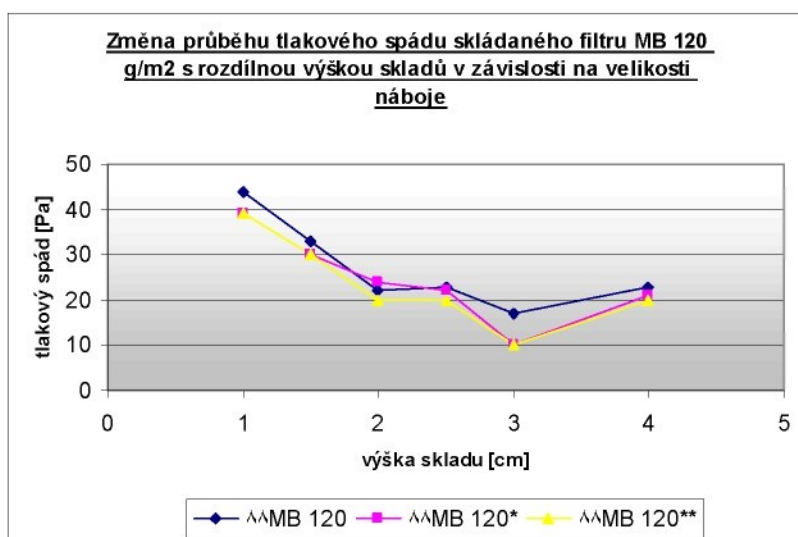


Obr. 22: Závislost efektivity zachytu aerosolu NaCl skládaného filtru z MB na počtu skladů.

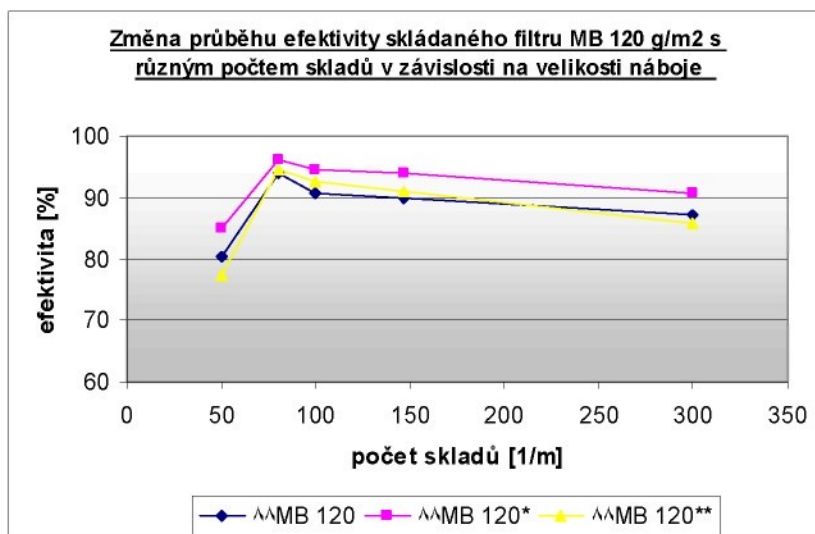
Aby byl vyloučen vliv elektrostatického náboje meltblownové vrstvy na průběh křivek efektivity a tlakového spádu, byly vzorky podrobeny koronovému nabíjení s napětovým potenciálem mezi elektrodami 30 kV, při vzdálenosti elektrod 50 mm a odváděcí rychlosti 0,3 m/min. Popis elektrizačního zařízení je v kapitole 7.3.4. Po odměření filtračních vlastností s časovým odstupem 30 min byly vzorky vloženy do exsikátoru s konstantní relativní vlhkostí 75% RH na dobu 14 dnů.



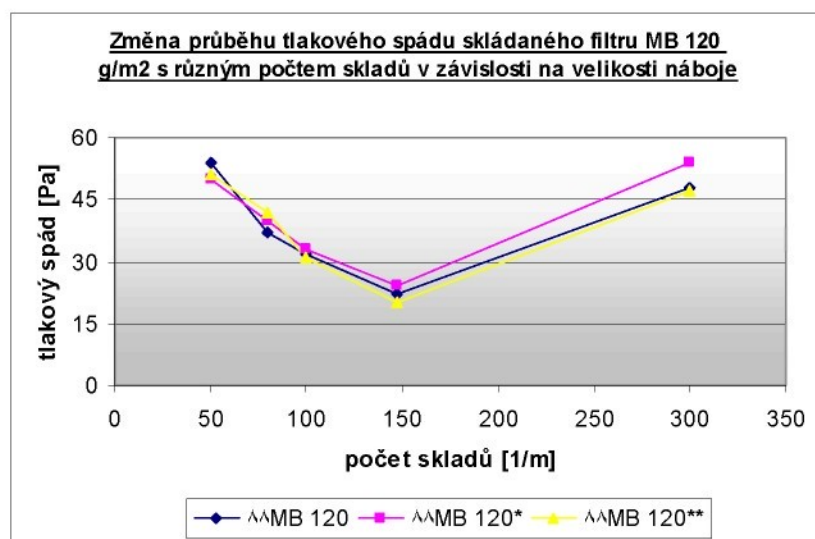
Obr. 23: Změna průběhu efektivity skládaného filtru s různou výškou skladů v závislosti na velikosti povrchového náboje.



Obr. 24: Změna průběhu tlakového spádu skládaného filtru s různým počtem skladů v závislosti na velikosti povrchového náboje.



Obr. 25: Průběh tlakového spádu skládaného filtru s různou výškou skladů v závislosti na velikosti povrchového náboje.



Obr. 26: Průběh tlakového spádu skládaného filtru s různým počtem skladů v závislosti na velikosti povrchového náboje.

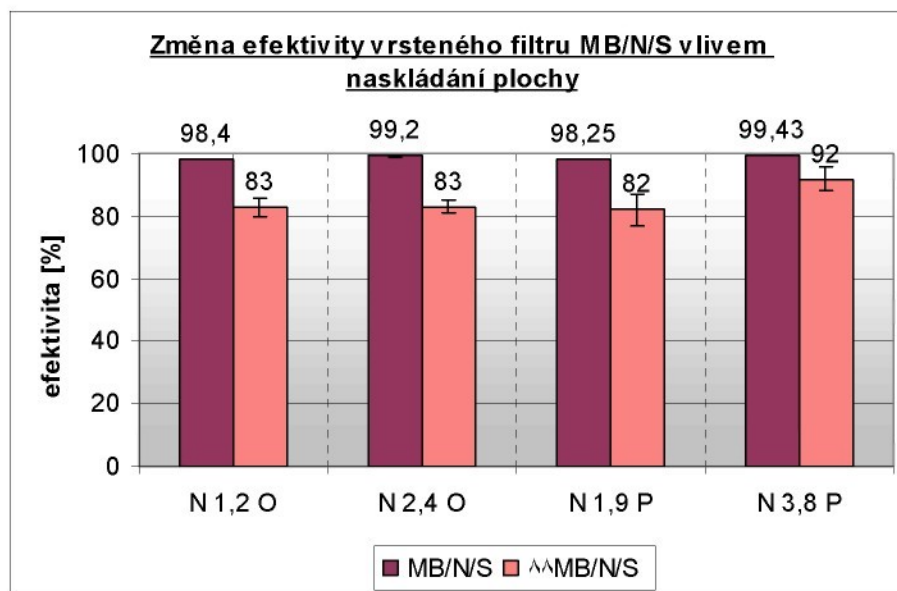
Jak vyplývá z výsledků obou testů uvedených na obr. 23-26 a v tabulce přílohy č.4, nemá velikost náboje na tvar křivek průběhu efektivity a tlakového spádu žádný vliv.

Pro další část experimentu byl tedy použit filtr s parametry 147 skladů/m a výškou skladů 2 cm, který se zdá být optimální kombinací požadované efektivity a tlakového spádu.

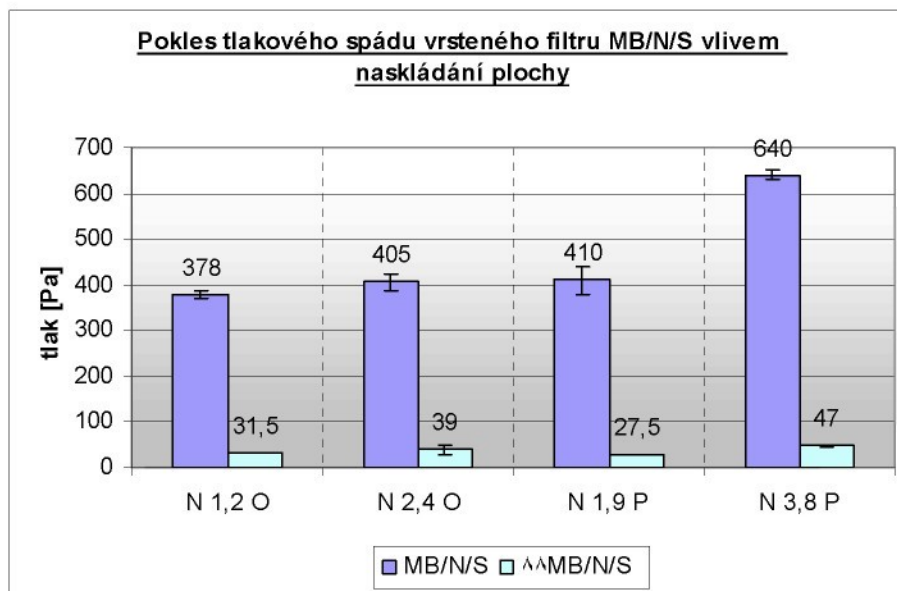
7.3.3 Kombinace techniky vložení nanovláknenné vrstvy a skládání filtrů

Kombinací nanovláknenné vrstvy s meltblownem se výrazně zvýšila efektivita a současně s ní vzrostl také tlakový spád. Naproti tomu naskládáním meltblownu se znatelně snížil tlakový spád v doprovodu mírného poklesu efektivity. Z vyplývajících závislostí lze předpokládat, že kombinací těchto dvou technik je možno potlačit nežádoucí filtrační vlastnosti.

Dle výše uvedených parametrů byly naskládány a proměřeny vzorky těžšího meltblownu, dosahující vyšší efektivity, společně s nanovláknennými vrstvami plošnými i objemovými. U všech vzorků došlo zvětšením filtrační plochy v porovnání s plochými vzorky k mírnému snížení efektivity (obr. 27), ale bylo dosaženo výrazného poklesu tlakového spádu (obr. 28). Průměrné hodnoty filtračních vlastností se směrodatnými odchylkami jsou uvedeny v příloze č.3.



Obr. 27: Grafické vyjádření změny efektivity filtru vlivem úpravy povrchu a přidáním nanovláknenné vrstvy.



Obr .28: Grafické vyjádření poklesu tlakového spádu filtru vlivem úpravy povrchu a přidáním nanovlákné vrstvy.

Dále se ukazuje, že u skládaných filtrů z MB popsané v kapitole 7.3.2 jsou filtrační vlastnosti obecně lepší. Mírný nárůst tlakového spádu po vložení nanovlákné vrstvy lze přičíst zvětšené tloušťce filtru a pokles efektivity byl pravděpodobně způsoben odvedením náboje nanovláknou vrstvou během výroby filtru v teplovzdušné pojící komoře, popsané již v kapitole 7.2.

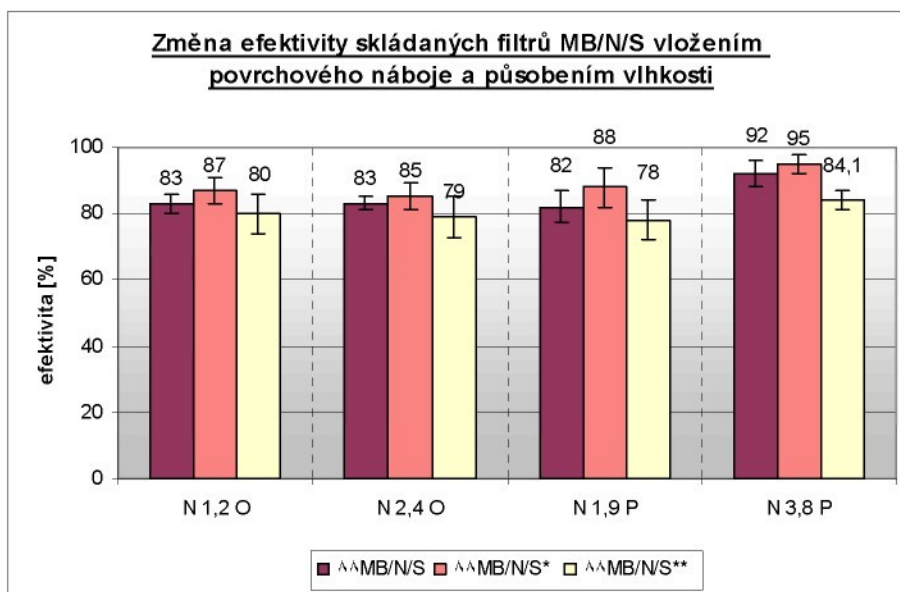
Při srovnání efektivity a tlakového spádu v závislosti na typu nanovlákné vrstvy je zřejmé, že výhody objemových nanovláken jsou úpravou povrchu skládáním potlačeny.

7.3.4 Kombinace techniky nánosu náboje, nanovláknenné vrstvy a skládání

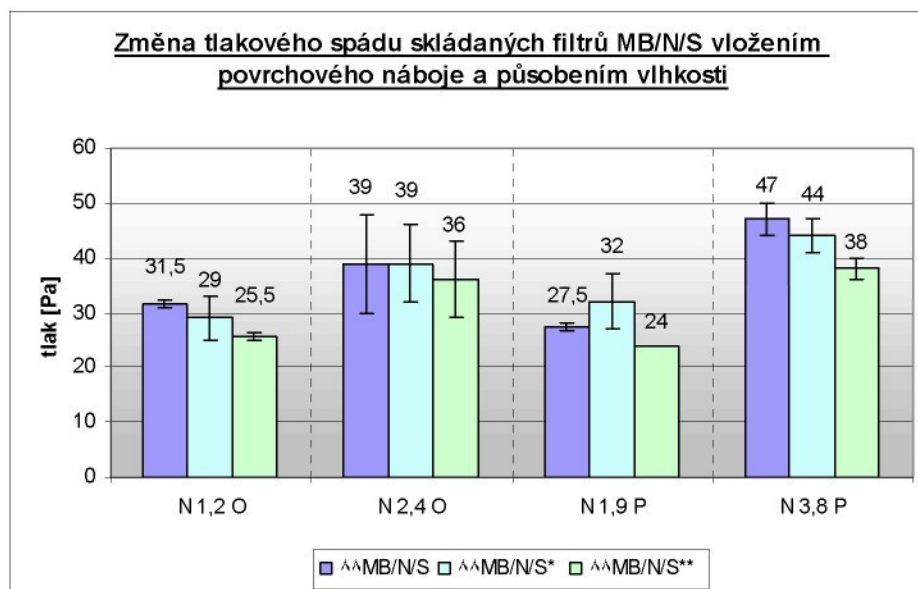
V případě tohoto experimentu byla pro nános povrchového náboje použita technika koronového nabíjení. Patentované elektrizační zařízení [23] poskytuje možnost použití hned dvou technik. Při první technice prochází materiál nejdříve jednou stranou soustavou válcové a drátové elektrody a poté stejnou soustavou z druhé strany. Tato technika se využívá pro materiály do plošné hmotnosti 300 g/m^2 . Máme-li materiály objemnější ($> 300 \text{ g/m}^2$), použijeme druhou techniku, při které je materiál naveden do válcového plexisklového krytu, který obsahuje 2 soustavy (tři dřevěné vodící válce, v jejichž středu je umístěna drátová elektroda). Vláknenný materiál procházející touto soustavou je tak polarizován z obou stran [4].

S ohledem na plošnou hmotnost skládaných filtrů byl materiál elektrizován pomocí první techniky nabíjení s napětovým potenciálem mezi elektrodami 30 kV (napětí elektrod bylo -5 kV a 25 kV), vzdáleností elektrod 50 mm a odváděcí rychlostí 0,3 m/min. Jak ukazují obr. 29 a 30, vložený elektrostatický náboj přibližně zachoval velikost tlakového spádu a působením polarizačních sil zlepšil filtrační efektivitu. Výsledky jsou také uvedeny v tabulce přílohy č.5. Je však zřejmé, že elektrostatický náboj u skládaných filtrů nemá tak výrazný vliv jako v případě plochých vláknenných vrstev.

Velikost vloženého náboje, jak popisuje kapitola 2.3, je silně závislá na čase, klimatických podmínkách a typu materiálu. Intenzita elektrického pole v čase klesá přibližně exponenciálně u každého materiálu a po čase se ustálí. Přeloženo do časové osy to znamená, že cca po 14 dnech se intenzita elektrického pole ustálí. [4]. Na základě těchto poznatků byly nabitě vzorky vloženy na 14 dní do exsikátoru udržující konstantní relativní vlhkost 75 % RH. Dá se předpokládat, že s relativní vlhkostí dojde k poklesu efektivit a jak ukazuje obr.29 a hodnoty v tabulce přílohy č.5, tento předpoklad se experimentálně potvrdil. Působením relativní vlhkosti, však došlo k porušení nanovláknenné vrstvy, která se na velikosti efektivit výrazně podílí a proto jsou hodnoty efektivit vláknenných vrstev podrobených vlhkosti v průměru nižší než před jejich samotným nabitím. Nerovnoměrnost nanovláknenné vrstvy a nerovnoměrnost nánosu povrchového náboje jsou příčinou poměrně velkých směrodatných odchylek.



Obr. 29: Grafické vyjádření změny efektivity skládaných filtrů s nanovláknennou vrstvou vložení povrchového náboje a působením vlhkosti.

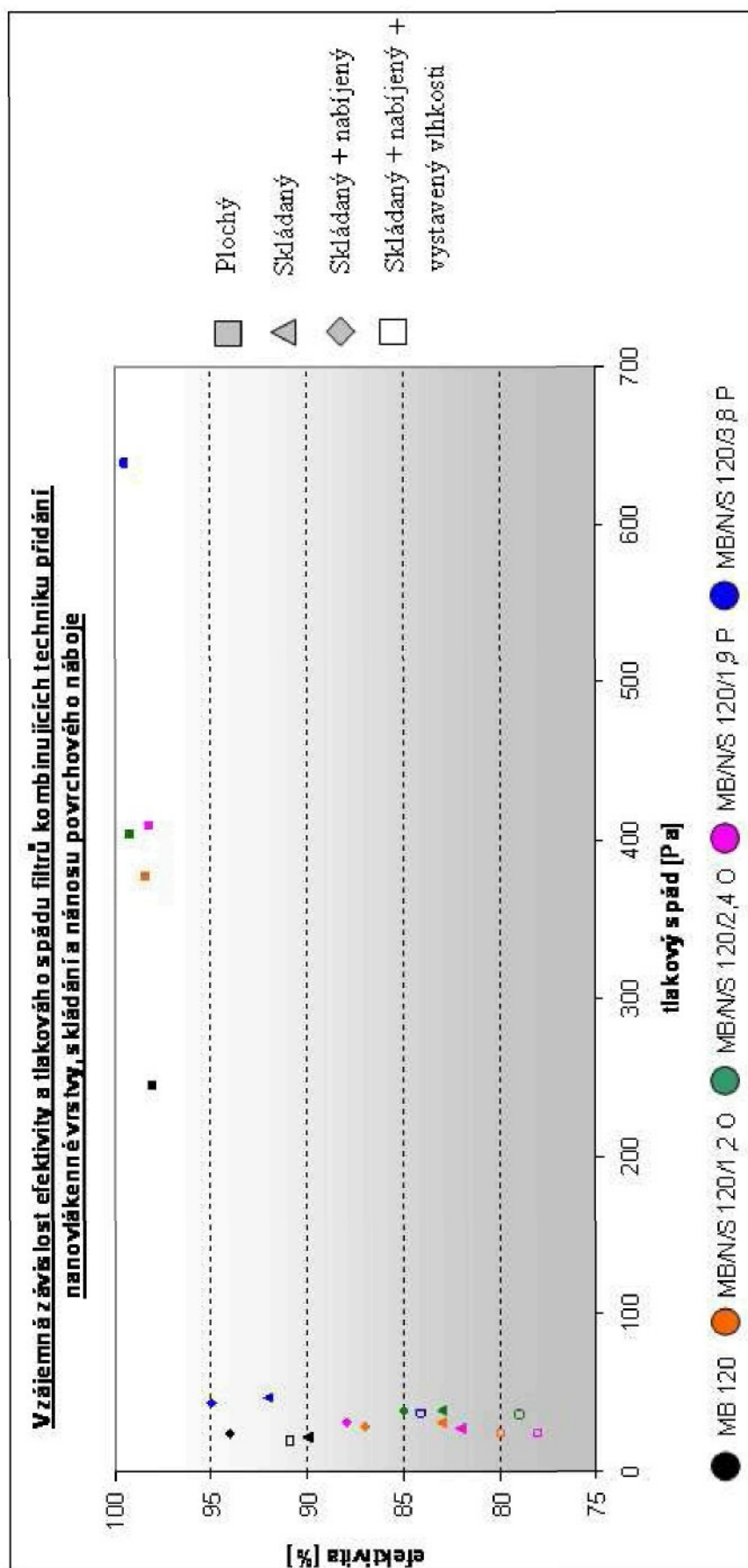


Obr. 30: Grafické vyjádření změny tlakového spádu skládaných filtrů s nanovláknennou vrstvou vložení povrchového náboje a působením vlhkosti.

V současné době se podařilo také na katedře Netkaných textilií zvláknit technologií elektrospinningu i jiné, na vlhkost méně citlivé polymery, u nichž by pravděpodobně pokles efektivity nebyl tak výrazný. Stručně tedy lze konstatovat, že relativní vlhkost ovlivňuje vložený elektrostatický náboj a je potřeba k této skutečnosti při výrobě filtrů a jejich využití přihlídnout.

7.4 Přehled změn filtračních vlastností v závislosti na použité technice

Jednotlivé techniky a jejich kombinace pro zlepšení filtračních vlastností vláknenných filtrů jsou podrobně rozebrány a popsány v kapitole 7.3. Pro ucelení jsou dosažené výsledky shrnuty graficky na obr. 31 a popsány v závěru práce kapitoly 8.



Obr. 31: Přehled závislosti efektivity a tlakového spádu filtrů kombinujících techniku přidání nanovlákené vrstvy, skládání a nánosů povrchového náboje

8 Závěr

U vláknenného materiálu z polypropylenu dvou plošných hmotností 24 g/m^2 a 120 g/m^2 firmy Ecotex vyrobeného technologií meltblown byly použity tři techniky a jejich kombinace pro zlepšení filtračních vlastností. Všechny testy experimentu byly měřeny na přístroji C.E.N. BENCH RIG společnosti Wallisdown Ltd typu 1100 na katedře Netkaných textilií podle britské normy BS 4400.

První technika spočívala v přidání nanovláknenné vrstvy z polyvinylalkoholu plošné o plošné hmotnosti $1,9$ a $3,8 \text{ g/m}^2$ a objemové o plošné hmotnosti $1,2$ a $2,4 \text{ g/m}^2$. Vlákná s průměrem menším než $1 \mu\text{m}$ jsou charakteristická klouzáním vzduchu na povrchu, které má za následek nižší tlakový spád a těsnější trajektorie proudu vzduchu kolem vlákna vede ke zvýšení efektivity, což se projevilo i v případě kombinace nanovláknenné vrstvy s meltblownem (obr. 16, 17). Při porovnání naměřené efektivity a tlakového spádu z hlediska typu vložené nanovláknenné vrstvy, mají filtry s objemovou nanovláknennou vrstvou buď přibližně stejnou efektivitu a nižší tlakový spád, přibližně stejný tlakový spád a vyšší efektivitu nebo vyšší efektivitu a nižší tlakový spád. Filtry o větší plošné hmotnosti meltblownu dosahují vyšší efektivity, ale současně také vyššího tlakového spádu až několik stovek Pascalů.

V rámci snížení vysokého tlakového spádu byla využita technika úpravy filtračního povrchu skládáním. Protože ideální počet skladů a výška skladů závisí na typu materiálu a filtračních podmínkách, byla tato závislost nejprve zjištěna pro samotnou vrstvu těžšího meltblownu. Za optimální byl zvolen filtr s cca 150 sklady na metr a výškou skladu 2 cm. Dle těchto parametrů byly následně naskládány vzorky s přidáním nanovláknenné vrstvy. Zvětšená filtrační plocha, jak ukazují obr 27 a 28 opravdu vedla k výraznému snížení tlakového spádu, ale za současného poklesu efektivity. Srovnáním efektivity samotného skládaného meltblownu a jeho kombinací s nanovláknem zjišťujeme, že samotný meltblown má obecně lepší filtrační vlastnosti. Důvodem je však s největší pravděpodobností skrytý náboj uvnitř vrstvy meltblownu, který se na počátku měření nepodařilo beze zbytku odstranit. Při výrobě skládaných filtrů musely vzorky z důvodu zafixování skladů projít teplovzdušnou pojící komorou, kde dodáním tepelné energie odvedla nanovláknenná vrstva zbytkový náboj meltblownu a proto je efektivita těchto vzorků nižší. Nanovláknenná vrstva se tedy osvědčila jako vhodná metoda pro odstranění elektrostatického náboje z vláknenné vrstvy. Tohoto

poznatku by se dalo využít například při výrobě antistatických filtrů, kde i nepatrný náboj představuje velké nebezpečí. Výhody objemové nanovláknenné vrstvy jsou úpravou povrchu potlačeny.

Třetí zkoumaná technika sleduje vliv nánosu povrchového náboje u skládaných filtrů s přidanou nanovláknennou vrstvou. Vložený elektrostatický náboje zvyšuje hodnotu efektivity bez velké změny tlakového spádu, ale nárůst není tak výrazný jako u plochých filtrů, které byly předmětem již mnoha výzkumů. Protože velikost náboje je mimo jiné silně závislá na čase a klimatických podmínkách, byly nabitě vzorky vystaveny po dobu 14 dnů 75% relativní vlhkosti napodobující provozní podmínky. Vlhkost dle předpokladů snížila efektivitu, ale současně došlo k porušení nanovláknenné vrstvy, která se na její hodnotě výrazně podílí. Tím lze také vysvětlit proč je efektivita těchto filtrů podrobených vlhkosti v průměru nižší než před jejich samotným nabitím. Poměrně velké směrodatné odchylky efektivit a tlakových spádů po nabití a vystavení vlhkosti jsou odezvou jednak na nerovnoměrnost nanovláknenné vrstvy, ale především na nerovnoměrnost nánosu povrchového náboje vloženého technikou koronového nabíjení.

Pro další práci zabývající se studiem těchto materiálů a technik by bylo vhodné použít nanovláknennou vrstvu z jiného typu polymeru, která nepodléhá degradaci vlivem vlhkosti a pro objektivní posouzení vlivu jednotlivých technik použít meltblown bez elektrostatické úpravy s možností vyloučit jakýkoli vliv náboje na filtrační vlastnosti před samotnou úpravou nabitím.

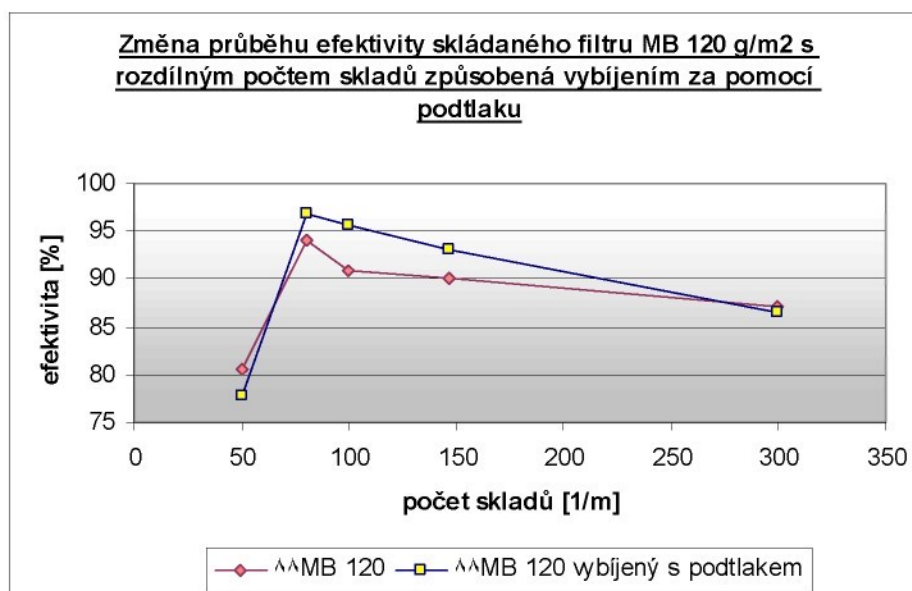
9 Literatura:

1. Lukáš, D.: Teorie netkaných textilií, Technická univerzita v Liberci, 2001
2. Pich, J.: Teorie filtrace aerosolů vláknitými a membránovými filtry, Kandidátská disertační práce, Praha, 1964
3. Sažin, B. I., Romanovská, O. S., Lobanov, A. M., Ejdelnant, M. P., Kojkov, C. N.: Električeskije vojstva polymerov, Leningrad, 1977.
4. Kolínová, M.: Permanentní elektrizace filtračních vlákenných materiálů, Doktorská disertační práce, Technická univerzita v Liberci, 2005
5. Kolínová, M.: Permanentní elektrizace filtračních netkaných textilií, Diplomová práce, Technická universita v Liberci, 1995
6. Jirsák, O., Kalinová, K.: Netkané textilie, Technická univerzita v Liberci, 2003
7. Gubkin, A., N.: Elektrety, Akademie nauk SSSR, Moskva, 1961
8. Jungvirtová, M.: Technologické proměnné při elektrostatickém nabíjení, Diplomové práce, Technické univerzita v Liberci, 1996
9. Gastell, R., S., Formhals, A.: Proces and apparatuses for preparing artificials threads, Formhhals A., US1975504, 2. 10. 1934
10. Gastell, R., S.: Metod and apparatuses for spinning, Formhhals A., US2160962, 6. 6. 1939
11. Gastell, R., S.: Artificial thread and Metod of producing same, Formhals A., US2187306, 16. 1. 1940
12. Formhals, A.: Metod and apparatuses for spinning, Formhals, A, US2349950, 30. 5. 1944
13. Huang, Z., M., Zhang, Y., Z., Kotaki M., Ramakrishna S.: A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites Science and Technology, 2003, Vol. 63, Pg. 2223-2253
14. Technická univerzita v Liberci: Způsob výroby nanovláken z polymerního roztoku elektrostatickým zvlákňováním a zařízení k provádění způsobu, Jirsák, O., Sanetník F., Lukáš, D., Kotek, V., Martinová V., Chaloupek, J., Česká republika, Číslo přihlášky 2003-2421, 10. 11. 2004
15. Hrůza, J., Novák, O., Růžicková, J., Čejková, R., Jirsák, O.: Nanofibres and filtration, Nano 04, Brno, University of Technology, 2004, ISBN 80-214-2672-1
16. Hrůza, J.: Nanospider fibres filtration, Autex, Rubaux, 2004, Code O-3W4

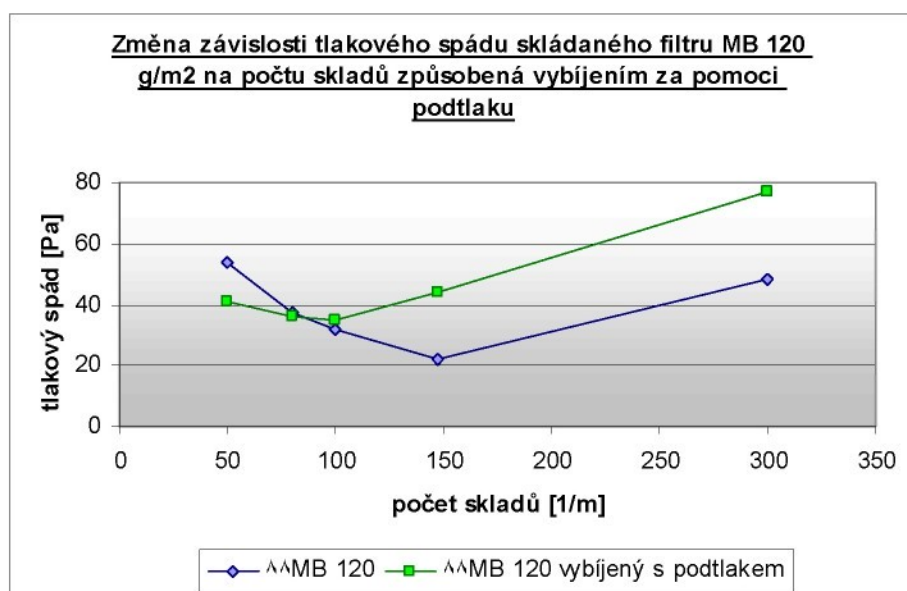
17. Wagner, J.: Fyzika, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1989
18. Graham, M., Grafe, T., H.: Nanofiber Webs from Electrospinning, Nonwovens in Filtration, Fifth International Conference, Germany, 2003
19. Graham, K., Ouyang, M., Reather, T., Grafe, T., Macdonald, B., Knauf, P.: Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, Texas, 2002
20. Hrůza J.: Theoretical aspects of nanofiltration, Strutex , Technical University of Liberec, 2003, Pg. 221-227
21. Brown R.,C.: Air filtration, Pergamon Press, New York, 1993, ISBN 0-08-041274-2
22. Hrůza, J.: Přednáška filtrace [online], Květen 2005 [cit. 16. května.2005], Dostupné na WWW:
< <http://www.ft.vslib.cz/depart/knt/nove/dokumenty/studmaterialy/filtr.pdf> >
23. Univ Tennessee Res Corp: Metod and apparatuses for the electrostatic charging of a web or film, Tsai, P., P., Wadsworth, US5401446, 28. 3. 1995

Seznam příloh

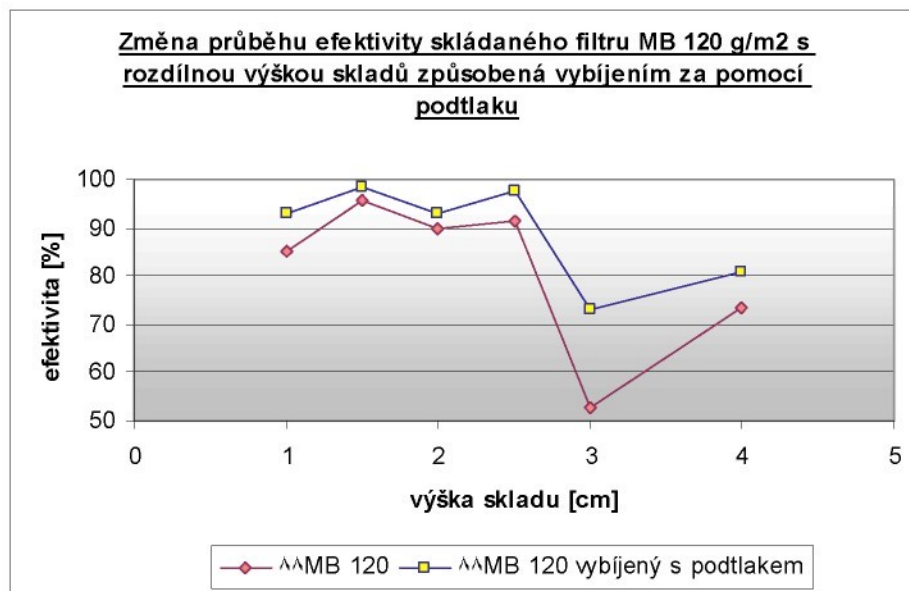
1. Změna průběhu efektivity a tlakového spádu skládaných filtrů způsobená vybíjením za pomoci podtlaku
2. Základní parametry použitých nanovlákných vrstev
3. Tabulky filtračních vlastností skládaných filtrů
4. Tabulka filtračních vlastností nabíjených skládaných filtrů z MB a jejich změna vlivem vlhkosti
5. Tabulka filtračních vlastností nabíjených skládaných filtrů s přidáním nanovlákné vrstvy a jejich změna vlivem vlhkosti



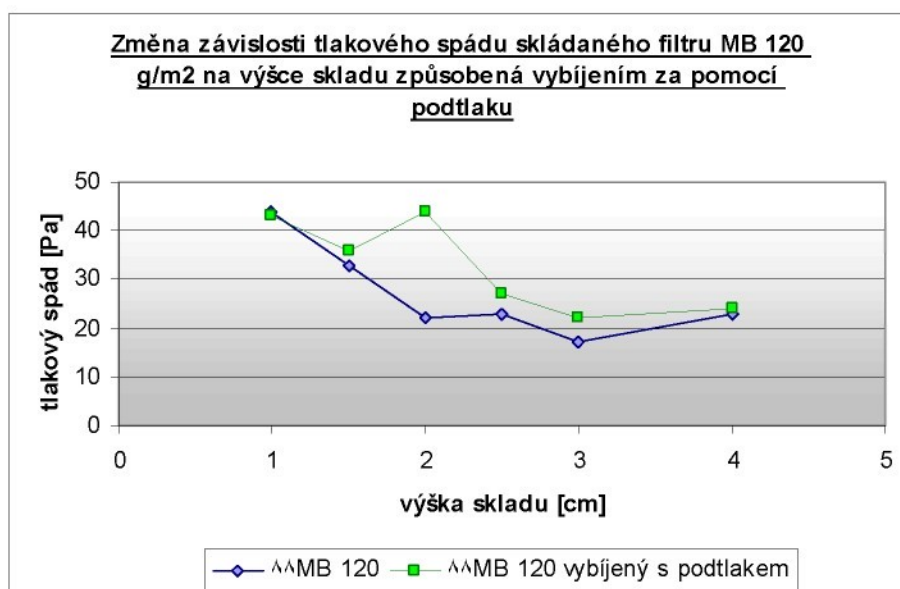
Obr. 1: Změna efektivity skládaného meltblownového filtru s různým počtem skladů způsobená vybíjením za pomoci podtlaku.



Obr. 2: Změna tlakového spádu skládaného meltblownového filtru s různým počtem skladů způsobená vybíjením za pomoci podtlaku



Obr. 3: Změna efektivity skládaného meltblownového filtru s různou výškou skladů způsobená vybíjením za pomoci podtlaku.



Obr. 4: Změna tlakového spádu skládaného meltblownového filtru s různou výškou skladů způsobená vybíjením za pomoci podtlaku.

Příloha č.2

Typ nanovláken	Střední hodnota [μm]	Minimální hodnota [μm]	Maximální hodnota [μm]	Odchylka [μm]
O1	0,23	0,12	0,59	0,08
O2	0,25	0,1	0,51	0,08
P1	0,22	0,1	0,51	0,07
P2	0,2	0,08	0,36	0,05

Tab. 1: Tabulka zobrazuje průměry vláken plošných a objemových nanovláknenných vrstev.

Příloha č.3

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
MB 120	98	246
^^MB 120/50/2	80,5	54
^^MB 120/80/2	93,95	37
^^MB 120/100/2	90,79	32
^^MB 120/147/2	90	22
^^MB 120/300/2	87,1	48

Tab. 2: Hodnoty efektivity a tlakového spádu v závislosti na počtu skladiř při zachování konstantní výšky skladiř 2 cm.

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
^^MB 120/147/1	85,2	44
^^MB 120/147/1,5	95,57	33
^^MB 120/147/2	90	22
^^MB 120/147/2,5	91,54	23
^^MB 120/147/3	52,6	17
^^MB 120/147/4	73,5	23

Tab. 3: Hodnoty efektivity a tlakového spádu v závislosti na výšce skladiř při konstantním počtu 147 skladiř/m.

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
^^MB/N/S 120/1,2 O	83 ± 3	31,5 ± 0,7
^^MB/N/S 120/2,4 O	83 ± 2	39 ± 9
^^MB/N/S 120/1,9 P	82 ± 5	27,5 ± 0,7
^^MB/N/S 120/3,8 P	92 ± 4	47 ± 3

Tab. 4: Filtrační vlastnosti skládaných filtrů s přidávanými nanovláčnými vrstvami.

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
^^MB 120/50/2*	85	50
^^MB 120/80/2*	96,19	40
^^MB 120/100/2*	94,68	33
^^MB 120/147/2*	94	24
^^MB 120/300/2*	90,66	54
^^MB 120/50/2**	77,4	51
^^MB 120/80/2**	94,48	42
^^MB 120/100/2**	92,58	31
^^MB 120/147/2**	91	20
^^MB 120/300/2**	85,9	47

Tab. 5: Přehled naměřených filtračních vlastností skládaných filtrů z MB kombinující počet skladů na jednotku délky, nános povrchového náboje a změnu vlastností vlivem vlhkosti.

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
^^MB 120/147/1*	87,1	39
^^MB 120/147/1,5*	96,76	30
^^MB 120/147/2*	94	24
^^MB 120/147/2,5*	94,61	22
^^MB 120/147/3*	67,5	10
^^MB 120/147/4*	75,9	21
^^MB 120/147/1**	85,9	39
^^MB 120/147/1,5**	95,74	30
^^MB 120/147/2**	91	20
^^MB 120/147/2,5**	92,11	20
^^MB 120/147/3**	57,8	10
^^MB 120/147/4**	75,1	20

Tab. 6: Přehled naměřených filtračních vlastností skládaných filtrů z MB kombinující výšku skladu, nános povrchového náboje a změnu vlastností vlivem vlhkosti.

Označení vzorku	Efektivita [%]	Tlakový spád [Pa]
^^MB/N/S 120/1,2 O*	87 ± 4	29 ± 4
^^MB/N/S 120/1,2 O**	80 ± 6	$25,5 \pm 0,7$
^^MB/N/S 120/2,4 O*	85 ± 4	39 ± 7
^^MB/N/S 120/2,4 O**	79 ± 6	36 ± 7
^^MB/N/S 120/1,9 P*	88 ± 6	32 ± 5
^^MB/N/S 120/1,9 P**	78 ± 6	24 ± 0
^^MB/N/S 120/3,8 P*	95 ± 3	44 ± 3
^^MB/N/S 120/3,8 P**	$84,1 \pm 3$	38 ± 2

Tab. 7: Přehled filtračních vlastností skládaných filtrů kombinující přidání nanovlákněné vrstvy, nános povrchového náboje a změnu vlastností vlivem vlhkosti.