

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

**FILTRAČNÍ MATERIÁLY A SYSTÉMY PRO
PRŮMYSLOVOU A VZDUCHOVOU FILTRACI**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá materiály používanými ve filtraci vzduchu, provedení průmyslových a atmosférických filtrů včetně jejich třídění a základními principy odlučování částic.

Práce je rozdělena na tři části. V první části se věnuje základním principům odlučování, vysvětlení rozdílu mezi atmosférickou a průmyslovou filtrací a rozdělení filtrů včetně třídění filtrů atmosférického vzduchu. Dále se zabývá používanými materiály a jejich povrchové úpravy pro atmosférickou a průmyslovou filtraci vzduchu.

V druhé části se tato diplomová práce věnuje nanovláknům, jejich výrobě a použití v běžné a průmyslové filtraci. V poslední části je proveden jednoduchý matematický model pro stanovení frakční odlučivosti vláknité vrstvy a frakční účinnosti izolovaného vlákna.

Abstract

This diploma thesis deals with materials used in air filtration, industrial and atmospheric filters, including their sorting and basic principles of particle separation.

Thesis is divided into three parts. The first part deals with the basic principles of separation, explaining the difference between atmospheric and industrial filtration and filtering, including sorting of atmospheric air filters. Thesis also speaks about with the use of materials and their surface treatment for atmospheric and industrial air filtration.

In the second part of diploma thesis deals with nanofibers, their production and use in common and industrial filtration. In the last part a simple mathematical model for determining the fractional separability of the fiber layer and the fractional efficiency of the insulated fiber is shown.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Filtreační materiály a systémy pro průmyslovou a vzduchovou filtraci“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Pavla Vybírala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze

Jan Tichý

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval mým rodičům, kteří měli se mnou velikou trpělivost a drželi mě na správné cestě a také za vytvoření báječných domácích podmínek. Dále bych chtěl také poděkovat Ing. Pavlovi Vybíralovi, Ph.D za poskytnuté materiály, informace a čas, který věnoval této práci.

Obsah

1.	Úvod.....	10
2.	Filtrace	11
2.1.	Vztah mezi frakční a celkovou odlučivostí.....	11
2.2.	Odlučovací principy.....	13
2.3.	Tlaková ztráta	18
3.	Filtrace atmosférického vzduchu	20
3.1.	Třídění filtrů.....	21
3.1.1.	Filtry pro běžné větrání	21
3.1.2.	Filtry vysoce účinné	21
3.1.3.	Rozdělení dle provedení filtru.....	22
3.2.	Materiály pro atmosférickou filtraci.....	26
3.3.	Výroba vláknitých filtrů.....	27
4.	Průmyslová filtrace	30
4.1.	Rozdělení filtrů	31
4.2.	Regenerace.....	33
4.2.1.	Pulzní regenerace	34
4.2.2.	Zpětný proplach	34
4.3.	Materiály pro průmyslovou filtraci.....	35
4.4.	Povrchové úpravy	38
5.	Nanotechnologie	42
5.1.	Historie.....	42
6.	Nanovlákná	43
6.1.	Vlastnosti a charakteristika nanovláken	43
6.2.	Výroba nanovláken	45
6.2.1.	Elektrické zvlákňování.....	45
6.2.2.	Foukání z taveniny	49
6.2.3.	Dloužení	50
6.2.4.	Použití šablon.....	50
6.2.5.	Fázová separace	51
6.2.6.	Forcespinning.....	51
6.3.	Materiály pro výrobu nanovláken.....	51
6.4.	Využití nanovláken ve filtraci.....	52

6.4.1.	Použití nanovláken v atmosférické filtraci.....	53
6.4.2.	Použití nanovláken v průmyslové filtraci	56
6.5.	Rizika nanotechnologií	59
7.	Matematický model	61
7.1.	Vyhodnocení.....	63
8.	Závěr	75

Seznam použitého značení

Označení	Název	Jednotka
A	plocha vláknité vrstvy	[m ²]
a	velikost částice	[m]
B	pohyblivost částice	[s/kg]
D _b	součinitel tepelné difúze	[m ² /s]
d	průměr vlákna	[m]
E _f	frakční odlučivost vrstvy	[-]
E _{f,i}	frakční odlučivost izolovaného vlákna	[-]
E _{dif,i}	frakční odlučivost izolovaného vlákna pomocí difúzního principu	[-]
E _{int,i}	frakční odlučivost izolovaného vlákna pomocí intercepčního principu	[-]
E _{setrv,i}	frakční odlučivost izolovaného vlákna pomocí setrvačného principu	[-]
E _{dod}	frakční odlučivost izolovaného vlákna pomocí korekce	[-]
F _t	aerodynamický odpor	[N]
k	Boltzmannova konstanta	[J/K]
l	volná molekulová délka	[m]
M _z	hmotnost zachycených částic	[kg]
K _n	Knudsenovo kritérium	[-]
K _u	Kuwabarovův součinitel	[-]
La	Lambův parametr	[-]
Pe	Pecletovo kritérium	[-]
P _f	frakční průnik	[Pa]
Δp _z	tlaková ztráta	[m]
r _f	poloměr vlákna	[m]
R	poloměr vlákna	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re _d	Reynoldsovo číslo proudu	[-]
Re _č	Reynoldsovo číslo částice	[-]
s	tloušťka vrstvy	[m]

Stk	Stokesovo číslo	[-]
T	absolutní teplota	[K]
v_ε	počáteční rychlost	[m/s]
v_1	čelní rychlost plynu	[m/s]

Řecká abeceda

α	parametr intercepce	[-]
γ_1	korekční součinitel na nerovnoměrné rozdělení vláken ve vrstvě	[-]
γ_2	korekční součinitel na odskok částic	[-]
ε	poréznost	[-]
τ_ε	doba relaxace	[s]
η	dynamická viskozita	[Pa.s]
π	matematická konstanta	[-]
ρ_ε	hustota částice	[kg/m ³]
ρ_{vz}	hustota vzduchu	[kg/m ³]
λ	parametr vrstvy	[-]
Π	bezrozměrná tlaková ztráta	[-]

1. Úvod

V dnešní době je čistota ovzduší jednou ze základních sledovaných parametrů v životním prostředí. Znečištění ovzduší lidskou činností neustále roste, proto se klade stále větší důraz na filtraci. Je nutné zajistit požadovanou čistotu prostředí pro člověka a i pro ochranu vnějšího prostředí před škodlivými látkami.

Existují mezinárodní úmluvy a předpisy o ochraně ovzduší jednotlivých zemí. V České republice to je Zákon č. 201/2012 Sb. O ochraně ovzduší a navazující vyhlášky Ministerstva životního prostředí. Tento zákon určuje emisní a imisní limity pro řadu znečišťujících látek a popisuje způsob sledování kvality ovzduší v ČR. [2]

Je třeba brát na vědomí, že většina lidí tráví nejvíce času ve vnitřních prostorech, jako jsou například: kanceláře, továrny, obchody, restaurace, supermarkety, školy nebo třeba v nemocnicích kde je požadavek na čistotu vnitřního prostředí nejdůležitější, proto je celosvětově zvýšená pozornost na to jak zajistit potřebnou kvalitu vnitřního ovzduší, tímto problémem se zabývá filtrace atmosférického vzduchu. Naopak filtrace průmyslová se zabývá snížením emisí, proto je třeba znát rozdíly mezi atmosférickou a průmyslovou filtrací, která je popsána v této diplomové práci.

Požadavky na co největší filtrační účinnost odlučování v kombinaci s požadavkem na co nejvyšší prodyšnost filtračního média tlačí výrobce filtračních médií hledat nové materiálové kombinace a nové postupy výroby filtračních médií. Jedním z takových materiálů je nanovláknenná struktura, která je vytvořena ze syntetického polymeru. Nanovláknna se v poslední době přenesly do fáze vývoje komerční praxe v různých odvětví filtrace.

Technologie nanovláken je v poslední době velký fenomén a po letech výzkumu se nanotechnologie dostávají do běžného využití. Tato technologie se snaží najít uplatnění v každém technickém oboru, takže bylo jen otázkou, kdy najde uplatnění ve filtraci vzduchu. V souvislosti s tímto rychlým vývojem je nutné vzít v úvahu i zdravotní rizika, která se zaváděním a aplikací tohoto materiálu souvisí.

Cílem této práce je zhodnotit používané materiály pro průmyslovou a atmosférickou filtraci vzduchu a zhodnocení použití nanovláken v průmyslové a atmosférické filtraci.

V rámci této diplomové práce byl vytvořen jednoduchý matematický model pro výpočet frakční odlučivosti na velikosti částice, který byl použit pro teoretické stanovení odlučivosti u několika vzorků materiálů pro vzduchovou filtraci.

2. Filtrace

Je důležité si uvědomit, že člověk většinu svého života tráví v uzavřeném prostoru, proto jsou stanoveny různé parametry pro vnitřní prostředí. Právě ve filtraci dochází k odlučování nežádoucích částic a tím tak zajistí požadované parametry z hlediska koncentrace částic ve vnitřním prostředí. Ale nesmí se zapomínat i na parametry vnějšího prostředí, protože ovzduší znečišťované průmyslem a energetikou představuje vysokou zdravotní zátěž pro člověka a přírodu samotnou.

Filtrace je proces, ve kterém dochází k odlučování částic na jednotlivých vlákních nebo na již odloučených částicích. V případech, kdy se částice odlučují uvnitř vláknité vrstvy, tak se jedná o takzvanou hloubkovou filtraci. Filtrace se dělí na dvě základní oblasti: na filtraci atmosférického vzduchu a filtraci průmyslovou. Rozdíly mezi nimi jsou popsány v kapitole 3 a 4.

Proces separace částic z plynů je značně závislý na tvaru a zrnitosti částic. Pojmy, které popisují proces filtrace, jsou odlučivost vláknité vrstvy, jímavost, tlaková ztráta filtru a změna vlastností filtru se zanášením. [1]

2.1. Vztah mezi frakční a celkovou odlučivostí

Frakční odlučivost vrstvy je jednou z nejdůležitějších vlastností filtračního materiálu, která vyjadřuje účinnost odlučování a vychází z frakční odlučivosti částic na izolovaném vlákně. K odlučování nežádoucích částic nejčastěji dochází ve vláknité vrstvě, složené z filtračních vláken. [1],[4]

Vztah (1) vyjadřuje frakční odlučivost vláknité vrstvy a vychází z frakční odlučivosti na izolovaném vlákně.

$$E_f(a) = 1 - \exp(-E_{f,i}(a) \cdot \lambda) \quad (1)$$

Kde: $E_{f,i}$ – frakční odlučivost izolovaného vlákna [-]

E_f – frakční odlučivost vrstvy [-]

λ – parametr vrstvy [-]

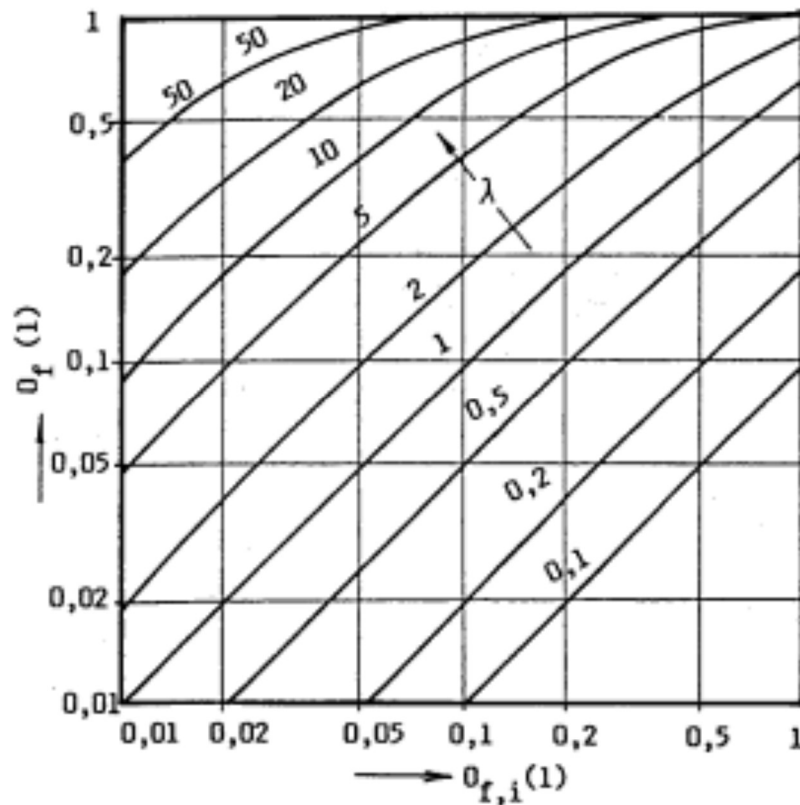
Vztah (1) je odvozený za určitých předpokladů. Vláknata jsou rovnoměrně rozvrstvena a jsou orientovaná kolmo na směr proudu. Ve skutečnosti a reálných podmínkách se do vztahu (1) zavádějí korekční součinitele. [1]

Frakční odlučivost nezávisí pouze na frakční odlučivosti izolovaného vlákna, ale také na parametru vrstvy. Každá vláknitá vrstva má parametr vrstvy λ , je to základní veličina popisující vláknitou vrstvu. Vláknitá vrstva se charakterizuje několika veličinami, jako je tloušťka vrstvy, objem vláken a střední aritmetický průměr. U všech těchto veličin závisí na druhu a účelu filtračního materiálu. [1],[4]

$$\lambda = \frac{4 \cdot (1 - \varepsilon)}{\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{s}{d} \quad (2)$$

Kde: λ – parametr vrstvy [-]
 s – tloušťka vrstvy [m]
 ε – poréznost [-]
 d – průměr vlákna [m]

Vzájemná souvislost mezi frakční odlučivostí vrstvy, izolovaného vlákna a parametru vrstvy je na obr. 2.1. Tento graf vyplývá ze vztahu (1) a plyne z něho, že čím vyšší je součin frakční odlučivosti izolovaného vlákna a parametru vrstvy, tím vyšší je hodnota frakční odlučivosti vláknité vrstvy. [1],[4]



Obr. 2.1 - Vzájemná souvislost mezi E_f , $E_{f,i}$ a λ [1]

Kromě frakční odlučivosti lze definovat také frakční průnik. Protože musí platit, že $P_f + E_f = 1$, kde P_f je frakční průnik, tak lze psát:

$$P_f = 1 - \exp(-E_{f,i}(a) \cdot \lambda) \quad (3)$$

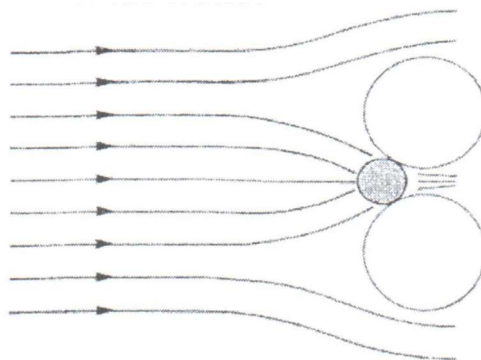
Výslednou frakční odlučivost nelze přímo experimentálně ověřit, protože nelze na izolovaném vlákne vytvořit podmínky, jaké ve skutečnosti existují ve vrstvě. V ideální vrstvě se předpokládá, že vlákna jsou rovnoměrně rozmístěna ve vrstvě, jsou orientovaná kolmo ke směru proudu a také se předpokládá, že se všechny odloučené částice na vlákne následně ulpí. Proto se zavedly korekce frakční odlučivosti na odskok částic γ_2 a na korekci nerovnoměrné rozložení vláken ve vrstvě γ_1 . [1]

$$E_f' = 1 - \exp(-E_{f,i}(a) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \lambda) \quad (4)$$

2.2. Odlučovací principy

Důležitým prvkem ve filtraci jsou odlučovací principy. Odlučovací principy se podílejí na odlučování částic na izolovaném vlákne. Ve filtraci se uplatňují tyto hlavní principy: setrvačný, intercepční, difúzní. Při průchodu plynu vláknitou vrstvou mohou hrát významnou roli i elektrický princip. U jednotlivých principů, lze vyjádřit frakční odlučivost jako funkci příslušných bezrozměrných kritérií. [1],[4]

Zvláštní případ je síťový princip. Tento princip se uplatňuje v okamžiku, kdy velikost částic v proudu plynu je stejná jako velikost otvorů v dané filtrační vrstvě, kde se částice vlivem své velikosti zaklíní. Síťový princip má při odlučování malých částic nejmenší vliv ze všech odlučovacích principů, ale většího vlivu nabývá, když dojde k vytvoření filtračního koláče na povrchu filtru, potom je tento princip dominantní. Schéma tohoto principu je na obrázku 2.2. [1]



Obr. 2.2 - Síťový princip [1]

2.2.1. Intercepční princip

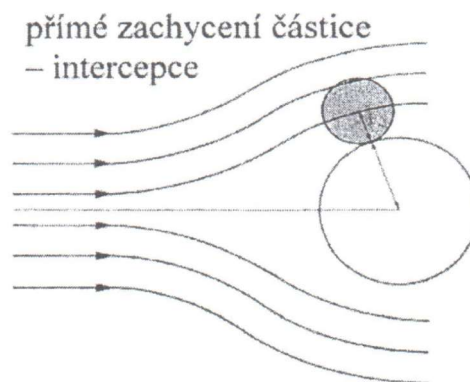
Neboli přímé zachycení částic s malou hmotností tak, že lze zanedbat setrvačnost částice. Protože se předpokládá, že částice má malou hmotnost a zanedbatelnou setrvačnost, je její trajektorie totožná s proudnicí při obtékání tělesa. Za odloučenou částici se považuje částice, která stačí sledovat změnu proudu plynu a zachytí se na vlákne díky vlivu své konečné velikosti. Čím větší částice, tím je větší její odlučivost. [1],[3],[4]

Schéma přímého zachycení při obtékání vlákna je na obrázku 2.3. Frakční odlučivost je funkcí parametru intercepce α [-], porézности ε [-] a Reynoldsova čísla proudu Re_d [-]. [1],[2],[3]

$$E_f = f(Re_d, \alpha, \varepsilon) \quad (5)$$

Důležitou veličinou u intercepčního principu je bezrozměrný parametr intercepce. Využívá se při průchodu vláknitou nebo zrnitou vrstvou. Je definován jako poměr konečné velikosti částice (a) ku průměru vlákna (d) [m].

$$\alpha = \frac{a}{d} \quad (6)$$

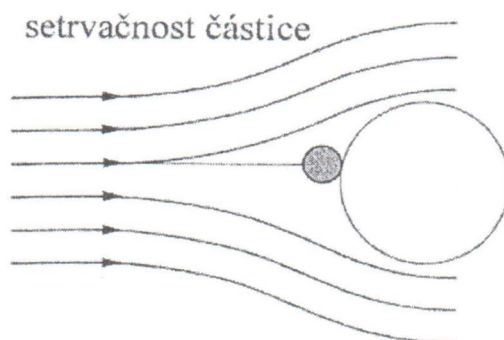


Obr. 2.3 - Schéma přímého zachycení při obtékání [1]

2.2.2. Setrvačný princip

Při tomto principu působí na odlučovanou částici setrvačná síla a aerodynamický odpor. Částice se pohybuje kolem vlákna díky své setrvačnosti po přímější dráze než proudnice a tak ulpí na povrchu vlákna. Setrvačný princip působí zejména na částice větší než 0,3-1 μm .

Hlavním bezrozměrným kritériem, které charakterizuje setrvačný princip a vyplývá z pohybové rovnice, je Stokesovo kritérium (Stk). Větší frakční odlučivosti lze dosáhnout, když bude vyšší hodnota Stk , protože tím bude trajektorie přímější a odchyluje se tak od proudnice. Schéma setrvačného odlučování je na obr. 2.4. [1],[4]



Obr. 2.4 - Schéma setrvačného odlučování [1]

Stokesovo bezrozměrné kritérium je dáno:

$$Stk = \frac{\tau_{\xi} \cdot v_{\xi}}{d/2} \quad (7)$$

Kde: Stk – Stokesovo bezrozměrné kritérium [-]

τ_{ξ} – doba relaxace [s]

v_{ξ} – počáteční rychlost [m/s]

U setrvačného principu je frakční odlučivost funkcí Stokesova kritéria, Reynoldsova čísla obtékání odlučovací plochy, Reynoldsova čísla částice.

$$E_f = f(Re_{\xi}, Re_d, Stk) \quad (8)$$

2.2.3. Difúzní odlučovací princip

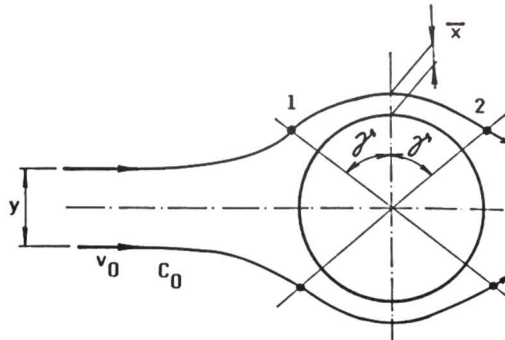
Jedná se o nejdůležitější princip při průchodu plynu vláknitou vrstvou. Částice konají kromě unášivého pohybu i náhodný pohyb vlivem nárazů molekul plynu na částice. V místech s koncentračním gradientem je výsledná hustota toku částic dána konvektivním a difúzním přenosem ve směru snižující se koncentrace. Uplatňuje se zejména pro záchyt submikronových částic. [1],[3],[4]

Je-li proudění laminární, tak je náhodný pohyb ovlivněn tepelným pohybem molekul, protože molekuly plynu se při laminárním proudění nepromíchávají mezi vrstvami a dochází pouze k tepelnému pohybu molekul, lze tak mluvit o součiniteli tepelné (Brownovské) difúze. Tepelná difúze se vyskytuje v klidném prostředí. [1],[3],[4]

Naopak u turbulentního proudění dochází k intenzivní výměně molekul plynu ve vrstvách, takže se zavádí součinitel turbulentní difúze, který je o 2 až 3 řády větší než součinitel Brownovské difúze. [1],[3],[4]

Ve filtraci při obtékání vlákna vláknité vrstvy lze pro zjištění frakční odlučivosti částic využít zjednodušenou metodu, využívající řešení pomocí difúzní mezní vrstvy. Vyjádření difúzní mezní vrstvy v okolí vlákna je na obr. 2.5. [1],[3],[4]

Při průtoku vláknitou vrstvou se uplatňuje difúzní přenos a při laminárním charakteru proudění se užívá součinitel tepelné difúze (D_b). Čím menší je částice, tím je větší součinitel tepelné (Brownovské) difúze a odlučivost. [1],[4]



Obr. 2.5 - Vyjádření difúzní mezní vrstvy[1]

Vztah pro součinitel Brownovské difúze při laminárním proudění.

$$D_b = kTB \quad (9)$$

Kde: D_b – součinitel tepelné difúze [m^2/s]
 k – Boltzmannova konstanta $k=1,3806 \cdot 10^{-23}$ [J/K]
 T – absolutní teplota plynu [K]
 B – pohyblivost částice [s/kg]

Charakteristickým kritériem je Pecletovo kritérium (10). Jedině u difúzního principu lze dosáhnout vysoké účinnosti odlučování jemných částic.[1]

$$P_e = \frac{v_\varepsilon \cdot d}{D_b} \quad (10)$$

Kde: v_ε – počáteční rychlost [m/s]

U tohoto způsobu je možné frakční odlučivost vrstvy vyjádřit pomocí kritériálních vztahů a lze ji popsat jako funkci zmíněného Pecletova kritéria (10), porézności a Reynoldsova čísla proudu obtékání odlučované plochy. [1],[4]

$$E_f = f(Pe, \varepsilon, Re_d) \quad (11)$$

2.2.4. Elektrický odlučovací princip

Při tomto odlučovacím principu jsou částice při průchodu vláknitou vrstvou odlučovány elektrickou silou při rozdílných polaritách odlučovaných částic a odlučovací plochy. Elektrický princip je účinný při odlučování jak hrubých, tak také jemných částic a minimální odlučivosti se dosahuje pro částice pod 1 μm . [1],[3],[14]

Tento princip se využívá samostatně u elektrických odlučovačů, kde působí na částice Coulombova síla, což je fyzikální princip vyvolávaný působením elektrické síly na nabitě částice s nábojem, jež se nacházejí v elektrickém poli o dané intenzitě. Proto je nutné upravit vlastnosti částic a prostředí, ve kterém dochází k odlučování. Elektrický princip se při výpočtu většinou zanedbává. [1],[3],[14]

2.2.5. Kombinace odlučovacích principů

Ve filtraci v určitých případech odlučování může působit více odlučovacích principů, které se navzájem ovlivňují. Proto nelze samostatné frakční odlučivosti pouze sečíst, ale je nutné zavést dodatečný člen E_{dod} . [1],[4]

Korekce E_{dod} se stanovuje z kombinací dvojic odlučovacích principů intercepce, difúze a setrvačnosti, zejména při působení kombinace difúzního a intercepčního principu. V případech viskózního proudění ($Re_d < 1$) je dodatečná frakční odlučivost definována Pecletovým kritériem Pe [-], Kuwabarovým součinitelem Ku [-] a parametrem intercepce α [-]. [1],[3],[4]

2.2.6. Celková frakční odlučivost izolovaného vlákna

Celková frakční odlučivost izolovaného vlákna se stanoví:

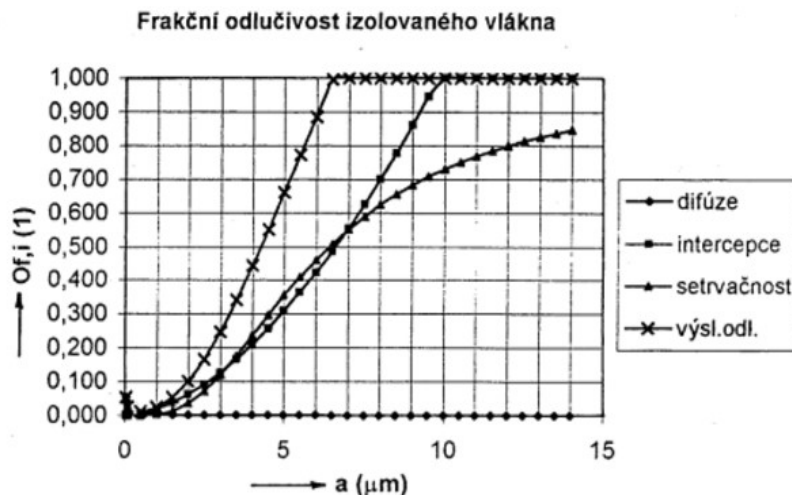
$$E_{f,i} = E_{dif,i} + E_{int,i} + E_{setrv,i} + E_{dod} \quad (13)$$

Celková frakční odlučivost se skládá z jednotlivých frakčních odlučivostí, které vyplývají ze základních odlučovacích principů. Vliv jednotlivých členů je různý a závisí na daném účelu filtrační vrstvy, zda je určena pro odlučování větších nebo menších částic.

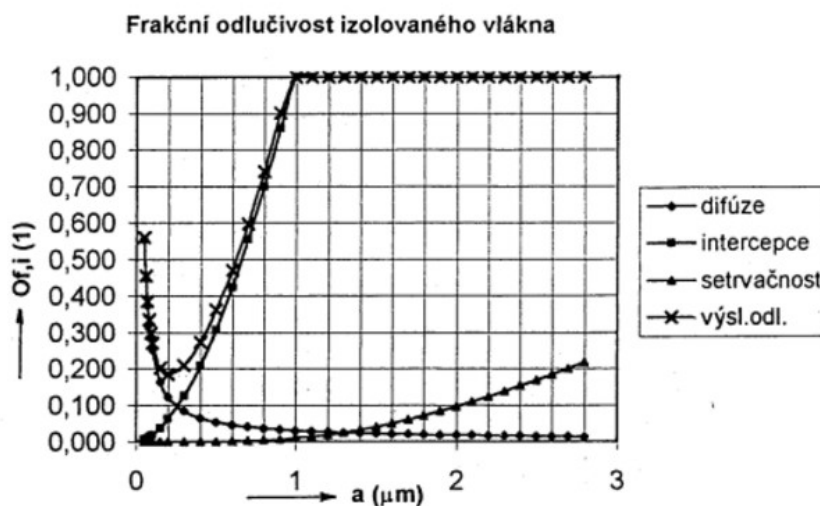
U setrvačného principu se malá hmotná částice při obtékání vlákna pohybuje díky své setrvačnosti po přímější dráze než proudnice a ulpí na povrchu vlákna. U intercepčního principu se předpokládá velká částice s malou hmotností, která při obtékání vlákna stačí sledovat změnu směru proudu plynu a zachytí se na povrchu vlákna díky své konečné velikosti. Difúzní odlučovací princip vychází z náhodného pohybu částic v laminárním proudu plynu, způsobeného nárazy molekul plynu na částice. [1]

Ve filtraci při průchodu vláknitou vrstvou působí zejména principy difúze, setrvačnosti a intercepce. Tyto principy mohou být doplněny při specifické úpravě filtračního materiálu také síťovým a elektrickým principem. [1],[4]

Na obr. 2.6 je vidět závislost frakční odlučivosti izolovaného vlákna na velikosti částice pro vysoce účinnou filtraci a na obr. 2.7 je pro běžnou filtraci. [1],[2]



Obr. 2.6 - Závislost E_f pro vysokou účinnou filtraci[4]



Obr. 2.7 - Závislost E_f pro běžnou filtraci [4]

2.3. Tlaková ztráta

Znalost tlakové ztráty je velmi důležitá pro provoz filtrů. Se zanášením filtru a tedy se zvyšující se tlakovou ztrátou dochází ke změnám odlučovacích vlastností filtru. Je důležité si uvědomit, že s tlakovou ztrátou filtru souvisí jímavost filtru (maximální hmotnost zachyceného prachu - to je smluvní hodnota uváděná výrobcem nebo to může být například dvojnásobek počáteční tlakové ztráty). [1]

Tlakovou ztrátu vláknité vrstvy lze obecně vyjádřit jako sumu sil působící na vlákna dělené čelní plochou filtru. To platí pouze pro ideální vláknitou vrstvu, ale ve skutečnosti nemají vlákna stejný průměr a aerodynamický odpor je ovlivněn

přítomností sousedních vláken. Při znalosti čelní plochy vláknité vrstvy (A) a délky (l) lze odvodit teoretický vztah: [1],[4]

$$\Delta p_z = \frac{l \cdot F_t}{A} = \frac{2 \cdot (1-\varepsilon) \cdot \alpha}{\pi \cdot \varepsilon} \cdot \frac{v_1 \cdot s \cdot \eta}{d^2} \quad (14)$$

Kde: F_t – aerodynamický odpor [N]
 v_1 – čelní rychlost plynu [m/s]
 η – dynamická viskozita [m/s]
 s – tloušťka vrstvy [m]
 A – plocha vláknité vrstvy [m²]

Pro vyjádření tlakové ztráty čisté ideální vrstvy se zavádí „bezrozměrná tlaková ztráta Π “, závislá na jednotlivých proudových modelech. Bezrozměrná tlaková ztráta může být funkcí poréznosti případně objemového zaplnění, funkcí modifikovaného Reynoldsova čísla vyjadřujícího vliv vazkosti na tlakové ztrátě vláknité vrstvy nebo funkcí a Knudsenova čísla vyjadřujícího vliv skluzu na tlakové ztrátě vláknité vrstvy. [1],[4]

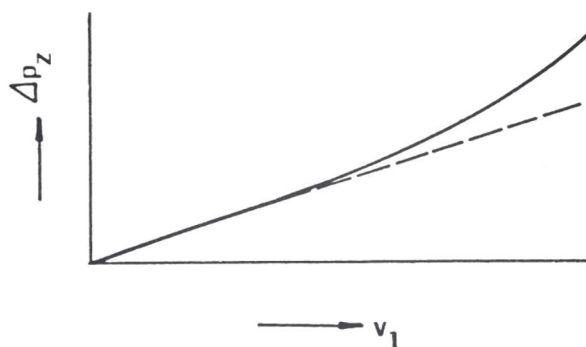
Tlaková ztráta se s použitím veličiny Π vyjádří:

$$\Delta P_z = \frac{v_1 s \eta}{R^2} \Pi \quad (15)$$

Kde: R – poloměr vlákna [m]

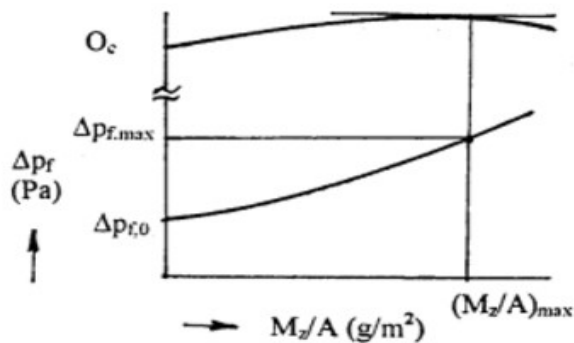
Tlaková ztráta filtru v čistém stavu se poněkud liší od tlakové ztráty filtračního materiálu (vláknité vrstvy). Velmi záleží na druhu použitého filtru a na vlastnostech materiálu filtru. Ve skutečnosti vzduch neprotéká kolmo na povrch filtru ale pod úhlem $< 90^\circ$.

Důležitá je také znalost změny tlakové ztráty se zanášením filtru a také znalost změny tlakové ztráty filtru s průtokem plynu. Závislost tlakové ztráty na filtrační rychlosti je popsána na obrázku 2.8. Při nízkých rychlostech je charakteristika lineární, ale se vzrůstající filtrační rychlostí se mírně odchyľuje od lineární závislosti. [1],[4]



Obr. 2.8 - Závislost tlakové ztráty filtru na filtrační rychlosti [1]

Na obr 2.9 je vidět změna tlakové ztráty graficky, kde na vodorovné ose je vyneseno poměr hmotnosti zachycených částic (M_z) a velikosti filtrační plochy (A) a na svislé ose změna tlakové ztráty filtru od její počáteční hodnoty. Tuto závislost nelze jinak zjistit než experimentálně pro daný filtr a konkrétní podmínky.[1],[3]



Obr. 2.9 - Závislost změny tlakové ztráty filtru se zanášením [1]

3. Filtrace atmosférického vzduchu

Filtrace se dělí na dvě základní oblasti: filtrace průmyslová a filtrace atmosférického vzduchu. Pro obě oblasti platí stejný teoretický základ a uplatňují se stejné odlučovací principy.

Je velmi důležité znát rozdíly mezi průmyslovou filtrací a filtrací atmosférického vzduchu. To znamená vědět s jakými teplotami, složením plynu a s jakými koncentracemi bude filtr pracovat. Atmosférickou filtraci nelze zaměňovat s filtrací průmyslovou, protože v průmyslové filtraci se zpravidla pracuje s vysokými objemovými průtoky a vysokými rychlostmi dopravovaného média. [2],[5]

Hlavní rozdíl mezi filtrací průmyslovou a atmosférickou je, že u filtrace atmosférického vzduchu dochází k hloubkové filtraci. Pojem hloubková filtrace znamená, že k odlučování dochází uvnitř filtrační vrstvy, takže po zanesení filtru částicemi je filtr nutné vyměnit. Naopak u průmyslové filtrace dochází k povrchové filtraci a materiály zpravidla umožňují regeneraci, to znamená, že umožňuje odstranění odloučené vrstvy a tím tak zajistí stálou tlakovou ztrátu. Dalšími znaky filtrace atmosférického vzduchu je nízká vstupní koncentrace částic v řádech mg/m^3 kdežto u filtrace průmyslové se pracuje s hodnotami řádově g/m^3 . Nejběžnější aplikace atmosférických filtrů je u zařízení určených k větrání a klimatizaci. Zde koncentrace částic zdaleka nedosahuje takových hodnot jako u filtrace průmyslové. [2],[5]

Člověk tráví většinu svého života ve vnitřních prostorech, ať už je to obytný nebo pracovní prostor. Je důležité, aby se člověk ve svém prostředí cítil dobře a nepocíťoval žádné znečišťující látky a právě atmosférické filtry slouží k dodržení hygienických požadavků. Dále také atmosférická filtrace může sloužit pro ochranu klimatizačních zařízení jako je například ochrana výměníku tepla. [3]

Samostatnou kategorií jsou čisté prostory, kde za čistý prostor se považuje takový prostor, u kterého je řízena koncentrace částic ve vznosu. Takže tento prostor musí být oddělený stavebními prvky konstrukcí tak, že je izolován od vnějšího prostředí. A klimatizační jednotka musí být vybavena dokonalou třístupňovou filtrací vzduchu. [2],[3],[5]

3.1. Třídění filtrů

Filtry pro filtraci atmosférického vzduchu dělí na dvě základní skupiny. První skupinou jsou filtry pro běžné větrání (prachové filtry) a druhou skupinou jsou filtry vysoce účinné (aerosolové filtry). Obě tyto skupiny se dále dělí na jednotlivé třídy, kde se zvyšující se třídou se zvyšují nároky na odlučování. [1]

3.1.1. Filtry pro běžné větrání

Do prosince 2016 platila norma ČSN EN 779, která se zabývala zkoušením a následným rozříděním filtrů a podle které se filtry pro běžné větrání dělí do tří tříd (jemné, střední, hrubé). Tuto normu nahradila nová norma ISO 16890, která při zkoušení zavádí nové indikátory a to frakce atmosférického prachu PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 , které jsou v ochraně ovzduší definovány jako částice atmosférického prachu menší než aerodynamická velikost částice 10, 2,5 a 1,0 μm . [6]

Na základě výsledků a zkoušek jsou filtry zaříděny podle splnění požadavků pro $ePM_{1,min}$ a $ePM_{2,5,min}$ a pro ePM_{10} do následujících tříd – viz tab 3.1.

Tab. 3.1 Rozdělení filtrů pro běžné větrání dle ISO 16590 [6]

Třída filtrů	Požadavek na třídu filtrů			Uváděná hodnota u filtrů
	$ePM_{1,min}$	$ePM_{2,5,min}$	ePM_{10}	
ISO hrubý	-	-	< 50 %	Počáteční hodnota odlučivosti na syntetický prach
ISO ePM_{10}	-	-	> 50 %	ePM_{10}
ISO $ePM_{2,5}$	-	> 50 %	-	$ePM_{2,5}$
ISO ePM_1	> 50 %	-	-	ePM_1

Tato norma pracuje s účinností ePM_x , která vyjadřuje hmotnostní účinnost odlučování filtru stanovenou pro částice atmosférického prachu v rozsahu opticky stanovených velikostí částic 0,3 až $x \mu m$.

3.1.2. Filtry vysoce účinné

Vysoce účinné filtry se dělí na tři kategorie a to na HEPA, EPA a ULPA filtry podle normy ČSN EN 1822 z roku 2010. Zařazení filtru do některé z tříd se podle normy ČSN EN 1822-1 provádí porovnáním zjištěných hodnot s příslušnými mezními hodnotami celkové a místní odlučivosti, resp. průniku. [1],[7]

Tab. 3.2 Rozdělení vysoce účinných filtrů [1]

Třída filtru	Označení filtru	Celková hodnota		Přípustná místní netěsnost	
		Odlučivost (%)	Průnik (%)	Odlučivost (%)	Průnik (%)
E - EPA	E10	≥ 85	≤ 15	-	-
	E11	≥ 95	≤ 5	-	-
	E12	≥ 99,5	≤ 0,5	-	-
H - HEPA	H13	≥ 99,95	≤ 0,05	≥ 99,75	≤ 0,25
	H14	≥ 99,995	≤ 0,005	≥ 99,975	≤ 0,025
U - ULPA	U15	≥ 99,9995	≤ 0,0005	≥ 99,9975	≤ 0,0025
	U16	≥ 99,99995	≤ 0,00005	≥ 99,99975	≤ 0,00025
	U17	≥ 99,999995	≤ 0,000005	≥ 99,9999	≤ 0,0001

3.1.3. Rozdělení dle provedení filtru

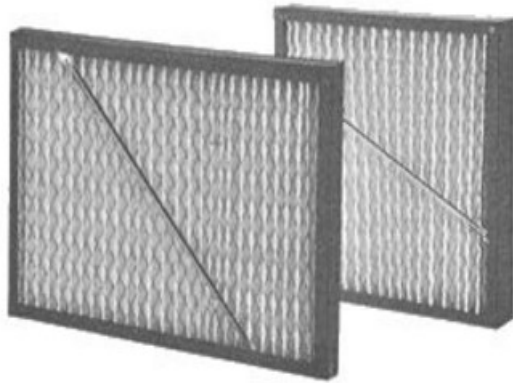
Jak již bylo zmíněno, filtry se rozdělují na prachové a aerosolové filtry. Z toho také do značné míry vyplývá jejich provedení a použití materiálů. Filtry atmosférické lze rozdělit na dvě hlavní provedení, na vložkové a pásové filtry. Pro běžnou filtraci se nejčastěji používají filtry vložkové a pásové a pro vysoce účinnou filtraci se používají nejčastěji vložkové. [1],[7]

– Vložkové filtry

Vložkové filtry se dále rozdělují na tři podkategorie. Jsou to deskové, kapsové a skládané filtry.

Deskové filtry mají jednotlivé vložky tvaru plochých desek, které jsou vyjímatelné. Upevňují se do skříní a rámců a to čelně nebo bočně do vzduchotechnického potrubí. Použití deskových filtrů je nejčastěji do třídy F5 dle do nedávna platné normy ČSN EN 779. Deskové filtry mohou být se skládaným nebo plochým filtračním materiálem, jak je vidět na obrázku 3.1 a 3.2. Jeden z rozdílů mezi skládaným a plochým filtračním materiálem je, že u vložek se skládaným materiálem se vymění buď pouze filtrační materiál nebo celé vložky. Ale u vložek s plochým filtračním materiálem se při údržbě mění nejčastěji pouze filtrační materiál. [1],[7]

U **kapsových filtrů** je filtrační materiál ušit do tvaru hloubkových kapes. Hlavní roli zde hraje šířka a hloubka kapes, která se volí podle požadavku na objemový průtok tak, aby byla dodržena filtrační rychlost. Kapsové filtry se používají od třídy G2 až do F9 dle do nedávna platné normy ČSN EN 779. Ukázka kapsového filtru je na obrázku 3.3. [1],[7]



Obr. 3.1 - Filtr se skládaným filtračním materiálem [8]



Obr. 3.2 - Filtr se skládaným filtračním materiálem [2]



Obr. 3.3. Kapsový filtr [22]

Skládané filtry se používají v oblasti vysoce účinné filtrace (EPA, HEPA, ULPA), ale mohou se použít i pro oblasti vyšších tříd běžné filtrace. Jako filtrační materiál se nejčastěji používají filtrační papíry ze skelných vláken. Tento filtrační papír se skládá do hlubokých skladů a tím vznikají vložky ze skládaného filtračního materiálu. Jelikož názvy pro vložky nejsou jednotné, tak se uplatňují obecné názvy kompaktní nebo kazetové vložky, které jsou na obrázku 3.4 a 3.5. [1],[7]

Kazetová filtrační vložka umožňuje montáž do větracích a klimatizačních jednotek a používají se jako třetí stupeň filtrace u čistých prostorů. U kompaktní kazetové filtrační vložky se filtrační materiál skládá do rámu, který může být z různých materiálů. Zvláštní podskupinu tvoří patronové filtrační vložky obr. 3.6, ve kterých dochází k filtraci z vnějšku dovnitř. [1],[7]



Obr. 3.4 - Kazetová filtrační vložka [23]



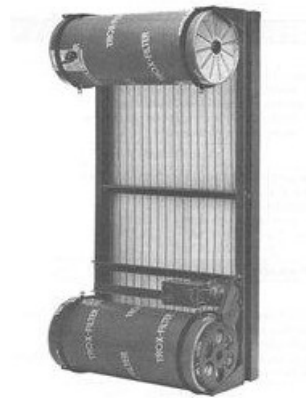
Obr. 3.5 - Kompaktní filtrační vložka [24]



Obr. 3.6 - Patronové filtry [25]

– Pásové filtry

Pásové filtry lze rozdělit na oběhové a odvinovací. Na obrázku 3.7 je vertikální pásový filtr odvinovací, pásový filtr odvinovací může pracovat jak vertikálně tak i horizontálně. Pásový filtr funguje na principu odvíjení filtračního materiálu ze zásobníku. Odvíjení je řízeno na základě tlakové ztráty. Naopak oběhový filtr je tvořen průběžnými regenerovanými na sebe navazujícími pásy tvořících „nekonečný“ pás filtračního materiálu [1],[7],[14]

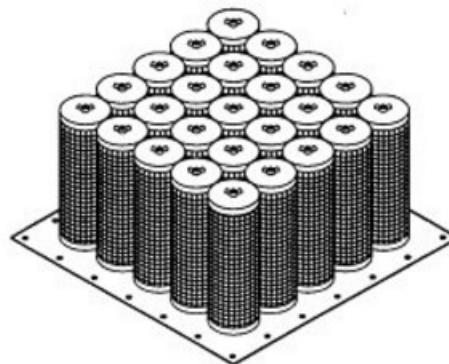


Obr. 3.7 - Pásový filtr [1]

– Sorpční filtry

Sorpční filtry fungují na principu adsorpce. Sorpční látky musí mít velký měrný povrch, takže se používají aktivní uhlí (nejpoužívanější), aktivní koks, saze, silikagel apod.

Aktivní uhlí je velmi citlivé na prach, proto je nutné předřadit účinné předfiltry třídy F7. Sorpční filtry se využívají k zachycení organických látek. Schopnost zachycení znečišťujících organických látek závisí na kvalitě sorpční látky. Sorpční filtry se skládají z válcových patron s vrstvou sorpční látky a jsou připevněny na desku. Nebo mohou být sorpční filtry s deskovými filtračními vložkami, které zabírají méně prostoru. Ukázka sorpčního filtru je na obrázku 3.8. [1],[7]



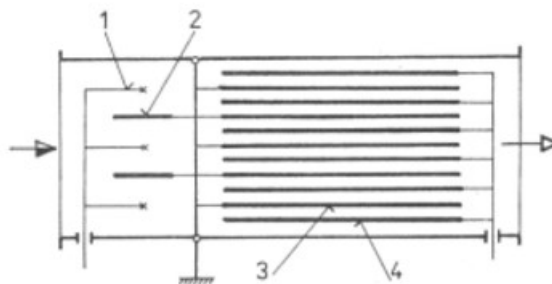
Obr. 3.8 - Sorpční filtr [1]

– Dielektrické filtry a elektrické filtry

K zachycení znečišťujících látek se také používají elektrické síly. K odlučování u dielektrických filtrů dochází ve vláknité vrstvě z elektricky nevodivého filtračního materiálu, která je v elektrickém poli mezi elektrodami. Elektrické síly přispívají k působení ostatních odlučovacích principů. [1]

K odlučování jemných částic dochází u elektrofiltrů, které mají minimální tlakovou ztrátu. V podstatě se jedná o dvouzónový elektrický odlučovač, kde ionizační část je oddělena od části odlučovací. [1]

Elektrofiltry se používají tam, kde jsou extrémní klimatické podmínky a kde běžné filtry selhávají. Schéma dvouzónového elektrického odlučovače je na obrázku 3.9. Kde je ionizační část tvořena soustavou drátových vysokonapěťových elektrod (bod 1) a uzemněnými elektrodami (bod 2). Odlučovací část je tvořena odlučovacími elektrodami (body 3 a 4), na které je přivedeno napětí kladné polarity < 10 kV. [1]



Obr. 3.9 - Schéma dvouzónového elektrického filtru [1]

3.2. Materiály pro atmosférickou filtraci

Materiály pro filtraci atmosférického vzduchu se dělí do tří skupin. Největší skupinu tvoří **vláknité filtrační materiály**, které tvoří převážnou část používaných filtračních materiálů. Další skupina jsou **porézní materiály** a poslední skupinou jsou materiály ve formě **kovových nebo plastových výplní**. Vláknité filtrační materiály se rozdělují na rohože, rouna, vpichované textilie a filtrační papíry. [5]

Rohože se skládají ze syntetických nebo skleněných vláken. Pro lepší soudržnost jsou spojeny impregnační látkou nebo tepelným zpracováním. Pro zlepšení mechanických vlastností materiálu se na vstupní straně rohože často nanáší tenká pevnější pojená vrstva, která zabraňuje i průniku větších částic. [5],[9]



Obr. 3.10 - Rohož [26]

Rouna se skládají z jemnějších vláken oproti rohožím. Vlákna mohou být minerální, syntetická nebo organická. Tato vlákna jsou nanesena na nosný

podkladový materiál, který slouží i pro ochranu proti průniku úlomků vláken do vzduchu. Výhodou u roun a rohoží je to, že je lze vyrábět v podobě vrstveného materiálu. [5],[9]

U vpichované textilie, která se skládá ze syntetických vláken, se pro zlepšení soudržnosti vrstvy a vláken používá takzvaná vpichovací technologie, která je popsána v následující kapitole. [10]



Obr. 3.11 - Rouno [27]

Filtrační papíry se skládají ze skleněných nebo organických vláken a vyrábějí se metodou zvlákňování. Filtrační papíry ze skelných vláken mají řadu výhod, například chemickou odolnost, nízkou absorpci vody a také nízké pořizovací náklady. Filtrační papíry se používají nejčastěji u skládaných filtrů. [9]

Dalšími možnostmi filtračního materiálu, které lze použít, jsou přírodní latexová vlákna nebo recyklovaný papír. Latexová vlákna se používají nejčastěji v potravinářství nebo v lékařství. Oproti tomu u recyklovaného papíru je možnost použití omezena. Používá se například jako předfiltr u vícestupňového filtračního systému v lakovnách. [9]



Obr. 3.12 - Latexový filtr [28]



Obr. 3.13 - Recyklovaný papír [28]

3.3. Výroba vláknitých filtrů

Výroba filtračních materiálů probíhá dvěma způsoby. První z nich je tkaní a druhý způsob je výroba pomocí vpichovací technologie. U tkaní se používá soukací

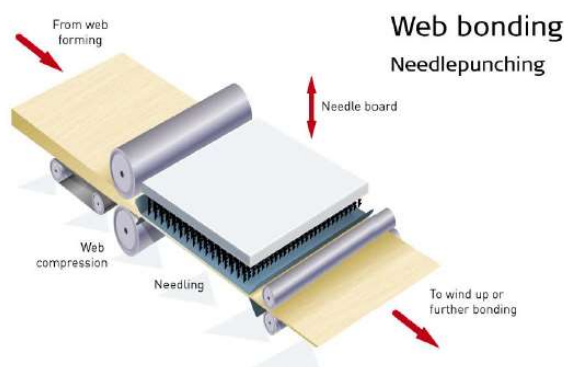
stroj, který je na obrázku 3.14. Výroba pomocí vpichovací technologie se používá nejčastěji. [5],[11]

Podstatou vpichovací technologie je, že na páse se pohybuje filtrační materiál a v určitých intervalech dojde k propíchnutí jehlami, které jsou umístěny na jehelné desce. Jehly mají danou rozteč a tím je dán i počet jehel. Jehly při průchodu materiálem zachytávají skupiny vláken vrstvy, a přeorientovávají je kolmo k vrstvě a protahují je vrstvou. Většinou se používají předvpichovací stroje, které zabezpečují rovnoměrné ztenčení materiálu před vstupem do vpichovacího stroje. [10],[12]



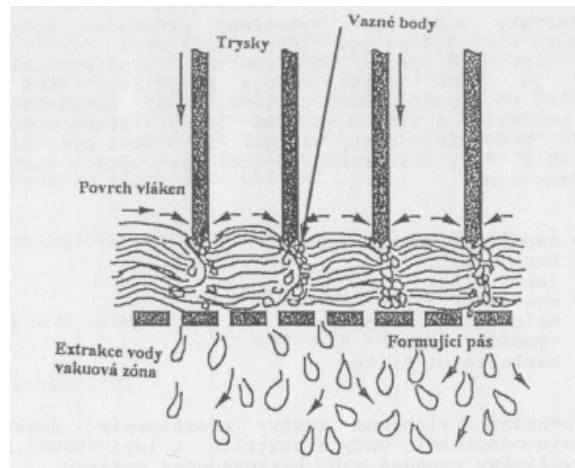
Obr. 3.14 - Soukací stroj [11]

Na obrázku 3.15 je znázorněno schéma vpichovací technologie. V průběhu této technologie dochází k nevratným změnám, jako je například změna rozměru materiálu, redukce tloušťky vrstvy. [5]



Obr. 3.15 - Vpichovací technologie [12]

U výroby netkaných textilií se mimo vpichovací technologie používá technologie spunlaced, což znamená zpevňování paprsky vody. Tato technologie využívá proud vody k provázání jednotlivých vláken. Schéma technologie zpevňování paprsky vody je na obrázku 3.16. [12]



Obr. 3.16 - Zpevňování paprskem vody [12]

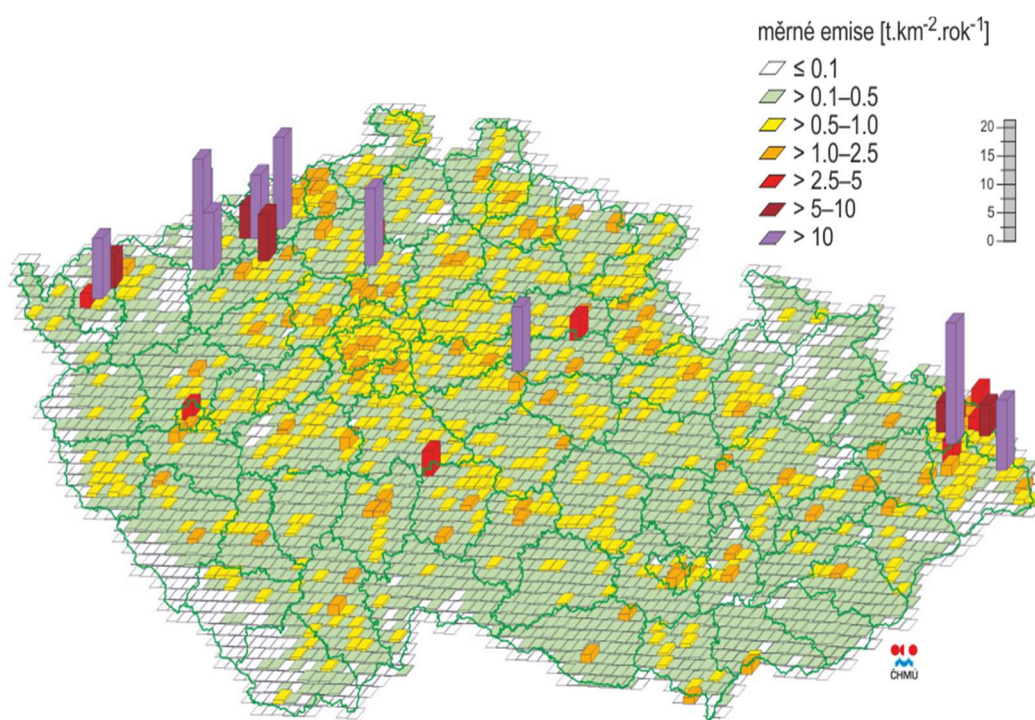
Velkou výhodou této technologie je, že se ke zpevnění vrstvy nepoužívá žádných chemikálií. Dalšími výhodami jsou dobré absorpční vlastnosti, pevnost, prodyšnost a také, že se u této technologie nepoužívá žádné pojivo. Takže je tato technologie zdravotně nezávadná a využívá se převážně pro zdravotnické potřeby.

Naopak nevýhodami této technologie jsou vysoké investiční náklady a velmi vysoká spotřeba energie z důvodu vysoušení finálního výrobku. [12]

4. Průmyslová filtrace

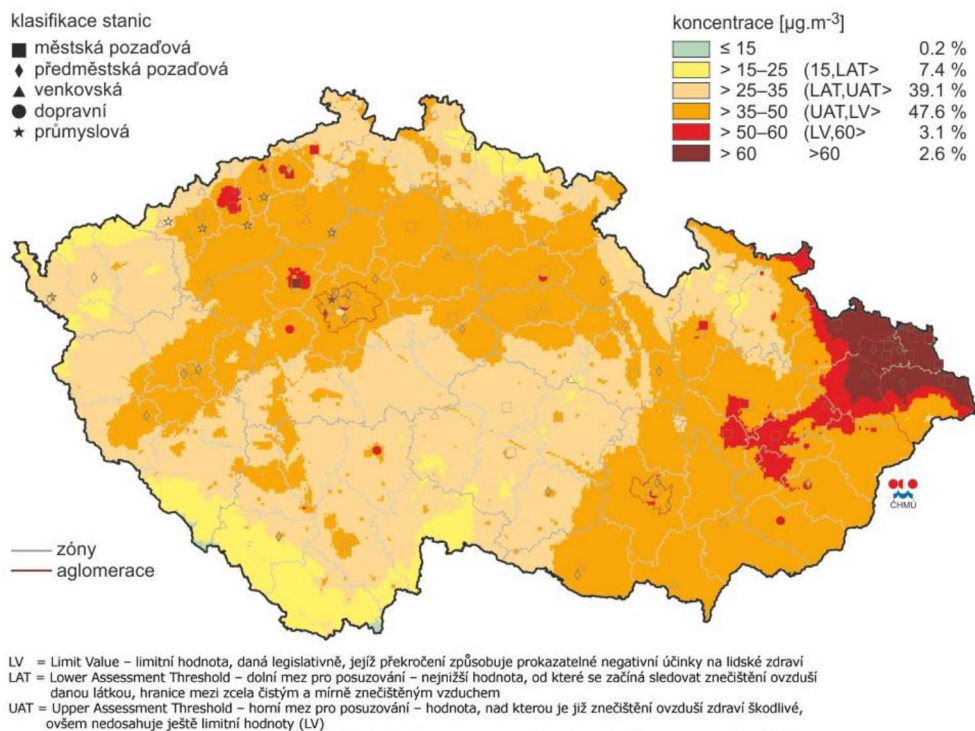
Jak už bylo popsáno v kapitole 3, hlavní rozdíl mezi atmosférickou a průmyslovou filtrací je, že u atmosférických filtrů nedochází k regeneraci. Ale neméně důležitý rozdíl je vstupní koncentrace částic. Průmyslová filtrace na rozdíl od filtrace atmosférického vzduchu pracuje s jinými koncentracemi, složením plynu a teplotami. U atmosférické filtrace se koncentrace pohybuje v mg/m^3 ale u filtrace průmyslové v g/m^3 .

Na obrázku 4.1 jsou pro ukázkou vidět emisní hustoty tuhých znečišťujících látek z roku 2015. Emisní hustoty jsou znázorněny ve formě čtverců o rozměrech $5 \times 5 \text{ km}$, kterým přísluší množství měrných emisí za daný rok. Je vidět, že největší znečištění je na Ostravsku, Ústecku a Mostecku. Toto znečištění je způsobeno stacionárními zdroji znečištění. [13]



Obr. 4.1 - Emisní hustoty tuhých znečišťujících látek vyobrazených ve čtvercích $5 \times 5 \text{ km}$, 2015 [13].

Na obrázku 4.2 je vidět roční koncentrace frakce PM_{10} za rok 2015. Je vidět, že největším problémem jsou vysoké koncentrace prachu PM_{10} na Ostravsku. Tento nepříznivý stav ovzduší je způsoben hlavně velkými stacionárními zdroji znečištění a také vlivem působení lokálních zdrojů a i nepříznivými rozptylovými podmínkami v oblasti. [13]

Obr. 4.2 - Mapa znečištění ovzduší částicemi PM₁₀ [13].

4.1. Rozdělení filtrů

Pro rozdělení průmyslových filtrů neexistuje žádný předpis. Mnoho výrobců třídí průmyslové filtry podle použité technologie, materiálu nebo podle způsobu regenerace.

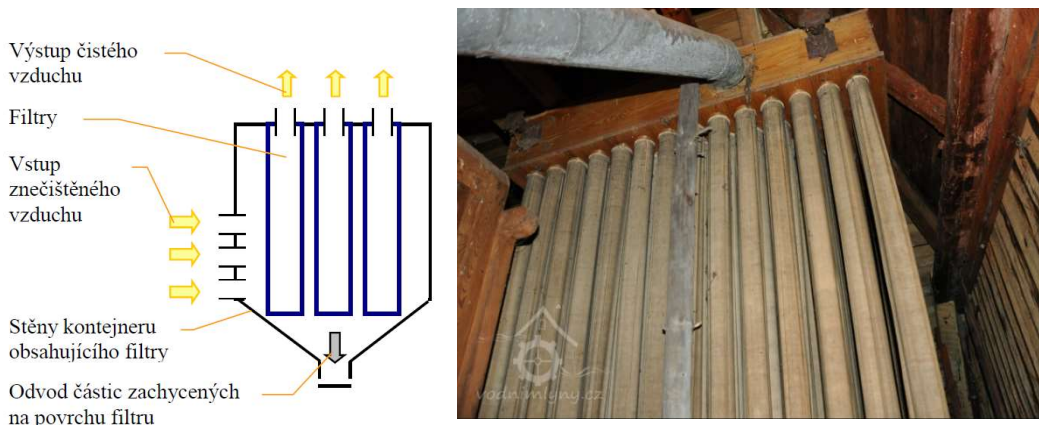
Samostatné průmyslové filtry lze dělit dle provedení a to na hadicové a kapsové. Další samostatnou skupinu tvoří kompaktní patronové filtry, které jsou pro menší objemové průtoky. [14]

Hadicové filtry mají tvar hadice, o průměrech 140 až 250 mm, délka může být až 10 metrů. Hadicové filtry mohou být uloženy v kruhovém nebo řadovém uspořádání. V kruhovém i řadovém uspořádání jsou hadice v kruhové komoře a tato komora je rozdělena do několika sekcí kvůli regeneraci. Obvykle je konstrukce hadicového filtru uspořádána kolmo, ale je možné se setkat i s vodorovně položenými hadicemi, které mají nevýhodu při setřásání prachu do výsypky, kdy dochází k opětovnému zanášení filtrů. [14]

Princip hadicového filtru je na obrázku 4.3. Hadicové filtry se dále mohou dělit dle způsobu regenerace na hadicové filtry se zpětným proplachem a filtry s pulzním proplachem, který je u tohoto provedení nejčastější. Hadicové filtry patří mezi ekonomické a jednoduché možnosti filtrace ve velmi náročných aplikacích. [14]

U **kapsových filtrů** je filtrační textilie uspořádána do hlubokých kapes o různé hloubce a šířce. Dále mají jednoduchou regeneraci pomocí zpětného proplachu, ale existují i kapsové filtry s pulzním profukem.

Nejběžnější využití kapsových filtrů je například v papírenském, dřevozpracujícím nebo v těžebním průmyslu. Většinou se průmyslové kapsové filtry sestavují do velkých celků, takzvaných „filtračních stanic“. [14],[15]



Obr. 4.4 - Schéma a ukázka hadicového filtru [29],[31]

Velkou nevýhodou stejně jako u hadicových filtrů je nutnost použití výztuh v podobě například drátových rámu, které se vkládají do kapes na čistou stranu filtru. A to z důvodu aby zabránily kontaktu protilehlých filtračních ploch při filtraci. Při špatném namontování výztuh může dojít k narušení filtračního materiálu a zmenšení životnosti. Ukázka kapsového průmyslového filtru je na obrázku 4.5. Další nevýhodou je problematika při výrobě, kdy je potřeba utěsnění okrajů kapes na velké ploše. Zde opět může dojít k narušení filtračního materiálu. [14]

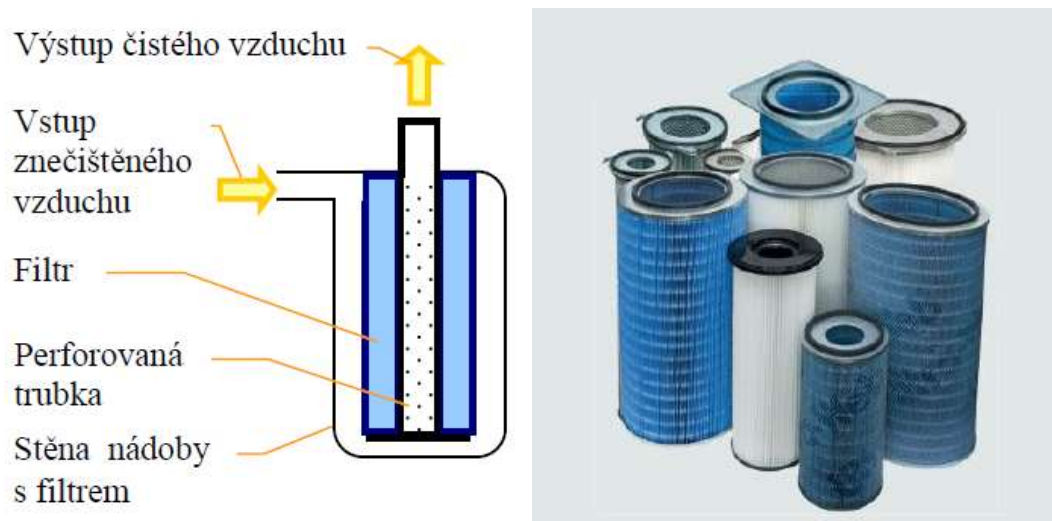


Obr. 4.5 - Kapsový filtr pro průmyslovou filtraci [30]

Patronový filtr neboli svíčkový filtr je tvořen vlákenným nebo skládaným filtrem, který je obtočen kolem perforované dutinky. Na obrázku 4.6 je schéma

patronového filtru, kde znečištěný vzduch prochází vnějškem povrchu filtru a k odvodu dochází perforovanou trubkou. [14],[16]

Patronový filtr může být vyroben jak jednorázový tak i čistitelný se zpětným protlakem. Výhodou u těchto filtrů jsou jejich malé rozměry. [14]



Obr. 4.6 - Schéma a ukázka patronového filtru [31]

4.2. Regenerace

U filtrace průmyslové se pracuje s většími koncentracemi a objemovými průtoky a dochází tak k velmi rychlému zaplnění pórů na čelní straně filtrační vrstvy, takže dochází k tomu, že se částice odlučují na odloučených částicích. Tímto jsou vytvořeny podmínky pro vytvoření takzvaného „filtračního koláče“ a dochází tak ke zvyšování tlakové ztráty a proto je nutné filtrační vrstvu regenerovat. Při regeneraci tedy dochází k odstranění filtračního koláče. K regeneraci zpravidla dochází při překročení určité tlakové ztráty. Lze říct, že změna tlakové ztráty je úměrná tloušťce filtračního koláče. [3],[14]

Cílem regenerace je prodloužení životnosti filtrů. Regeneraci u průmyslových filtrů lze provádět více způsoby, jako je například zpětný proplach, pulzní regenerace a zřídka používána a zároveň nejjednodušší způsob regenerace, regenerace mechanická, ta se využívá například při filtraci dřevního odpadu. [3],[14]

Nejúčinnější způsob je regenerace pulzním rázem. Regenerace pulzním rázem se provádí za provozu a za pomoci tlakové energie vzduchu. Tento způsob se využívá nejčastěji u patronových filtrů a u hadicových filtrů. [14],[17]

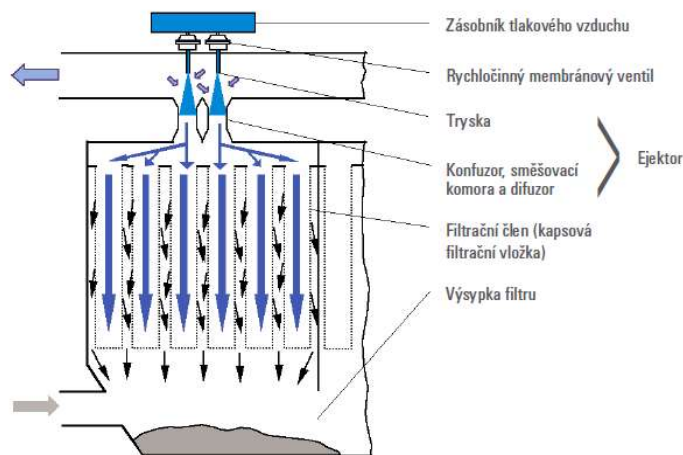
Další účinný způsob je regenerace zpětným proplachem, která se využívá nejčastěji u kapsových filtrů. U tohoto způsobu se musí část filtru odstavit a následně se profouknout externím vzduchem. Oproti regeneraci pulzním rázem je tento způsob šetrnější k použitému materiálu a zajišťuje tak delší životnost filtru. [14],[17]

4.2.1. Pulzní regenerace

Pulzní regenerace je nejintenzivnější a nejpoužívanější metoda regenerace. Využití filtrů s pulzní regenerací může být v podtlakové nebo v přetlakové části vzduchotechnického systému. Nevýhodou tohoto systému je, že je provozně nákladnější, než je tomu u systému se zpětným proplachem. Dalšími nevýhodami jsou nižší životnost filtračních textilií vlivem zvýšeného namáhání a potřeba tlakového vzduchu. Naopak výhodou oproti systému se zpětným proplachem je, že se dosahuje menší tlakové ztráty díky vyšší účinnosti pulzní regenerace [14]

U hadicových filtrů, kde se využívá pulzní metoda, se většinou tato regenerační ústrojí skládají ze zásobníku tlakového vzduchu membránového ventilu, výsypky filtru a směšovací komory, kde se míchá čistý plyn s tlakovým vzduchem. Směšovací komora je oddělaná dělicí deskou, na které jsou zavěšeny jednotlivé hadice pomocí přírub. [14],[18]

Princip pulzní regenerace je, že stlačený vzduch je přiváděn tryskami do směšovací komory. Rozsah pracovních tlaků vzduchu je v rozsahu 0,5 – 0,7 MPa. Trysky jsou řízeny solenoidovým ventilem. Doba výtoku stlačeného vzduchu je 0,1 – 0,3 s a proud trysky má tvar kužele. Po přívodu stlačeného vzduchu do směšovací komory dojde k vyrovnání rychlosti, tlaku i teploty u přiváděného tak i u přísávaného plynu. Poté dojde k vytvoření dynamického rázu, a tím se odstraní odloučený prach z povrchu filtru. Schéma regenerace pulzním proplachem je na obrázku 4.7. [14],[18]



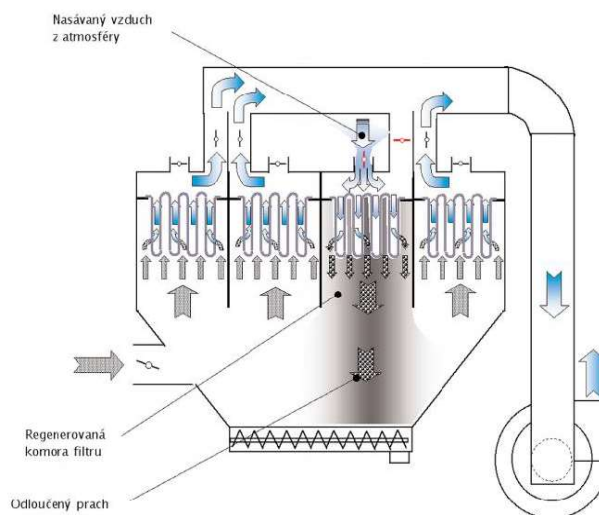
Obr. 4.7 - Schéma regenerace pulzním proplachem [32]

4.2.2. Zpětný proplach

Zpětný proplach patří k nejstarším a nejspolehlivějším způsobům regenerace. Tento způsob regenerace se používá ve většině odvětvích průmyslu, jako je například těžební průmysl. Regenerace zpětným proplachem probíhá vždy při odstávce filtračního systému. Výjimku tvoří velké filtrační stanice, u kterých probíhá regenerace stále a to tak, že je vždy odstavena jedna část a zbytek stále běží. Oproti pulzní regeneraci mají filtry se zpětným proplachem daleko menší

provozní náklady a daleko jednodušší údržbu. Ale nevýhodou tohoto způsobu je, že pracuje pouze v podtlakovém vzduchotechnickém systému. [14]

Princip zpětného proplachu spočívá v nasátí venkovního plynu vlivem podtlaku ve filtru, který je zajištěn tlakovou ztrátou před filtrem nebo se používá proplachovací ventilátor. Namáhání filtrační textilie je menší, protože proplach trvá jen pár desítek vteřin s malou intenzitou. A to má za následek, že filtry mají delší životnost. Schéma zpětného proplachu je na obrázku 4.8. [14]



Obr. 4.8 - Schéma regeneace zpětným proplachem [32]

4.3. Materiály pro průmyslovou filtraci

Pro průmyslovou filtraci se používají filtrační materiály, které lze rozdělit do tří skupin: **filtrační textilie**, **zrnité vrstvy** a **porézní hmoty**. Filtrační textilie se dělí na dvě podskupiny: tkané a netkané. Tkaná textilie je vyrobena pletením, všíváním, proplétáním a plstěním. U netkané textilie je vrstva vyrobena z jednosměrných nebo náhodně orientovaných vláken, spojených třením, kohezí nebo adhezí. [14]

Filtrační textilie jsou opatřeny povrchovou úpravou pro lepší účinnost odlučování drobných částic i pod $1\mu\text{m}$. Nejčastější materiály, ze kterých jsou vyráběny tkaninové filtry, jsou uvedeny v tabulce 4.1. V této tabulce je i teplotní odolnost materiálů. Teplotní odolnost může být trvalá, což je provozní teplota, při které při jejím trvalém působení nedochází ještě k podstatným změnám ve vlastnostech filtrační vrstvy. Nebo to může být teplota špičková, to je maximální teplota, při které může být materiál vystaven pouze krátkou dobu. [14]

Z tabulky 4.1 je vidět, že do teploty $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ lze využít jakéhokoliv syntetického nebo přírodního materiálu, ale u některých syntetických materiálu s patřičnou úpravou lze dosáhnout teplotní odolnosti i vyšší než $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. U některých filtračních textilií lze dosáhnout teplotní odolnosti do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, například u skelných vláken. Výjimku tvoří kovové filtrační materiály, které mají odolnost nad 300°C . [14]

Tab. 4.1 Používané materiály k výrobě filtračních textilií [5]

materiál	teplota [°C]
PVC - polyvinilchlorid	40 až 50
bavlna	75 až 85
vlna	80 až 90
PAD - polyamid	75 až 85
POP - polypropylen	až 90
PAN - polyakrilonitril	až 135
PES - polyester	až 150
PTFE - polytetrafluorethylen (Teflon)	200 až 250
aramid (Nomex)	až 230
skleněná vlákna	250 až 300
kovová vlákna	více jak 300

Mezi netkané textilie patří například plst, která je znázorněna na obrázku 4.9. Plst je textilie, která má vzájemně zaklesnuta vlákna. Toho se dosáhne vpichováním nebo plstěním za mokra. Plstění za mokra je metoda založena na napouštění vlákna parou a následným valchováním. [12]



Obr. 4.9 - Plst [33]

V dnešní době mají velké využití polymery, jako je například polyester, polypropylen nebo polytetrafluorethylen. V případě polytetrafluorethylenu jde o nejkvalitnější materiál z hlediska odolnosti. Všeobecně polymery dobře odolávají mikroorganismům a mají vysokou odlučivost a malou tlakovou ztrátu. [12]

V menší míře se využívají karbonová vlákna, protože jejich cena je oproti skelným vláknům nebo polymerům příliš vysoká. Jejich výhodou je vysoká tepelná a chemická odolnost. [12]

Při volbě filtrační textilie je nutné zohlednit tři charakteristické skupiny vlastností:

- **Fyzikálně-chemické:**

Mezi které patří: průměr vlákna, tloušťka, plošná hmotnost, poréznost, pevnost v tahu, tažnost, teplotní odolnost, prodyšnost, rozměrová stálost, voděodolnost, navlhavost, stupeň nehořlavosti. [14]

- **Chemické:**

Tyto vlastnosti popisují například odolnost filtračních materiálů vůči plynným znečišťujícím látkám, odolnost vůči

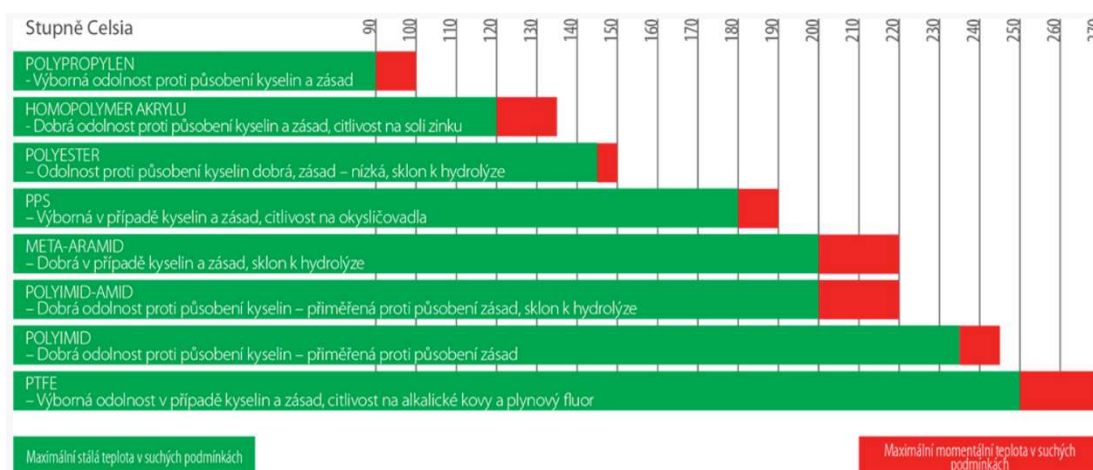
parám kyselin, zásad a rozpouštědel, které mohou poškodit strukturu materiálu. Tato odolnost se hodnotí na základě úbytku pevnosti v tahu, a to například pěti stupni, kdy stupněm 5 (vynikající) je hodnocen materiál s úbytkem v tahu maximálně 5% a stupněm jedna 1 (nejhorší) materiálem s úbytkem v tahu vyšším, než 60%. U některých výrobců se lze setkat s tří nebo čtyř stupňovým hodnocením. [14]

- **Filtrační:**

Tyto filtrační vlastnosti průmyslových textilií se stavují laboratorními zkouškami materiálů. Měří se hlavně celková odlučivost filtračního materiálu a výstupní koncentrace. V dnešní době lze dosáhnout více než 99,99 % celkové odlučivosti a výstupní koncentraci menších než 1mg/m^3 . [14]

V tabulkách 4.2 a 4.3 je ukázka teplotní odolnosti materiálu a chemické vlastnosti materiálu nabízených firmou 1Filter, kde u hodnocení vlastností je čtyřstupňové.

Tab. 4.2 Teplotní odolnost filtračních materiálů – firma 1Filter [58]



Tab. 4.3 Vlastnosti filtračních materiálů – firma 1Filter [58]

	KYSELINA	ZÁSADA	HYDROLÝZA	OXIDACE	ROZPOUŠTĚDLA
Polypropylen	4	4	4	2	3
Homopolymer akrylu	3	2	4	3	3
Polyester	3	2	1	3	3
PPS	4	4	4	1	3
Meta-aramid	2	3	2	2	3
Polyimid	3	3	2	2	3
PTFE	4	4	4	4	4

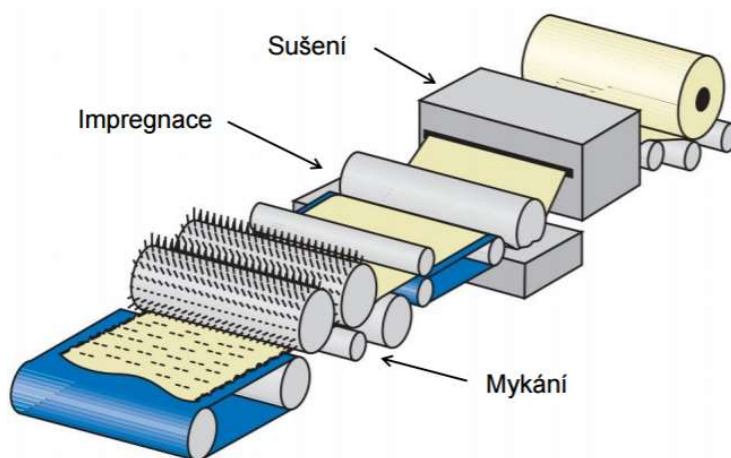
4.4. Povrchové úpravy

Povrchové úpravy mají velkou váhu z hlediska životnosti průmyslových filtrů. Někdy se používají i u filtrace atmosférického vzduchu. Povrchové úpravy se provádějí z důvodu zvýšení odlučivosti, zlepšení stávajících vlastností a jsou úzce spjaty s regenerací filtru, protože povrchová úprava způsobuje snižování adhezní síly mezi povrchem filtračního materiálu a odloučeného prachu. Za povrchovou úpravu lze považovat i nanovláknennou vrstvu, tomuto tématu se věnuje kapitola 5.

Existuje mnoho povrchových úprav, které lze rozdělit podle způsobu provedení (na povrchu, uvnitř struktury) nebo podle použité technologie (chemická, termická, mechanická) a zde jsou popsány nejdůležitější povrchové úpravy:

- **Impregnace**

Úprava spočívá v aplikování ochranné impregnace, která zabraňuje pronikání vlhkosti do struktury vrstvy a předchází předčasnému zanášení pórů, což má za následek pomalejší nárůst filtračního koláče. Prostředek ve formě kapaliny proniká do textilie. U této metody se používá impregnační linka, která je na obrázku 4.10. Spolu s impregnační linkou se nejčastěji používá fulár. Fulár je tvořen dvojicí válců mezi kterými prochází textilie. Zde se mezi válci pod velkým tlakem odmačkává tekutina. Používá se k odstranění přebytečné kapaliny a pro rychlejší sušení. [19],[20]



Obr. 4.10 - Impregnační linka [19]

- **Zatírání**

Principem zatírání je nanášení pojiva na povrch, kde se pojivo nevstřebává, ale zůstává na povrchu. Pojiva mají různé formy, které jsou nanášeny na textilii. Jsou to například pevná pojiva, které se nanášejí mechanicky nebo elektrostaticky na textilii. Dále pak pasty, pěny a taveniny pojiv. [19]

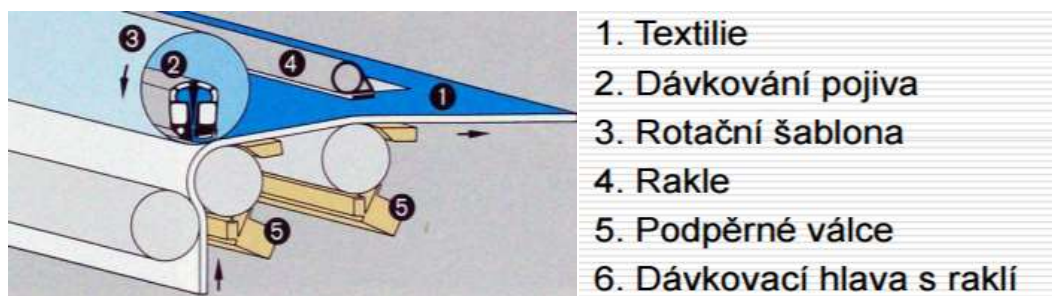
- **Nános abraziva**

Principem této úpravy je nanášení pojiva ať už organických nebo minerálních na povrch textilie a tím se dosahuje zpevnění vrstvy. K nanášení pojiva (abraziva)

dochází dvěma způsoby. A to, mechanicky nebo elektrostaticky. K mechanickému nanášení abraziva dochází pomocí kmitajícího kartáče, rotujícího kartáče, rotující šablony nebo pomocí registru. Všechny tyto mechanické metody jsou vhodné pro pevné a objemné materiály. Elektrostatické nanášení abraziva využívá elektrické pole tvořené střídavým napětím. [19]

• Povrstvování

Povrstvování textilie je pomocí technologie Hot-melt. Technologie Hot-melt slouží k nánosu taveniny v celé ploše, lineárně nebo bodově a cílem je vytvořit spoj v krátkém čase. Na obrázku 4.11 je schéma povrstvování, kde nejdůležitější prvek tvoří rakle. Rakle ovlivňuje tloušťku nánosu a viskozitu použitého roztoku. Tento způsob úpravy povrchu se využívá ke zlepšení povrchových vlastností, jako je adheze, navlhavost, odolnost vůči korozi a jako ochrana proti elektromagnetickému záření, resp. proti bakteriím. [19]



Obr. 4.11 - Schéma povrstvování [19]

• Povlakování

Tato povrchová úprava má pozitivní vliv na zachytávání prachu na povrchu vrstvy. Lze ji rozdělit na dva druhy, na použití PTFE membrány a na mikroporézní pěnový povlak. Obě metody výborně zachytávají prach na povrchu vrstvy a dobře odpuzují vodu a slouží jako ochrana proti kyselinám. Na obrázku 4.12 je vidět struktura pěnového povlaku. [19]



Obr. 4.12 - Struktura pěnového povlaku [19]

• Tepelné pojení

Využívá způsobu pojení, kde za pomoci zvýšené teploty převede polymer do taveniny a následně v místech nanesení vytvoří pojivá místa. Výhodou této metody je rychlý bezkontaktní ohřev, takže dochází k úspoře energie. Naopak nevýhodou je nelehké udržení stálé teploty v celém prostoru a není vhodná pro

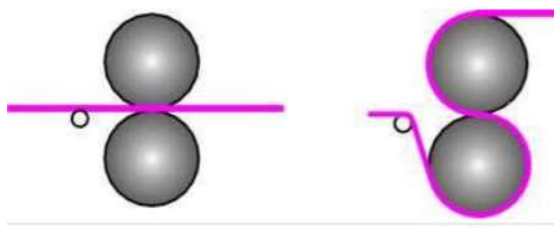
lehké výrobky. Do této metody se řadí hlavně horkovzdušné komory a kalandry. [19]

- **Natavování povrchu**

U této metody se provádí taková úprava, aby bylo docíleno hladkých povrchů. Taková to úprava zajistí, že filtry se podstatně pomaleji zanášejí a umožňují periodické odstraňování prachu oklepáváním. Za pomoci infrazářičů (sálavým teplem) dochází k natavování povrchu a docílení hladkého povrchu. Aby bylo zajištěno pouze natavování povrchu a ne celého průřezu textilie, je textilie podložena chladícími válci. Krom hladkého povrchu je výhoda, že nedochází ke změně velikosti pórů. [19]

- **Kalandrování**

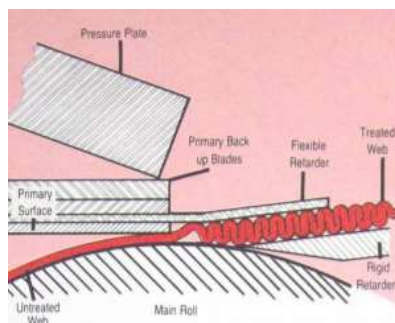
Kalandrování je metoda, kde dochází ke zploštění průřezu vlákna, při které se dosahuje kompaktnější struktury. Kalandry mohou být s ohřevem nebo bez ohřevu. U metody s ohřevem se ohřev realizuje vodou, vzduchem, párou nebo olejem. Mají vysoké výrobní rychlosti až 1000 m/min, teploty až 275°C. [19]



Obr. 4.13 - Kalandry válcové [19]

- **Krepování**

Při metodě krepování dochází k porušení vláken, takže se používá tam, kde pokles pevnosti nemá vliv na užité vlastnosti. Krepování se provádí za sucha a to zajišťuje měkkost, pružnost, objemnost a texturu. [19]



Obr. 4.14 - Metoda krepování

- **Antistatická úprava**

Tato úprava slouží k odstranění nežádoucích účinků elektrostatického náboje vláken, ke kterému může dojít při filtraci. Nežádoucí účinek elektrostatického náboje je nežádoucí přilnavost. Může nastat i situace, při které dojde k nahromadění velkého množství elektrostatického náboje a to může vést k výboji a následně k výbuchu. Tato úprava se provádí antistatickými chemickými přípravky, které působí trvale nebo dočasně. Nebo se používají uhlíková vlákna a měděná vlákna. [19]

- **Ochrana proti jiskrám**

Tato úprava povrchu chrání textilii před žhavými částicemi, které mohou přijít do kontaktu s filtrem. Po ošetření povrchu chemicky nebo za použití zoxidováním vrchní vrstvy vláken může dojít ke kontaktu s jiskrami bez negativního dopadu na filtrační materiál. [19]

5. Nanotechnologie

Nanovlákná všeobecně patří do velkého technického oboru nanotechnologie, proto je vhodné si ujasnit co to nanotechnologie je. Nanotechnologie z řeckého slova – nanos (trpaslík) a techné (dovednost) je technický obor, který se zabývá vývojem a výrobou materiálů o rozměrech nanometrů (1 – 100 nm). Může to být jakákoliv technologie pracující v měřítku nano a má uplatnění v reálném světě. Nanotechnologie nachází v dnešní době široké uplatnění přesto, že tento obor není mezi námi dlouhou dobu. Největší využití nanotechnologie je například v elektronice, medicíně, textilním průmyslu, atd. [35]

Dle definice Evropské komise z roku 2011 jsou nanomateriály definovány jako „přírodní materiál, materiál vzniklý jako vedlejší produkt nebo materiál vyrobený obsahující částice v nesloučeném stavu nebo jako agregát či aglomerát, ve kterém je u 50% nebo více částic ve velikostním rozdělení jeden nebo více vnějších rozměrů v rozmezí velikosti 1 nm – 100 nm“ [36]

O nanotechnologii lze říct, že se jedná o revoluční pokrok v průmyslové výrobě. Protože nanotechnologie nabízí řešení několika problémů, jako je například vývoj malých, lehčích, rychlejších materiálů. Velká škála vývojových středisek se zabývá výzkumem nanovláken a to z hlediska přípravy a vývoje, tak i z hlediska realizace v průmyslu. Přestože nanovlákná mají obrovský potenciál využití v technických oborech, tak zatím nedošlo k velkému využití ve filtraci vzduchu a to z důvodu náročnosti kvalitního spojování nanovláken s podkladovou vrstvou. [35]

5.1. Historie

První zmínky o nanovláknách byly zapsány v roce 1902 v patentu, který se zabýval sprayováním v elektrickém poli. V roce 1929 byl sepsán patent na přípravu umělého hedvábí v přítomnosti elektrického pole. Až v roce 1939 byla první zmínka o metodě tvorby nanovláken (elektrospinning), ale bohužel v této době nebyla dostatečně nalezena patřičná uplatnění.[35]

Fyzik Richard Feynman (*1918 †1988) je skutečný zakladatel oboru nanotechnologie. V roce 1959 měl na kongresu americké společnosti fyziků přednášku o principech nanotechnologie. Ale autorem pojmu nanotechnologie je vědec Eric Drexler (*1955), který vytvořil koncept malých strojů. A v roce 1966 Jean Israel Simon (*1913 †1995) patentoval přístroj na výrobu ultratenkých tkanin pomocí elektrického zvláknování. Simon zjistil, že vlákna nízko viskózních roztoků měla snahu se zkracovat a zjemňovat, zatímco vlákna z vysoko viskózních roztoků byla spojitá [37], [38].

6. Nanovlákna

Pod pojmem nanovlákno se rozumí vlákno submikronových rozměrů s průměrem menším než $1\ \mu\text{m}$ ($1\ \mu\text{m} = 1000\ \text{nm}$) a jeho délka je o dva a více řádů vyšší. Například lidský vlas má průměr okolo $80\ \mu\text{m}$, takže je asi 200 krát tlustší než průměrné nanovlákno, nebo pro lepší představu, poměr velikostí průměru nanovlákna a fotbalového míče je srovnatelný s poměrem mezi fotbalovým míčem a zeměkoulí. Na obrázku 6.1 je ukázka nanovlákna s porovnáním s pylovým zrnem. [39]

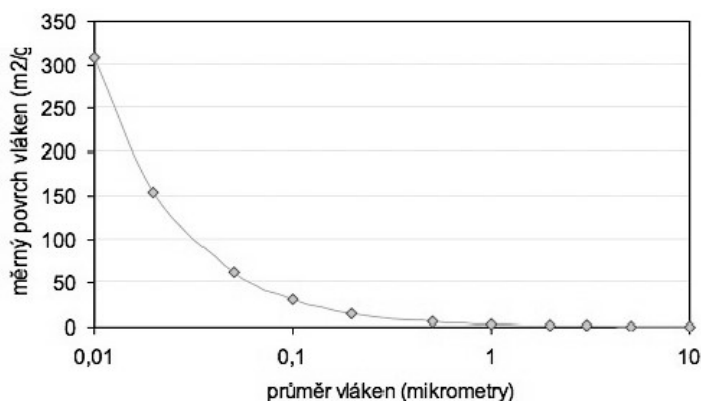
Běžné průměry nanovláken jsou 50 až 500 nm. Pro pozorování nanovláken se používá elektronový mikroskop místo běžného mikroskopu. Pozorování pod běžným mikroskopem není možné, protože průměry nanovláken jsou menší než je vlnová délka světla. [35]



Obr. 6.1 - Nanovlákno v porovnání se pylovým zrnem [49],[50]

6.1. Vlastnosti a charakteristika nanovláken

Jedna z velkých výhod je, že nanovlákna mají velký měrný povrch a díky tomu mají specifické vlastnosti. Obrázek 6.2 ukazuje vztah mezi průměrem vláken a jejich měrným povrchem, kde je vidět, že měrný povrch vláken se snižujícím se průměrem vlákna roste, což je jejich další výhodou. Ale ve skutečnosti hodnoty měrného povrchu jsou ještě nižší z důvodu mezivláknenných kontaktů.



Obr. 6.2 - Vztah mezi měrným povrchem kruhových vláken a jejich průměrem [31]

Dalšími základními vlastnostmi nanovláken je tloušťka vrstvy, průměr vlákna, rozměry pórů a poréznost. Přehled základních charakteristik nanovláken je v tabulce 6.1.[31]

Tab. 6.1 Přehled základních charakteristik nanovláken [39]

Průměr vláken menší než 1µm
Volitelný rozměr mezi 0,075 µm a 0,250 µm
Větší rozměr také dostupný
Velký měrný povrch a vysoká porozita
Vysoká porozita – 60-90%
Velikost pórů mezi 0.1 µm a 3 µm
Úzký rozptyl velikosti pórů
Měrný povrch 10-100 m ² /g
Efektivita a optimalizace proudění vzduchu
Integrace s mnoha různými typy substrátů
Dostupnost vysoce prodyšných kompozitů s vysokou filtrační účinností
Široký výběr materiálů
Široké spektrum známých polymerů a jejich směsí
Schopnost včlenit aditiva do nanovlákněné struktury

K hodnocení nanovlákněných vrstev se využívá tzv. faktor kvality Q , který vyjadřuje poměr mezi průnikem částic a tlakovou ztrátou. Vysoká hodnota Q , představuje vyšší kvalitu nanofiltrů. U většiny nanofiltrů je možné se setkat s vysokou kvalitou. To je dáno tím, že nanofiltrů mají velmi nízký průnik částic, takže mají vysokou účinnost a větší tlakovou ztrátu, ale při porovnání účinnosti a tlakové ztráty rychleji roste účinnost, než činí nárůst tlakové ztráty. [40],[41]

Celkově se filtrační teorie obecně opírá o předpoklad, že kolem vlákna je nepřetržitě proudění a takzvaný neklouzavý stav, kdy ve skutečnosti u nanovláken dochází na povrchu ke skluzu, který ovlivňuje účinnost zachytu. Ke zhodnocení skluzu se využívá Knudsenovo kritérium. Knudsenovo číslo je vyjádřeno jako:

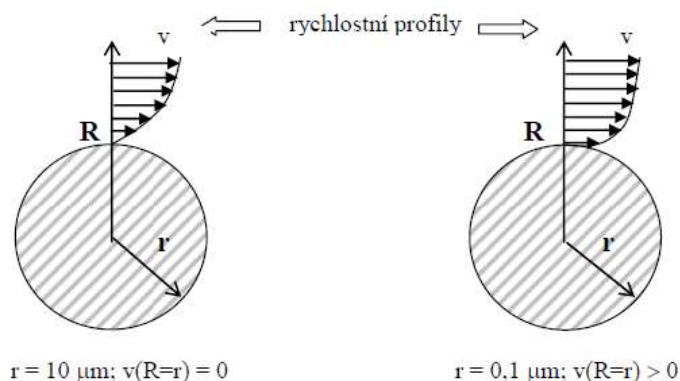
$$K_n = \frac{l}{r_f} \quad (16)$$

Kde: l – střední volná molekulová dráha nosného plynu [m]

r_f – poloměr filtračního vlákna [m]

Skluz molekul plynu u filtrace s nanovláknou má zcela odlišný skluz oproti filtraci bez nanovláken. Se skluzem u filtrace s nanovláknou se musí počítat při hodnotě Knudsenova čísla větší než 0,25, tomu odpovídají vlákna o průměru menší než 528 nm. Lze říct, že hodnota Knudsenova čísla by měla být vždy menší, než 0,5. [40],[41]

Třecí síla se vlivem skluzu plynu snižuje, to má za následek, že tlaková ztráta je menší, než v případě průtoku plynu bez skluzu. Díky skluzu se také zvyšuje odlučivost v oblasti záchytu velmi malých částic o velikostech menších než $1\ \mu\text{m}$, protože se částice dostávají blíže k vláknům a dochází tak k zintenzivnění odlučování. Na obrázku 6.3 je zobrazení skluzu obtékajícího plynu na povrchu vlákna pro běžné vlákno a nanovlákno. [41],[42]



Obr. 6.3 - Zobrazení skluzu obtékajícího plynu na povrchu vlákna pro běžné vlákno a nanovlákno. [31]

Pro výrobu nanovláken je velké množství polymerů netečných. Povrch nanovláken lze však upravit tak, aby bylo dosaženo zlepšení některých funkcí při filtraci. Mezi povrchové úpravy patří například fyzikální povlakování, plazmové zpracování, chemické modifikace využívající mokrou úpravu, povrchová růstová polymerizace. [42]

6.2. Výroba nanovláken

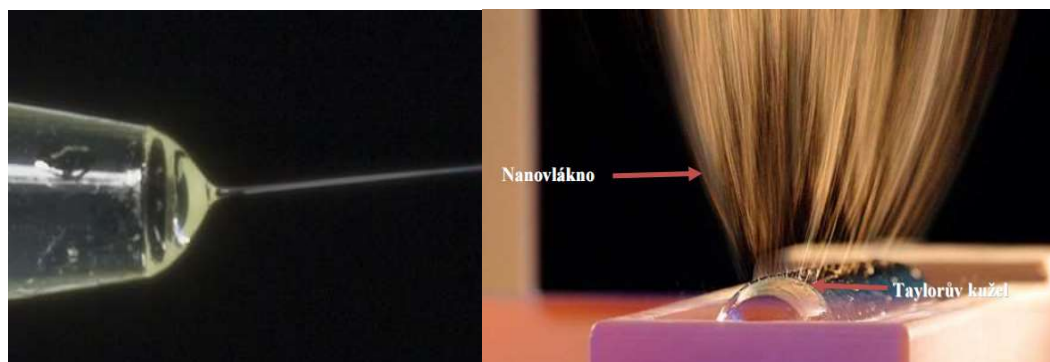
Výroba nanovláken probíhá několika způsoby. Nejrozšířenější a nejpoužívanější je elektrické zvlákňování, naopak méně rozšířený způsob výroby je zvlákňování z taveniny. Dalšími možnostmi jsou drawing (tažení), template synthesis (použití šablon), phase separation (fázová separace). Tyto metody jsou známé řadu let, ale žádná z těchto metod se téměř nepoužívá, protože tyto metody nemají potřebnou výrobní kapacitu a nejsou vhodné pro průmyslovou výrobu. [43]

6.2.1. Elektrické zvlákňování

Elektrické zvlákňování neboli electrospinning je znám již od počátku 20. století. Tento způsob výroby je připisován Antonu Formhalsovi, který objevil přístroj na výrobu vláken. Principem je využití účinku elektrostatického pole o vysoké intenzitě (elektrostatické = využití stejnosměrného zdroje vysokého napětí) na elektricky nabitě viskoelastické kapaliny (polymerní roztok nebo polymerní tavenina), kde za příznivých podmínek dochází k vytvoření tenkých vláken. [43],[44]

Při elektrickém zvlákňování je využíváno polymerních roztoků. Roztok je v dávkovacím zařízení a je pomalu vytlačován z elektrody, jenž má tvar kapiláry. Polymerní roztok protéká skrz kapiláru vlivem elektrostatického pole, které je

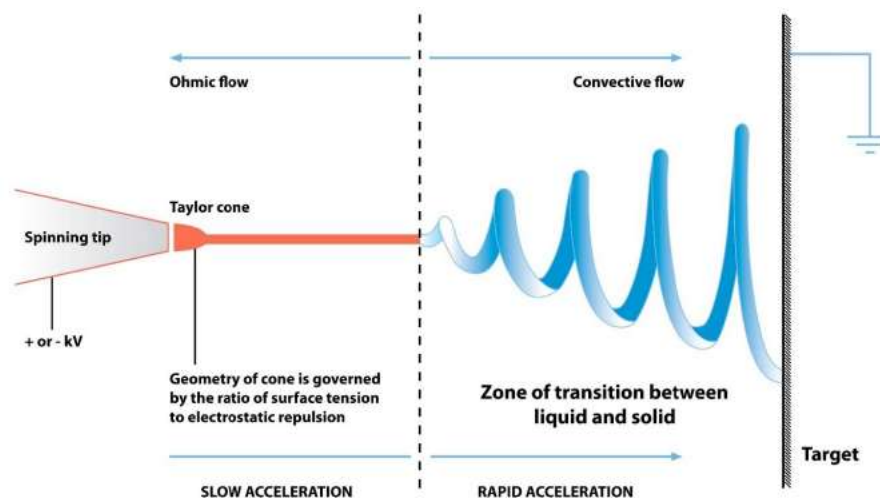
homogenní, ale může být i nehomogenní. Intenzita elektrostatického pole je vyšší, čím menší je poloměr křivosti elektrody. Na polymerní roztok umístěný na špičce elektrody působí mnohem větší síla než na jiném místě elektrostatického pole. Vlivem této síly dochází k deformaci plošky hladiny roztoku. Tato vzniklá špička je stahována k opačné elektrodě a s sebou strhává další polymerní roztok. Tomuto útvaru se říká Taylorův kužel, obr. 6.4. Taylorův kužel je mikroskopický prostorový útvar, který je výslednicí Coulombovských, viskozitních a odstředivých sil na povrchu trysky. [43],[44],[45]



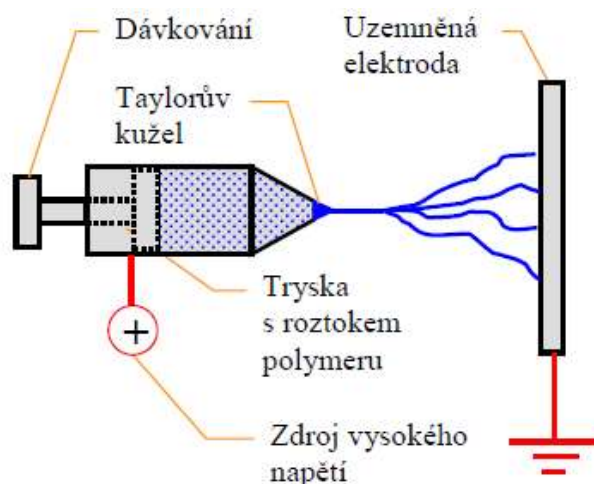
Obr. 6.4 - Taylorův kužel [43]

Polymerní roztok je vytlačován směrem k druhé elektrodě (sběrač) a dochází tak k rozštěpení na jemná vlákna. Vlákna ještě před dopadem na opačnou stranu jsou vysušena díky jejich velkému měrnému povrchu. Částice, které jsou nabitý stejně, mají na sebe odpuzující účinek. Tento účinek může být větší, než síla vazeb mezi makromolekulami. Makromolekuly jsou orientovány ve směru vláknenného útvaru, takže může dojít za určitých podmínek ke štěpení vlákna. [43],[44],[45]

Schéma principu elektrického zvlákňování je na obrázku 6.5, kde je proces rozdělen na dvě části, na část pomalé akcelerace a na část rychlé akcelerace. Oblast pomalé akcelerace je v rozsahu od Taylorova kužele do oblasti, kde tekutá část polymerního roztoku přechází na tuhou formu. [43],[45]



Obr. 6.5 Zvlákňovací metoda [51]



Obr. 6.6 - Princip elektrického zvlákňování [31]

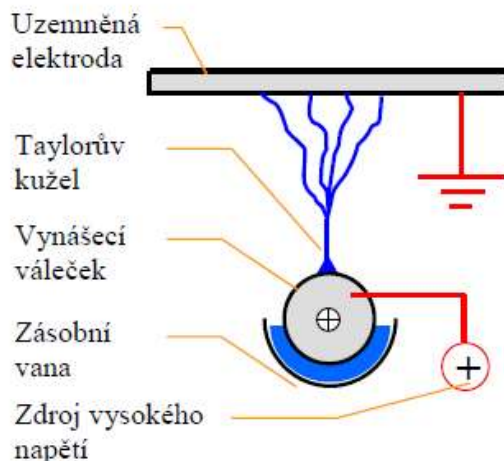
Je důležité si uvědomit, že tvar elektrod představuje základní parametr ovlivňující tvorbu nanovláken. Obě elektrody mohou nabývat různých podob. Stejně tak i parametry zvlákňované kapaliny mohou mít různé vlastnosti, například i elektrickou vodivost, viskozitu, povrchové napětí atd. Při elektrickém zvlákňování dosahují průměry vláken od desítek nanometrů až po jednotky mikrometrů. [43],[44]

Nevýhodou této metody je velmi malá produktivita, za jednu hodinu dokáže vyrobit 0,1 až 1 gram vláken. Další velkou nevýhodou je, že se nedá při výrobě docílit stálé tloušťky vlákna. Tyto nedostatky lze vyřešit modifikací zařízení, například namontováním otáčivého kolektoru. [43],[44]

Nejpoužívanější a nejproduktivnější modifikací elektrického zvlákňování je metoda Nanospider. Tato modifikace pracuje s výkonem od 1 – 5 g/min (pracovní šíře), což je oproti předchozí metodě výrazný pokrok. Princip metody Nanospider je na obrázku 6.7. Zařízení Nanospider bylo vyvinuto na Technické univerzitě v Liberci. [43],[39]

Tato technologie nepracuje s kapilárou nebo s tryskami pro výrobu vláken, ale pracuje s válečkem (jedna z elektrod) částečně ponořeným do polymerního roztoku. Tento váleček se otáčí kolem své osy a na povrchu se vytváří tenká vrstva roztoku. Vytvořená vrstva roztoku na válečku je blíž k opačné elektrodě a vlivem intenzity elektrického pole dochází k vytvoření několika Taylorových kuželů. A stejně jako u předchozí metody dochází k procesu zvlákňování. Vzniklá vlákna se odvíjejí na pás nebo na podkladovou textilií. [43],[39]

Důležité parametry u metody Nanospider jsou: geometrie elektrod, vzdálenost elektrod, rozmístění elektrod, tvar elektrod, napětí nastavená na elektrodách, rychlost a směr otáčení válečku, rychlost proudění vzduchu, rychlost podkladové textilie, vlastnosti polymerního roztoku a elektrické vlastnosti polymerního roztoku. [43],[39]

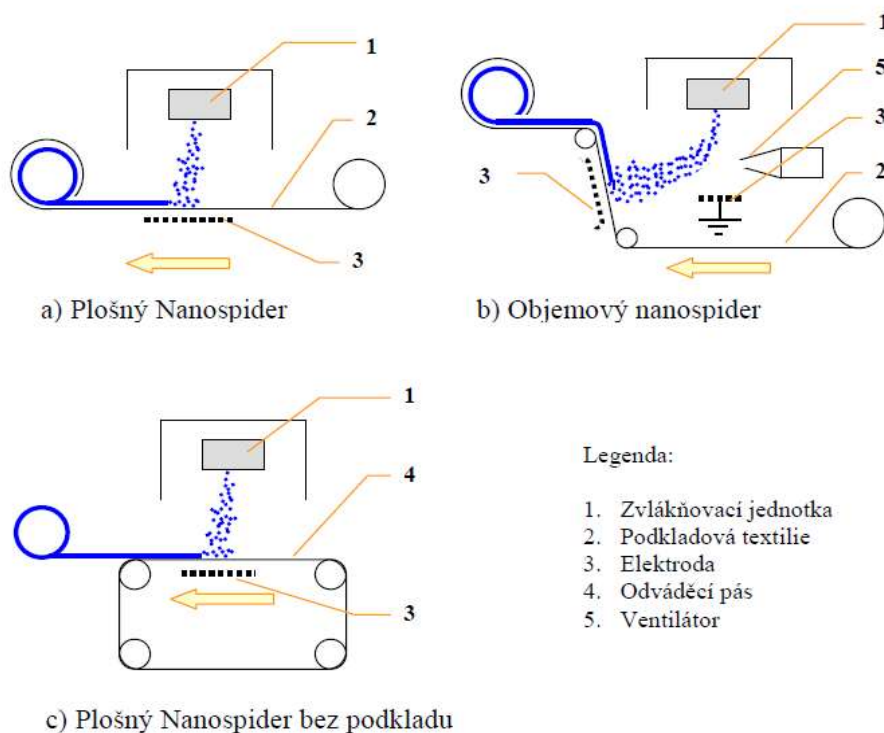


Obr. 6.7 - Princip modifikace Nanospider [31]

Metoda Nanospider má tři technologické varianty:

- Plošný Nanospider
- Objemový Nanospider
- Plošný Nanospider bez podkladu

Všechny tři technologické varianty jsou na obrázku 6.8, kde je vidět, že u plošného Nanospideru jsou nanovláknna ukládána na podkladovou textilii posunovanou po plošné elektrodě. U objemového Nanospideru nedopadají nanovláknna na elektrodu, ale jsou zachycena proudem vzduchu a dopadají na elektrodu třetí. U poslední metody plošného Nanospideru bez podkladu nanovláknna dopadají na odváděcí pás. [43],[39]



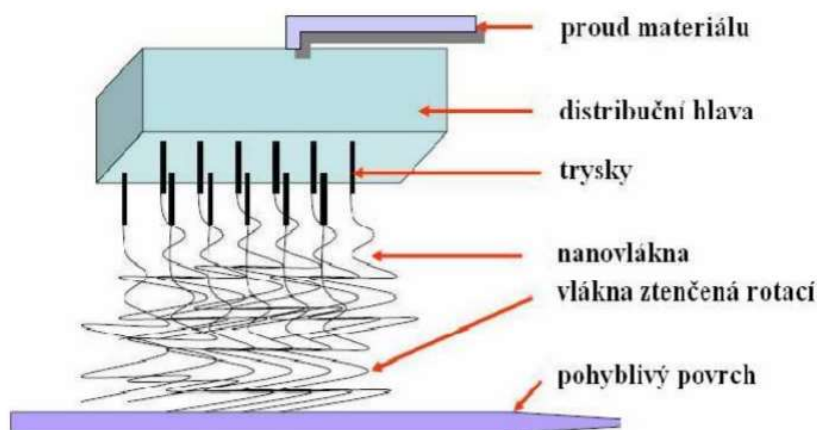
Obr. 6.8 - Technologické varianty Nanospider [43]

Velkou výhodou této modifikace je značný posun k zvětšení výrobní kapacity se stálou kvalitou nanovláknenné vrstvy. Umožňuje tvorbu organických a anorganických nanovláken. Další značnou výhodou je jednoduchá údržba a efektivní výroba. [31],[43],[39]



Obr. 6.9 - Zařízení Nanospider [39]

Další rozšířenou modifikací je elektrohydrodynamický spinning. Toto zařízení obsahuje 100 až 400 trysek na 0,093 m², takže u této metody dochází k výrobě nanovláken vysokou rychlostí. Vlákna jsou nanášena na kov, sklo, folii, papír, dřevo nebo na jakýkoliv jiný pevný či ohebný povrch. [43]

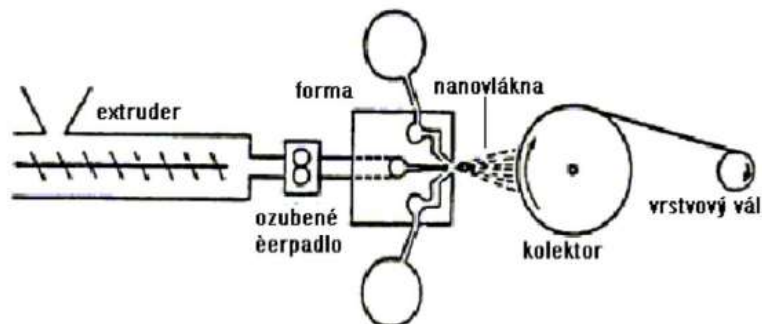


Obr. 6.10 - Schéma elektrohydrodynamického spinningu [43]

6.2.2. Foukání z taveniny

Foukání z taveniny neboli meltblowing slouží pro výrobu nanovláken o průměrech až 0,1 μm. Principem této metody je, že tavenina polymeru je přiváděna do trysky několika otvory spolu s ohřátým a stlačeným vzduchem. Po vytlačení z trysky je tavenina unášena proudem vzduchu a vlivem horkého vzduchu jsou roztavená vlákna zeslabována na konečný průměr. U této metody

jsou vlastnosti vláken závislé nejen na konstrukčních vlastnostech, jako je například tvar trysek, ale také na parametrech proudícího vzduchu. Velkou výhodou je, že oproti jiným způsobům zvlákňování je tato metoda nejlevnější. Naopak nevýhodou je nerovnoměrnost tvorby nanovláken. [43]



Obr. 6.11 - Princip Meltblowing [43]

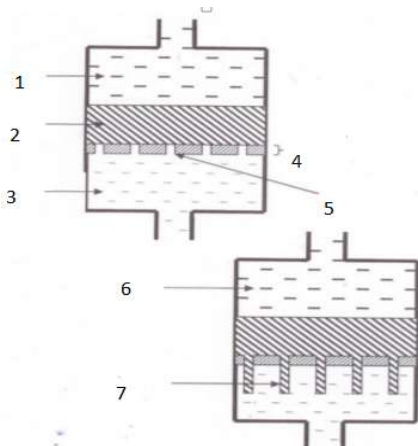
Méně používaná modifikace meltblowingu je electroblowing. U této metody je vlákno taženo působením elektrostatického pole s proudem plynu.

6.2.3. Dloužení

Při této metodě se používá dlužící stroj. Principem dlužení neboli drawingu je, že k povrchu kapky roztoku nebo taveniny je přiložena kapilára, která je na pevné podložce. A protože se kapilára konstantní rychlostí odtahuje, tak vzniká mezi kapkou a kapilárou vlákno. Toto vlákno může být prodlužováno do značné délky při zvýšené teplotě. U této metody nelze zajistit konstantní tloušťku, což je velká nevýhoda, takže se nedá použít pro větší výrobu, ale pouze pro jednotlivá vlákna. [43]

6.2.4. Použití šablon

U metody použití šablon (Template Synthesis) se využívá přesných vzorovacích matic nebo šablon za účelem dosažení přesných nanostruktur. Tyto šablony mají velmi malé otvory, kterými je protlačován roztok polymeru. Vznikají tak vlákna, která mají průměr odpovídající formě. Této metody se zatím využívá pouze laboratorně. [43]



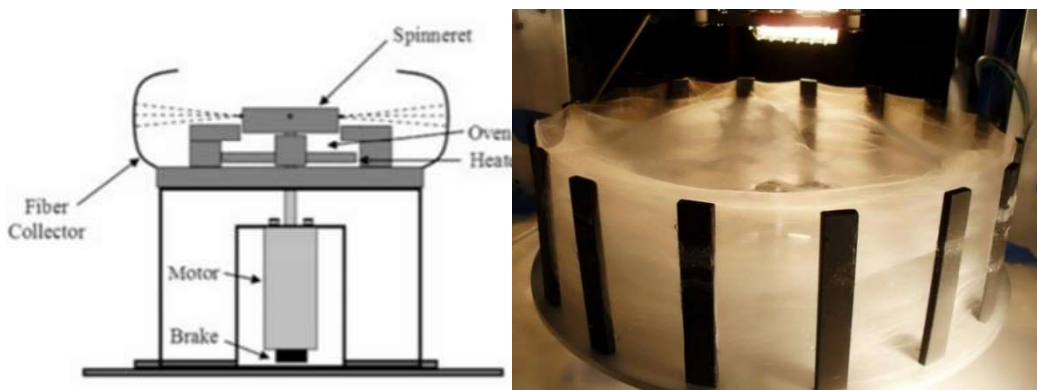
Obr. 6.12 - Schéma template synthesis (1-voda, 2-roztok polymeru, 3-tuhnutí, 4-membrána oxidu uhelného, 5-nanopory, 6-stlačená voda, 7- extrakt nanovláken [43]

6.2.5. Fázová separace

Další metodou je fázová separace (Phase Separation), která využívá fyzikálně odlišných fází. Nejprve se připraví fáze, která je homogenní a sníží teplotu polymeru na stav, kdy je struktura gelová. Poté se odstraní a nahradí původní rozpouštědlo z gelu novým s jinými vlastnostmi. Při tomto procesu dojde k vytvoření vláknité nanoporézní struktury. Materiál je poté ochlazen na teplotu tuhnutí druhého rozpouštědla pomocí metody mrazového sušení. Nevýhodami této metody je nemožnost řízení rozměrů nanovláken, použití pouze pro některé polymery a pouze pro laboratorní účely. [43]

6.2.6. Forcespinning

Forcespinning je nová technologie zvláknování, která využívá odstředivou sílu na rozdíl od elektrostatické síly, kterou využívají předchozí metody. Hlavní výhodou této metody jsou malé finanční náklady oproti elektrospinningu, jelikož se při výrobě téměř nepoužívá rozpouštědlo a není potřeba tolik elektrické energie. Další výhodou je menší množství parametrů, které mohou ovlivnit výsledný produkt. Schéma této technologie je na obrázku číslo 6.5, kde hlavními součástmi jsou zvláknovací tryska, motor, brzda, zvláknovací trychtýř a vláknový sběrač. [46]



Obr. 6.13 - Schéma a ukázka technologie Forcespinning [43]

Materiály pro výrobu nanovláken jsou ve formě roztoků nebo granulí pevných látek, které se roztaví ve zvláknovací trysce a pomocí odstředivé síly se vytvoří nanovláknina a ty se dále zachytávají na kolektoru. [46]

6.3. Materiály pro výrobu nanovláken

Materiály pro výrobu nanovláken lze rozdělit do dvou oblastí, které lze současnými technologiemi zvláknit. Jsou to materiály organické a anorganické. Do organických materiálů patří například: polyuretan (PUR), polyakrylonitril (PAN), polyvinylpyrrolidon (PVP), polyamidimid (PAI), polyvinylalkohol (PVA). Z anorganických jsou to například: oxid titaničitý (TiO_2), oxid hlinitý (Al_2O_3), oxid křemičitý (SiO_2), oxid zirkoničitý (ZrO_2). Anorganická nanovláknina jsou zvláštním typem materiálů vyrobených následnou kalcinací nanovláken z

polymerů nebo organokovových prekurzorů. Výsledné anorganické nanovláknno je tvořeno anorganickými látkami s nepatrným množstvím polymerních organických nečistot.[43],[47]

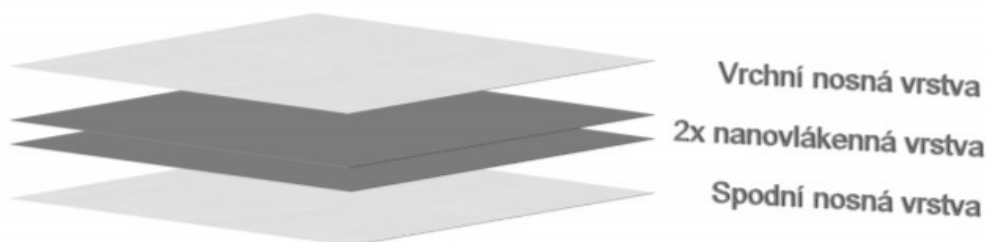
Materiály pro výrobu nanovláken mohou být teoreticky všechny typy kondenzovaných látek, kapalin, roztoků, polymerních látek, skel, keramiky, iontových látek, kovů a gelů. Ale jejich zvláknování není snadné, protože jsou vázány různými molekulovými a atomovými silami, které jsou podstatné pro tvorbu nanovláken. Proto se volí jednodušší řešení pro tvorbu nanovláken a to zvláknování vláknotvorných materiálů, které jsou uvedeny v předchozím odstavci. Polymery se staly prvním materiálem pro tvorbu nanovláken pomocí metody elektrostatického zvláknování. V současnosti je doloženo ke zvláknění více jak 50 druhů polymerů.[43]

6.4. Využití nanovláken ve filtraci

V posledních letech se upravené nanofiltrý staly konkurence schopné proti filtrům s běžnými vlákny. Využití nanovláken jako filtračního média umožnilo novou úroveň výkonu filtrace vzduchu a to díky jedinečným vlastnostem nanovláken jako jsou: malý průměr vlákna, vysoký měrný povrch, vysoká porozita a malá velikost pórů. Nanofiltr by se dal teoreticky využít všude, kde se běžně využívají jiné filtry.

Filtry s nanovláknny se využívají převážně v atmosférické filtraci. Naopak v průmyslové filtraci nemají tak velké využití, protože se oproti filtraci atmosférické pracuje s náročnými provozními podmínkami a nanovláknna většinou nevydrží a trhají se. [31]

Ve filtraci s nanovláknny je filtr obvykle používán ve formě vícevrstvého filtračního materiálu s podkladovým substrátem, kdy větší počet nanovlákných vrstev zlepšuje vlastnosti filtrační vrstvy. Na obrázku 6.14 je ukázka skladby běžné nanotextilie ve filtraci, kde nosné vrstvy jsou tkané nebo netkané textilie. Tyto nosné vrstvy se využívají proto, aby se chránila vrstva nanovláken a nebyla tak narušená celistvost a mechanické vlastnosti nanotextilie. Ale čím více podkladových vrstev, tím je větší tlaková ztráta. Naopak čím větší je obsah nanovláken a menší obsah podkladových vrstev, tím je tlaková ztráta menší.[31],[43]



Obr. 6.14 - Skladba nanotextilie [43]

6.4.1. Použití nanovláken v atmosférické filtraci

Využití nanovláken ve filtraci vzduchu našlo široké uplatnění, protože malé průměry nanovláken vytvářejí větší plochu povrchu, což vede k vyšší filtrační účinnosti. Pro vzduchovou filtraci se využívají nanovlákná o plošné hmotnosti okolo $0,01 \text{ g/m}^2$. [31]

Nanovlákná ve srovnání s vlákny větších průměrů poskytují lepší účinnost filtru. Dnešní výrobní technologie zvlákňování dovolují volit hustotu nanovláken v závislosti na potřebě užití. To má za výsledek, že se může vyrobit textilie o potřebné gramáži nanovláken na m^2 a částečně ovlivnit účinnost.

V rámci práce [31] byl proveden test čtyř různých vícevrstvých filtračních materiálů s nanovláknem, přičemž byl otestován i jeden vzorek bez nanovláken. Vrstvy byly ve složení spunbond/nanovlákná/meltblown (zkráceně SNM) v různých kombinacích. Spunbond (technologie výroby netkané textilie) sloužila jako nosná vrstva a meltblown (výroba nanovláknenné vrstvy za pomoci rozfukování taveniny horkým vzduchem) jako předfiltr. Filtrovaným médiem byl aerosol NaCl.

Test filtračních vlastností pomocí aerosolu byl proveden na vrstvě spunbond/meltblown (zkráceně SM) bez nanovláken, na ploché vrstvě (SNM), na skládané vrstvě (SNM) a na skládané elektrizované vrstvě, což je technika elektrizace skládaného filtru pomocí koronového nabíjení (SNM). Parametry skládání byly: hustota skladů 120 m^{-1} , tloušťka filtru 20 mm. Plošná hmotnost spunbondové vrstvy byla 17 g/m^2 , meltblownové vrstvy 30 g/m^2 a nanovláknenné vrstvy $0,6 \text{ g/m}^2$. [31]

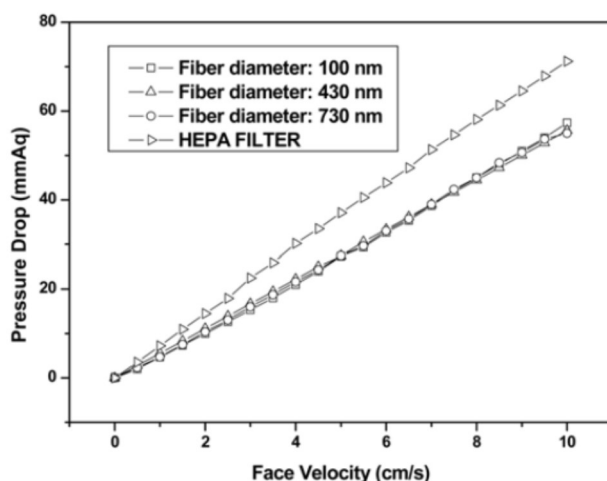


Obr. 6.15 - Vlastnosti filtru spunbond/meltblown bez nanovláken, s nanovláknem, skládaných vrstev s nanovláknem a skládaných elektrizovaných vrstev s nanovláknem [31]

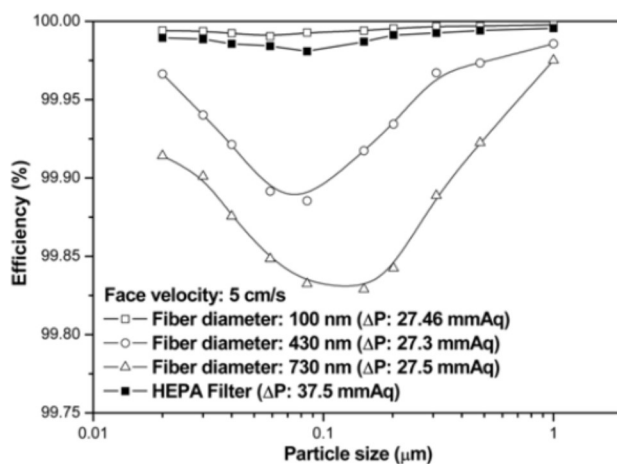
Z obrázku 6.15 je vidět, že při použití vrstvy z nanovláken došlo k velkému nárůstu účinnosti a při nabití vlákně vrstvy bylo dosaženo ještě vyšší účinnosti při zachování stejné tlakové ztráty. Dále je vidět, že u skládaných filtrů docházelo ke snížení tlakové ztráty.[31]

Filtrace s nanovláknou má vysoký potenciál uplatnění v čistých prostorech a v nemocnicích. To vyplývá ze studie [53], která zkoumá frakční průnik částic v závislosti na velikosti částice při dané rychlosti (5 cm/s) a kde bylo zjištěno, že pro filtraci s nanovláknou Nylon 6 (vlákna vyrobená elektrospinnigem v rozsahu průměrů od 10 nm do 730 nm) byla celková účinnost odlučování až 99,993 %. O tom jaká podkladová vrstva byla použita, se tato studie nezmiňuje. V porovnání s HEPA filtry používanými pro vysoce účinnou filtraci tak filtry s nanovláknou Nylon 6 dosahují vyšší účinnosti.

Dále bylo zjištěno při zkoumání vlivu filtrační rychlosti na tlakovou ztrátu, že mají filtry s materiálem Nylon 6 nižší tlakovou ztrátu než HEPA filtry. Na obrázku 6.17 je graf, kde je vidět porovnání různých průměrů nanovláken s HEPA filtrem z hlediska tlakové ztráty. [53]



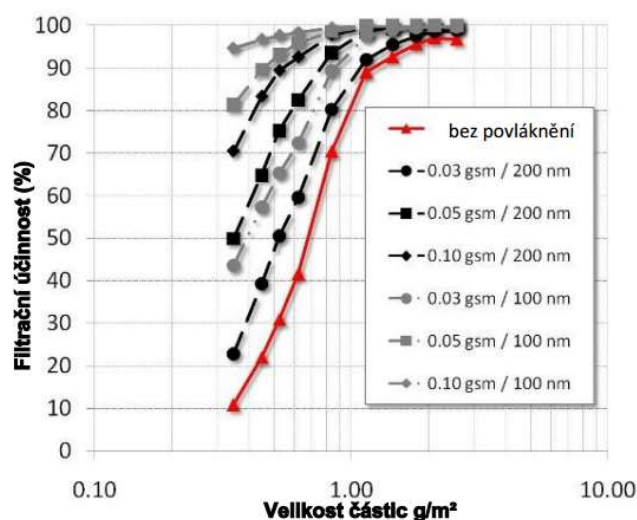
Obr. 6.16 - Tlaková ztráta jako funkce čelní rychlosti. Porovnání různých průměrů nanovláken s HEPA filtrem. [53]



Obr. 6.17 - Účinnost filtrace materiálu Nylon 6 s nanovláknou v porovnání s HEPA filtrem. [53]

Z obou testů vyplývá důležitý fakt, kdy při odlučování za použití nanovláknenné vrstvy dochází ke zvýšení celkové odlučivosti oproti běžným vláknům. Dále z testů vyplývá, že pro zvýšení efektivity nanovláken stačí malé množství vláken, proto je využití nanovláken výhodné i z hlediska ekonomického. S přidáním více filtračních nanovláknenných vrstev dochází ke zvýšení tlakové ztráty. Což je vidět na obrázku 6.18, kde je znázorněn graf, který ukazuje filtrační účinnost atmosférické filtrace v závislosti na plošné hmotnosti filtrační vrstvy (gsm znamená gram na metr čtvereční - grams/square meter).

Takže lze na základě z obou výsledků říct, že nanovláknna mohou v kombinaci s jinými filtračními materiály přispět k přípravě filtrů. Dále lze říct, že významný nárůst účinnosti filtrace pro částice nejvíce pronikající filtrem v rozsahu velikostí 0,1 až 0,5 μm je doprovázen pouze slabým nárůstem tlakové ztráty. [31], [53]

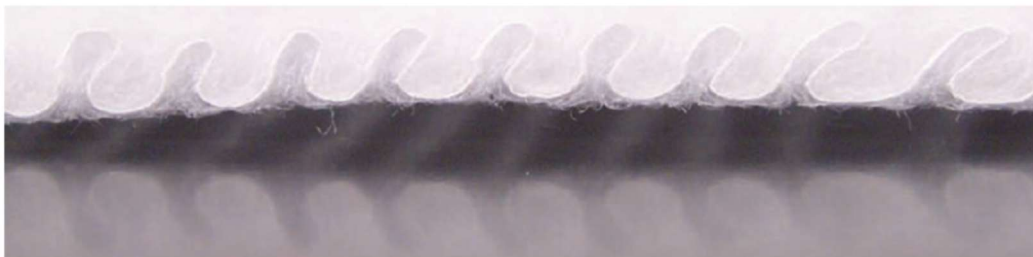


Obr. 6.18 - Účinnost nanotextilie [31]

V současné době je řada firem, které se zabývají výrobou filtračních materiálů s nanovláknny pro filtrace atmosférického vzduchu. Například firma Elmarco, která vyniká díky unikátním vlastnostem u nanofiltrů, jako jsou například malý průměr vláken, vysoká specifická plocha, malá velikost pórů a vysoká poréznost. Pro tyto vlastnosti je lze využít u vysoce účinné filtrace HVAC a u HEPA filtrů. [39]

Další větší společnost, která se zabývá atmosférickou filtraceí je firma Hollingsworth and Vose. Patentovaná technologie na filtrační média s použitím nanovláknenné vrstvy firmy Hollingsworth and Vose se nazývá Nanoweb. Technologie Nanoweb využívá netkaný podklad pro nanovláknenné medium. [54]

Dalším produktem firmy Hollingsworth and Vose je filtr NanoWave. Jedná se o filtr vyrobený ze syntetických vláken. Tento vícevrstvý nanofiltr, který je složen z vrstvy hrubých vláken a vrstvy nanovláken, poskytuje až 2,5 násobnou filtrační plochu oproti běžným filtrům a až trojnásobnou kapacitu záchytu při nízké ztrátě. Filtr NanoWave je označen jako zelený produkt, to znamená, že může být energeticky spálen. [54],[55]



Obr. 6.19 - Filtr NanoWave v řezu. [55]

V [56] je představen nový materiál tvořený z nylonových nanovláken o průměru menším než 15 nm. Váha je minimální - 10 – 20 mg/m² a je prakticky neviditelný. Výhodou tohoto nového materiálu je, že klade procházejícímu vzduchu minimální odpor a přitom nepropouští částice větší než 1 μm. Při testování tohoto materiálu zachycoval filtr částice větší než 0,2 až 0,3 μm. [56]

Výroba tohoto ultralehkého materiálu má ještě jednu speciální vlastnost. A to je zacelování děr v síti nanovláken. To znamená, že "díry" ve vrstvě přitahují jiná vlákna a vzniká tak vrstva s rovnoměrně rozloženými vlákny bez větších děr. Vznikají tak membrány s kalibrovanými dírami. Z tohoto vyplývá, že tento materiál má určitě potenciál do budoucna v oblasti nanofiltrů. [56]

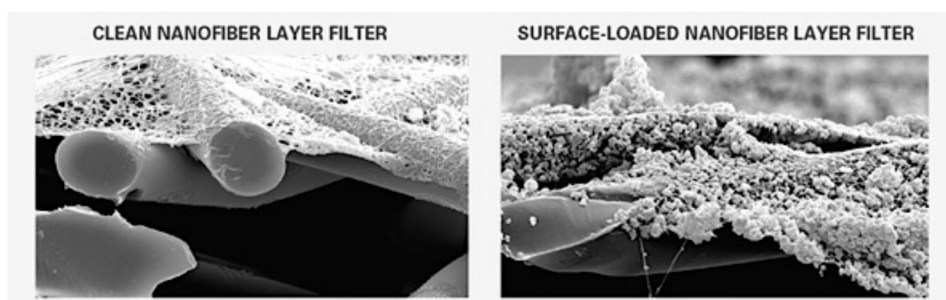
V práci [57], je představen nový typ vzduchového filtru. Díky lepším filtračním vlastnostem filtračního materiálu mohou mít filtry menší tloušťku a nacházejí tak využití v oknech. Na rozdíl od běžných filtrů, které jsou husté a blokují tak průchod světla, tak tento filtr umožňuje průchod světla a má rovněž asi 2,5 krát větší sluneční propustnost oproti běžným filtrům. Tyto filtry jsou vhodné k použití do oken a rámu, kde světlo a vzduch mohou normálně projít, zatímco nežádoucí částice a smog obecně se filtruje. [57]

6.4.2. Použití nanovláken v průmyslové filtraci

Použití nanovláken v průmyslové filtraci není tak rozšířené jako ve filtraci atmosférického vzduchu, jelikož nanovláknata jsou velmi citlivá na mechanické zatížení. Hlavní důvod je v tom, že u filtrace průmyslové dochází k regeneraci a díky tomu může dojít k porušení nanovláken nebo k výraznému zmenšení životnosti. Zároveň se zde pracuje s daleko většími teplotami a koncentracemi částic v plynu. V současnosti využití v průmyslových filtrech nachází uplatnění v poměrně malém okruhu odvětví.

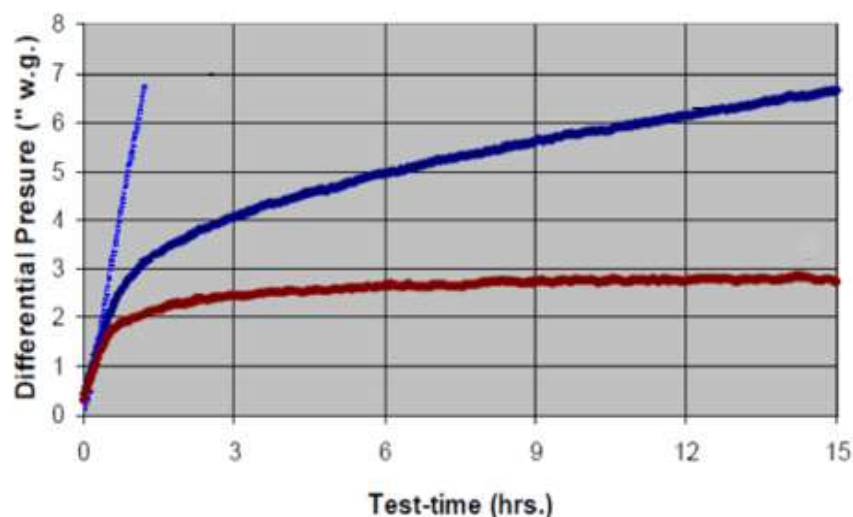
Mezi výhody v průmyslové filtraci při použití nanovláknenné vrstvy patří stejně jako v atmosférické filtraci nižší tlaková ztráta a vyšší účinnost odlučování. Výrobci uvádějí, že při vyšší účinnosti odlučování nanofiltrů je díky nanovrstvě daleko lepší regenerovatelnost oproti vrstvám bez nanovláken a z toho vyplývá delší životnost nanofiltru. Výrobci také uvádějí, že při regeneraci filtru zpětným proplachem nebo pulzní regenerací je díky menší tlakové ztrátě spotřeba stlačeného vzduchu menší a tím i spotřeba energie.

Na obrázku 6.20 je vidět čistá vrstva nanovláken a vrstva pokrytá prachem. Díky účinnějšímu zachytávání částic na povrchu vrstvy je snazší regenerovatelnost oproti běžným filtračním vrstvám. [53]



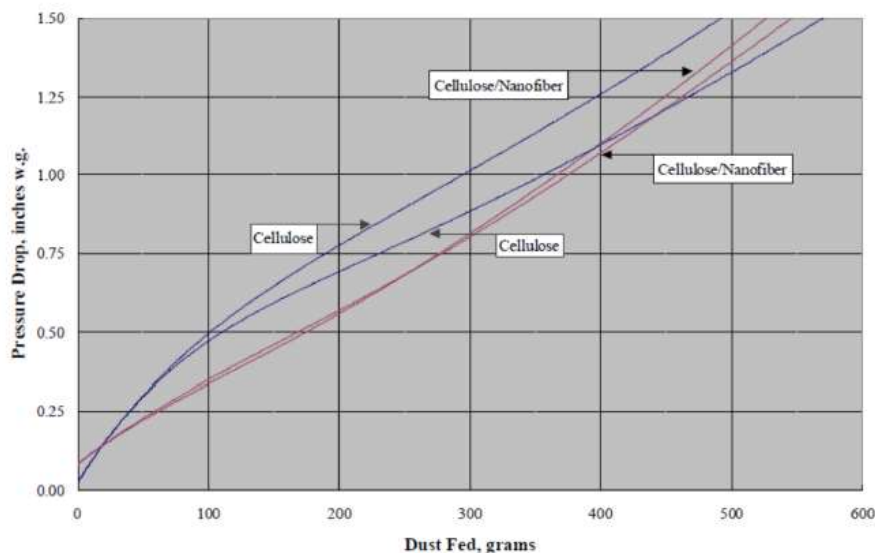
Obr. 6.20- Rozdíl mezi čistou vrstvou z nanovláken a vrstvou nanovláken pokrytou jemným prachem.[53]

V práci [41] byl proveden test na využití nanofiltru v průmyslovém provozu. Jednalo se o test, kdy byl použit skládaný nanofiltr ve válcové patroně. Cílem bylo zjistit, zda lze použít tento filtr k pulzní regeneraci. K regeneraci docházelo každých 10 sekund a při tom byla sledována tlaková ztráta v průběhu filtrace. Naměřené výsledky byly porovnávány s celulózovým filtrem a celulózovým filtrem se syntetickou směsí. Grafické porovnání je na obrázku 6.21, kde je vidět že nanofiltr má nejmenší tlakovou ztrátu a naopak filtr z celulózy a syntetické směsi má největší tlakovou ztrátu.



Obr. 6.21 - Závislost tlakové ztráty se zanášením filtračního materiálu v čase z celulózy (světle modrá), z celulózy a syntetické směsi (tmavě modrá) a z celulózy a nanovláknů (červená) [41]

Dále v této práci [41] byl test, kde se zjišťovala účinnost nanofiltru spolu s podkladovým celulóзовým filtrem v porovnání s celulóзовým filtrem. Bylo zjištěno, že se zvýšila účinnost filtrace při použití nanofiltru a tlaková ztráta byla srovnatelná.

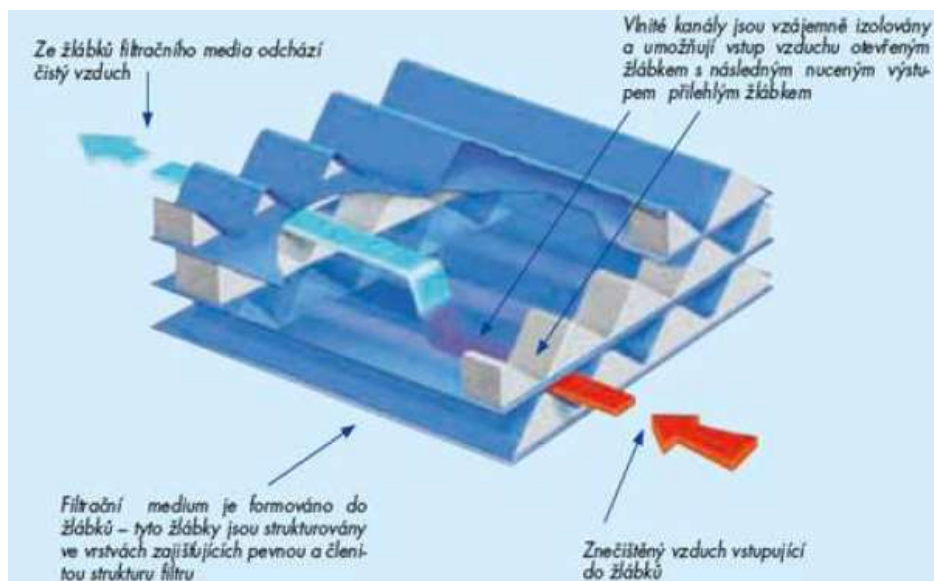


Obr. 6.22 - Funkce tlakové ztráty se zanášením filtračního materiálu z celulózy a z celulózy s nanovlákný s definovanou hmotností záchytu [41]

Přes výše zmíněné problémy při využití nanovláken v průmyslové filtraci existuje několik společností, které běžně nabízejí filtry s nanovlákný pro průmyslové aplikace. Například společnost Donaldson Company, která je na trhu více než 90 let a patří mezi největší firmy v oblasti průmyslové filtrace. Firma Donaldson využívá svou technologii filtr PowerCore, jedná o filtrační kazety, které se kombinují s patentovanou technologií nanovláken. [52]

Filtry PowerCore se kombinují s patentovanou technologií Ultra-Web. U této metody se nanášejí nanovlákná na konvenční medium a poskytuje tak trvalé řešení filtrace při vysokých teplotách a vlhkém prostředí. S využitím technologie Ultra-Web je dle údajů výrobce možné větší zatížení prachem na povrchu vrstvy než u konvenčních tkaninových filtrů s gramáží 540 g/m². Za těchto nepříznivých podmínek má tato technologie velkou účinnost 99,999 % pro odloučení částic o velikosti 0,5 mikronu. Porovnáním velikostí s běžnými odlučovači prachu mají filtry Donaldson, které využívají technologii PowerCore, až o 70 % menší velikost. [52]

Na obrázku 6.23 je vidět princip tohoto filtru. Filtry PowerCore se vyrábí v různých provedeních. Tyto filtry jsou stavěny na průtočné množství vzduchu do 34 000 m³/h. [52]



Obr. 6.23 - Princip filtru PowerCordu [52]

Firma Donaldson se také zabývá hadicovými filtry s technologií Fibra-Web. U nich inzeruje, že mají dlouhou životnost a vysokou odlučivost. Na obrázku 6.24 je tabulka, ve které je porovnání různých technologií a jejich odlučovacích schopností v závislosti na velikosti částic, ze které vyplývá, že technologie s využitím nanovláken od firmy Donaldson dokáží odlučovat submikronové částice. [52]

Filter Cartridge Performance Scale						
Micron Scale		0.1	1.0	10.0	100	1000
CAN BE SEEN BY:		SCANNING ELECTRON MICROSCOPE	OPTICAL MICROSCOPE	VISIBLE TO THE NAKED EYE		
Torit-Built Filter Efficiency	Ultra-Web'					
	Fibra-Web'					
	Torit-TEX'					
	Kevlar/Nomex					
	Thermo-Tek					
	Dryfilo					
Cellulox						

Obr. 6.24 - Porovnání různých technologií od firmy Donaldson [52].

6.5. Rizika nanotechnologií

Nanotechnologie přináší obrovský přínos, ale prozatím nejsou žádná doporučení ani legislativa, jak manipulovat s nanomateriály při jejich výrobě. Pro nanomateriály jako takové platí bezpečnostní předpisy jako pro klasické chemické látky, ale neberou v úvahu specifické vlastnosti nanomateriálů a jejich chování. Další problém je v tom, že nelze přesně určit, který nanomateriál je nebezpečný, protože hodně nanomateriálů je nebezpečných pouze za určitých podmínek. [48]

Různé společnosti se zabývají zdravotními riziky spojenými s výrobou nanovláken a nanočástic všeobecně. Došli k závěru, že nejčastějšími cestami, kterými může dojít k vniknutí nanočástic do lidského organismu je vdechnutím,

průchodem přes pokožku nebo sliznicemi. Jakmile se dostanou do krevního oběhu nanočástice mohou být transportovány do celého těla a mohou být přijaté orgánů a tkání, včetně mozku, srdce, jater, ledvin, sleziny, kostní dřeně a nervového systému. [48]

Nejpravděpodobnější a nejjednodušší cesta průniku nanočástic do organismu je vdechnutím. Nanočástice se vdechnutím dostávají do plic a do organismu obrovskou plochou a odtud se dostávají dále do organismu. [48]

Druhá nejčastější cesta průniku nanočástic do těla je kůží, to je asi 2 m² povrchu těla. Některé materiály používané v nanotechnologii, jako třeba oxid titaničitý, se používá v opalovacích krémech jako ochrana před UV zářením. Pokud není pokožka porušená, tak nepředstavuje nanosení krému na pokožku vážné riziko v porovnání s dýchacími cestami. Další možnost je příjem trávicím traktem (voda, jídlo, léky), odkud se mohou nanočástice dostat opět do jednotlivých orgánů. [48]

Obecně nanomateriály vyrobené lidskou činností, které jsou vyráběny cíleně nebo vznikají jako vedlejší produkt, představují největší riziko. Jedno z největších rizik představují uhlíkové saze. Dále to může být automobilová doprava, kde nanočástice nejvíce vznikají z dieselových motorů nebo při brždění. Nanomateriály se mohou uvolňovat do vzduchu nejen lidskou činností, ale i řadou přirozených procesů, jako je například vulkanická erupce, mořský příboj nebo písečná bouře. [48]

7. Matematický model

V této diplomové práci byl vytvořen jednoduchý matematický model pro stanovení frakční odlučivosti vláknité vrstvy a frakční účinnosti izolovaného vlákna. Model byl vytvořen na základě hlavních odlučovacích principů, mezi které patří intercepční, difúzní a setrvačný odlučovací princip. Čtvrtý člen dodatečné odlučivosti vznikající kombinací difúzního a intercepčního principu byl v tomto zjednodušeném modelu zanedbán. Celkový popis těchto principů je v kapitole 2. Veškeré výpočty, které byly použity u tohoto matematického modelu, jsou uloženy v příloženém CD.

Model byl vytvořen pro filtrační vrstvy, jejichž základní parametry spolu s vypočteným parametrem vrstvy λ jsou uvedeny v tabulce 7.1 a pro standardní podmínky vzduchu, které jsou vypsány v tabulce 7.2. Model byl vytvořen pro velikosti částic od 0,01 do 10 μm , které mají hustotu 1000 kg/m^3 a byla zvolena filtrační rychlost 2 cm/s . Filtrační vrstvy byly voleny pro porovnání poměrně dosti odlišné, přičemž nízká filtrační rychlost odpovídá jemné a vysoceúčinné filtraci. První filtrační vrstva představuje vrstvu pro vysoceúčinnou filtraci, zatímco třetí pro hrubou filtraci.

Tabulka 7.1 Filtrační vrstvy

Model	1	2	3	
ε	0,93	0,95	0,98	[-]
$d_{N,1}$	0,5	4	10	[μm]
s	1	0,8	5	[mm]
λ	192	22,15	6,43	[-]

Pro výpočet u jednotlivých odlučovacích principů hraje velkou roli charakter proudového pole v okolí vytknutého vlákna. Pro porovnání byla použita tato základní proudová pole: potencionální proudění, vazké obtékání izolovaného vlákna a vazké obtékání ovlivněné přítomností sousedních vláken a to za předpokladu, že vlákna mají tvar válce.

Tabulka 7.2 Vlastnosti vzduchu při standardních podmínkách vzduchu

T	η	ρ_{vzduchu}
$^{\circ}\text{C}$	Pa.s	kg/m^3
20	$18,15 \cdot 10^{-6}$	1,2

Většina teoretických řešení proudového pole v okolí vlákna vychází z idealizovaného popisu dvourozměrného popisu obtékání válce. Idealizované proudění lze popsat proudovou funkcí za použití kartézských nebo polárních souřadnic. K největší idealizaci dochází u potencionálního proudění, tedy u nevazkého a nevířivého. [1]

Ke skutečným podmínkám, které nastávají při obtékání vláken ve vláknité vrstvě se přibližuje vazké obtékání. U vlivu přítomnosti sousedních vláken na proudové pole v okolí vytknutého vlákna se nejčastěji používá řešení, že se vlákno nachází uvnitř tzv. proudové buňky, která má takový poloměr, že objem jednotkové délky vlákna k objemu buňky jednotkové délky je stejný, jako hodnota objemového zaplnění c u vláknité vrstvy. [1]

Pro výpočet **frakční odlučivosti** vláknité vrstvy byl použit následující vzorec:

$$E_f(a) = 1 - \exp(-E_{f,i}(a) \cdot \lambda)$$

U **difúzního** principu byly pro výpočet frakční odlučivosti použity tyto vztahy:

- Pro potenciální proudění dle Natasona:

$$E_{dif} = 4 \sqrt{\frac{2}{\pi}} Pe^{-\frac{1}{2}} \cong 3,19 Pe^{-\frac{1}{2}}$$

- Pro vazké Lambovo proudové pole dle Picha a pro oblast Re_d 0,001-1:

$$E_{dif} = 2,9(2 - \ln Re_d)^{-\frac{1}{3}} Pe^{-\frac{2}{3}}$$

- Pro Kuwabarovo proudové pole dle Daviese a pro oblast $Re_d < 0,5$:

$$E_{dif} = 5,2(1 - \varepsilon)^{\frac{1}{6}} Pe^{-\frac{2}{3}}$$

U **setrvačného** odlučovacího principu pro výpočet frakční odlučivosti byl použit tento vztah:

- Pro potenciální proudění dle Caie a pro oblast $Stk > 0,2$:

$$E_{setrv} = \frac{Stk^2}{(0,66 + Stk)^2}$$

- Pro vazké Lambovo proudové pole dle Sunedy a Leeho a pro oblast $Re_d < 100$:

$$E_{setrv} = \frac{1}{[1 + (1,53 - 0,231 \ln Re_d + 0,0167 \ln^2 Re_d)/Stk]^2}$$

- Pro Kuwabarovo proudové pole dle Sunedy a Leeho a pro oblast $Re_d < 100$:

$$E_{setrv} = \frac{1}{[1 + (1,53 - 0,231 \ln Re_d + 0,0167 \ln^2 Re_d)/Stk]^2}$$

U **intercepčního** vztahu byly pro výpočet frakční odlučivosti použity tyto vztahy:

- Pro potenciální proudění:

$$E_{int} = (1 + \alpha) - \frac{1}{1 + \alpha} = \alpha \frac{2 + \alpha}{1 + \alpha}$$

- Pro vazké Lambovo proudové pole a pro oblast $Re_d < 1$:

$$E_{int} = \frac{1}{2La} \left[2(1 + \alpha) \ln(1 + \alpha) - (1 + \alpha) + \frac{1}{1 + \alpha} \right]$$

- Pro Kuwabarovo proudové pole a pro oblast $Re_d < 1$:

$$E_{int} = \frac{1}{2Ku} \left[2(1 + \alpha) \ln(1 + \alpha) - (1 + \alpha)\varepsilon + \frac{1}{1 + \alpha} \frac{1 + \varepsilon}{2} - \frac{1 - \varepsilon}{2} (1 + \alpha)^3 \right]$$

U **kombinace difúzního a intercepčního** odlučovacího principu pro výpočet frakční odlučivosti by byl použit tento vztah:

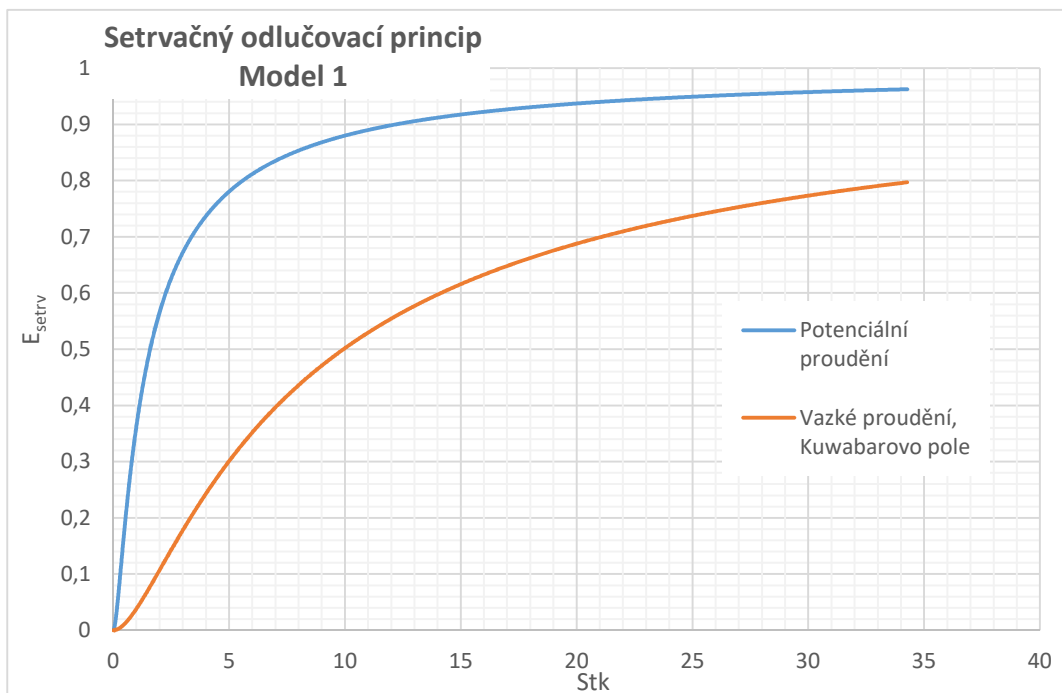
- Pro Kuwabarovo proudové pole:

$$E_{dod} = 1,24Ku^{-1/2}Pe^{-1/2}\alpha^{2/3}$$

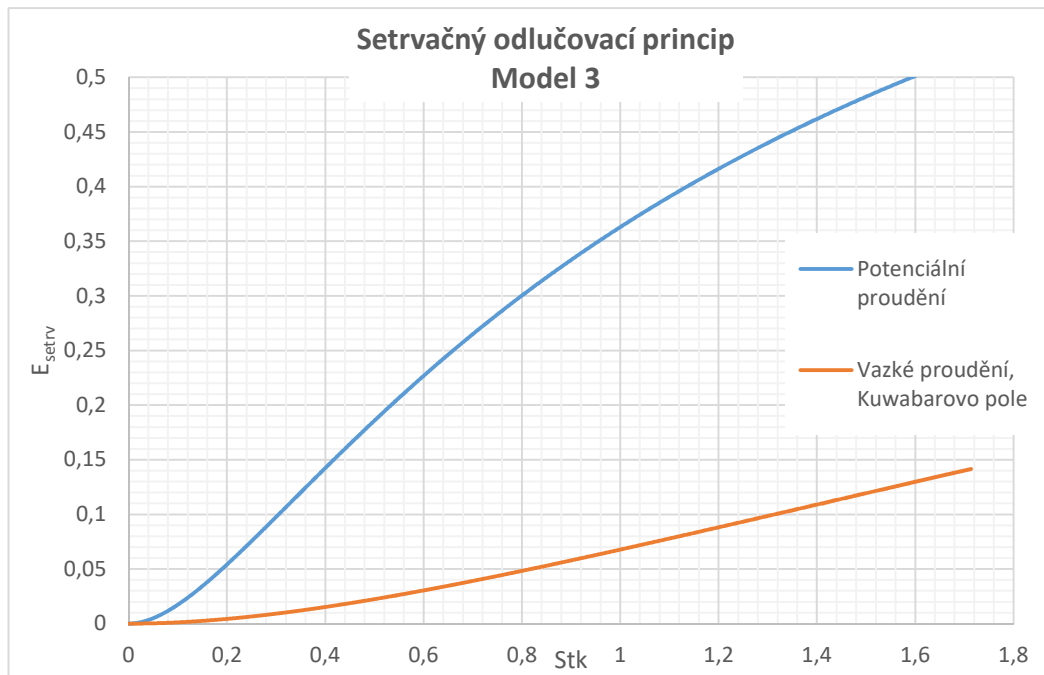
Dodatečný člen vznikající kombinací difúzního a intercepčního principu byl v tomto zjednodušeném modelu zanedbán

7.1. Vyhodnocení

Na obrázku 7.1 a 7.2 jsou grafy, které ukazují závislost účinnosti setrvačného odlučování na Stokesově čísle pro model 1 a model 3.

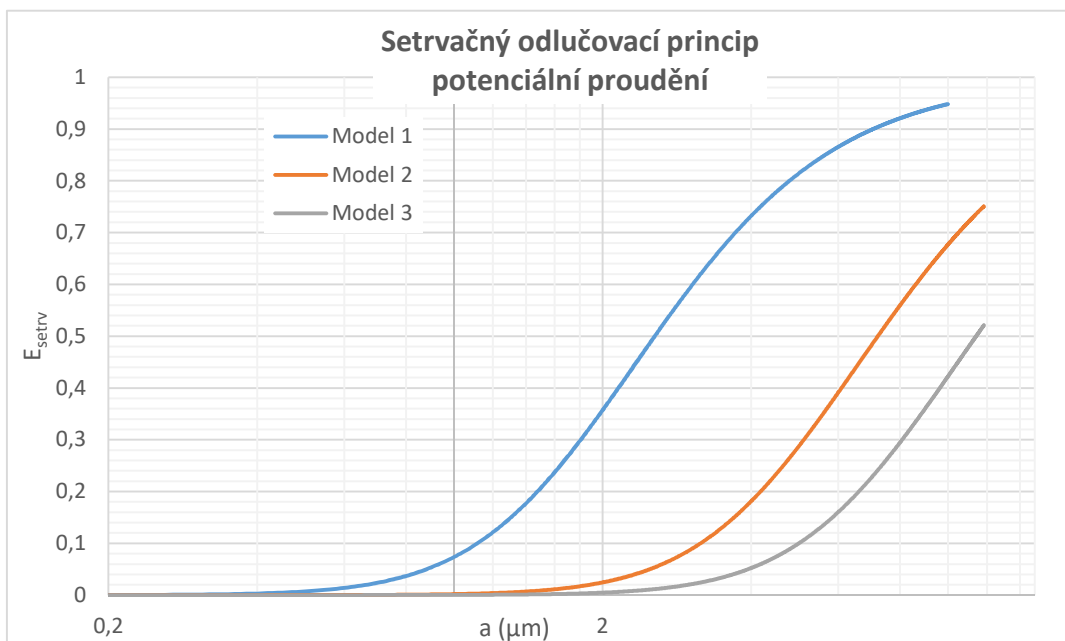


Obr. 7.1 - Setrvačný odlučovací princip pro potenciální a vazké proudění v závislosti na Stokesově čísle – Model 1.

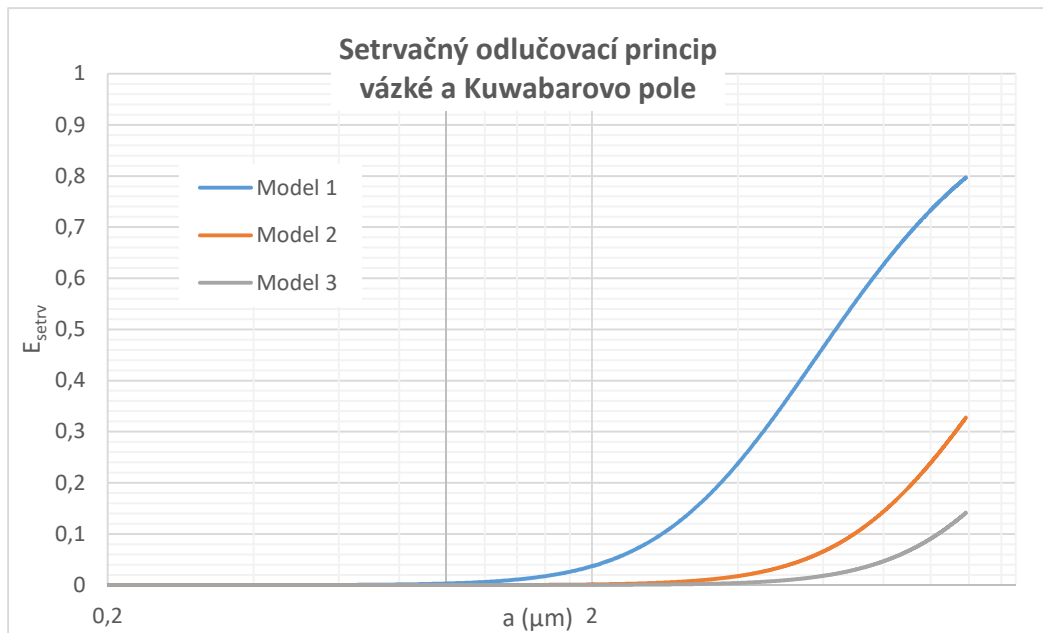


Obr. 7.2 - Setrvačný odlučovací princip pro potenciální a vazké proudění v závislosti na Stokesově čísle – Model 3.

Na těchto grafech je vidět, že průběh křivek odpovídá teoretickému průběhu. To znamená, že se snižujícím se Stokesovým číslem klesá frakční účinnost, protože malé částice prakticky sledují proudnici a naopak se zvyšujícím Stk je trajektorie částice přímější. Dále je na těchto grafech vidět, že se výsledky velmi liší a to z důvodu závislosti na Reynoldsově čísle vyjadřujícím vliv vazkosti. Z toho vyplývá, že vliv vazkosti se využívá v celém rozsahu hodnot Stk .



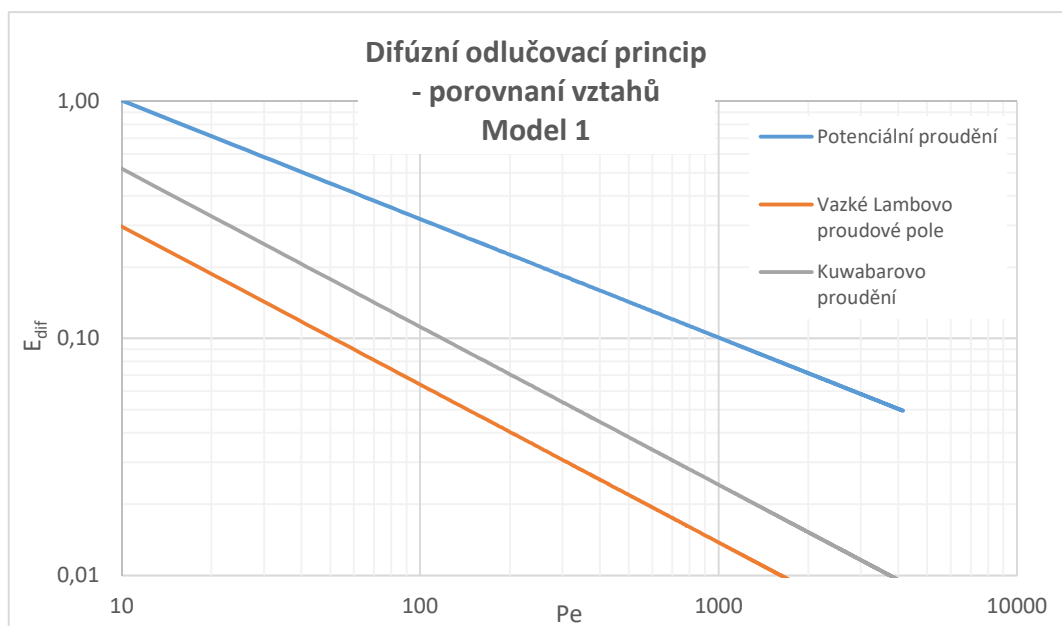
Obr. 7.3 - Setrvačný odlučovací princip pro potenciální proudění v závislosti na velikosti částice pro jednotlivé modelové vrstvy.



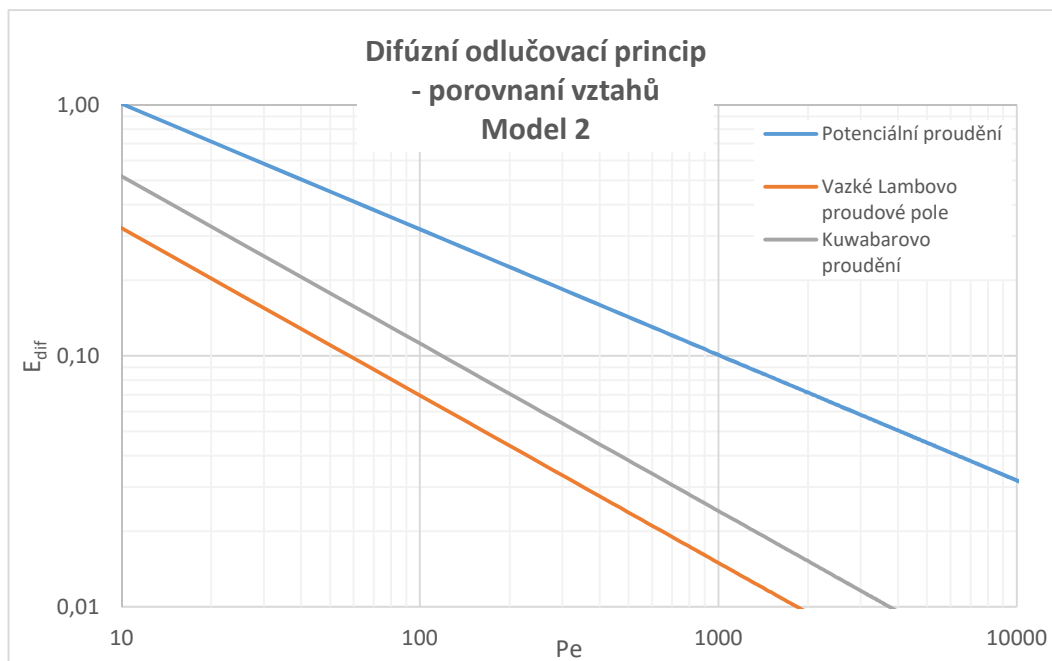
Obr. 7.4 - Setrvačný odlučovací princip pro vázké pole v závislosti na velikosti částice pro jednotlivé modelové vrstvy.

Na obrázcích 7.3, 7.4 jsou grafy setrvačného odlučovacího principu v závislosti na velikosti částice. Je vidět, že do velikosti částic $0,2 \mu\text{m}$ jsou hodnoty odlučivosti nulové. Což odpovídá tomu, že pro každé R_{ed} existuje kritické St_{k} , kdy při nižších hodnotách je nulová odlučivost. Pro částice větší jak $0,2 \mu\text{m}$ se výsledky naopak velmi liší a to z důvodu závislosti na Reynoldsově čísle vyjadřujícím vliv vázkosti.

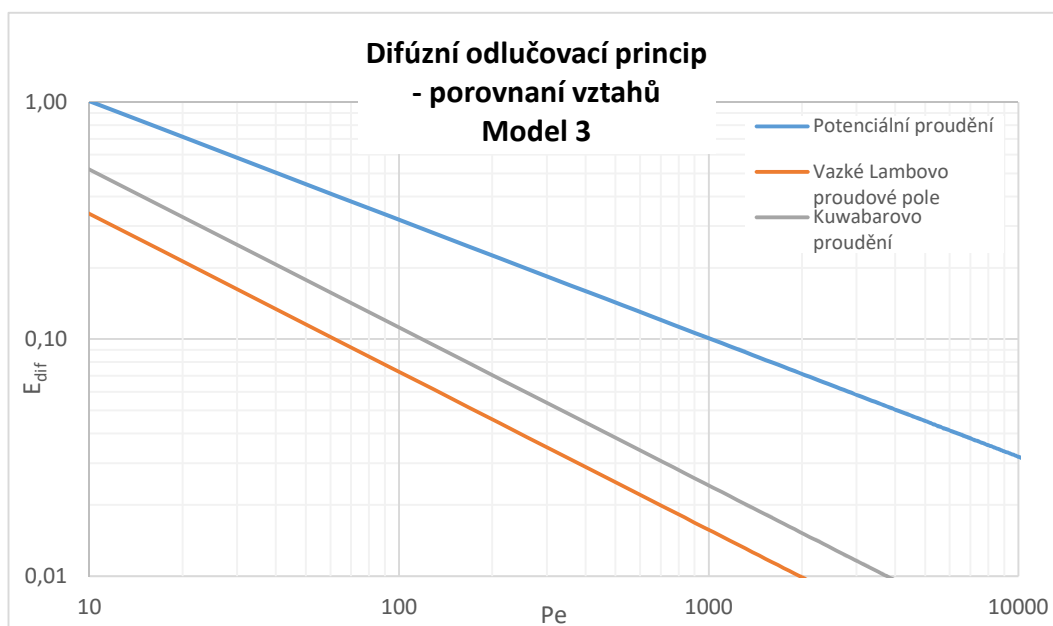
Na obrázcích 7.5, 7.6, 7.7 je porovnání odlučivosti pomocí difúzního principu pro různá proudová pole v závislosti na Pecletově čísle a pro všechny tři modely vrstvy.



Obr. 7.5 – Porovnání vztahů u E_{dif} pro jednotlivá proudění - Model 1



Obr. 7.6 - Porovnání vztahů u Edif pro jednotlivá proudění - Model 2

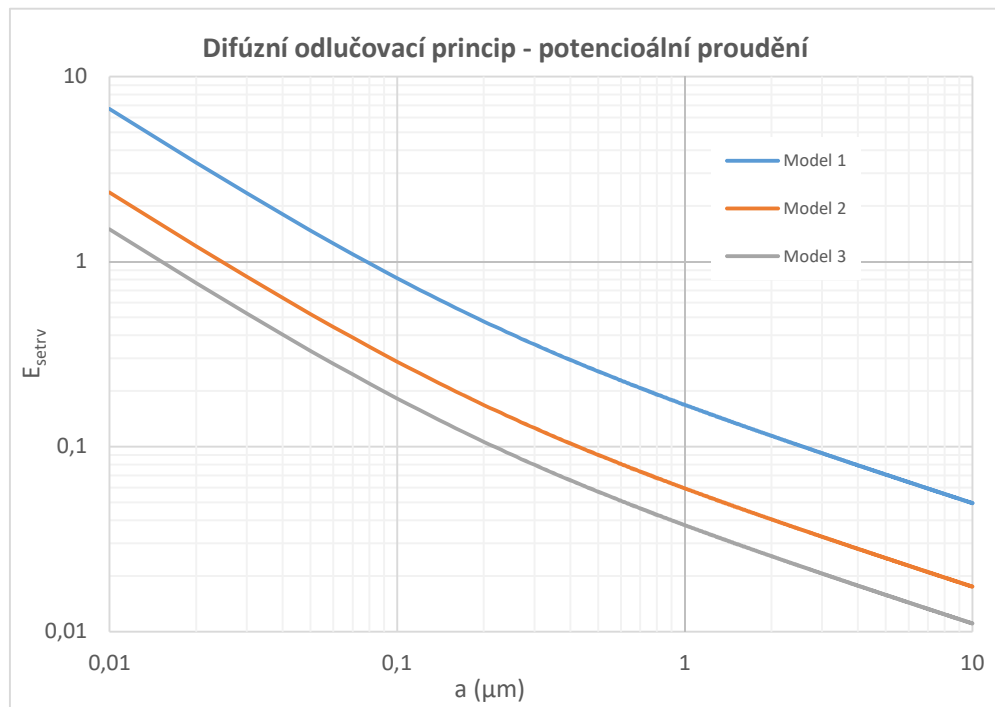


Obr. 7.7 - Porovnání vztahů u Edif pro jednotlivá proudění - Model 3

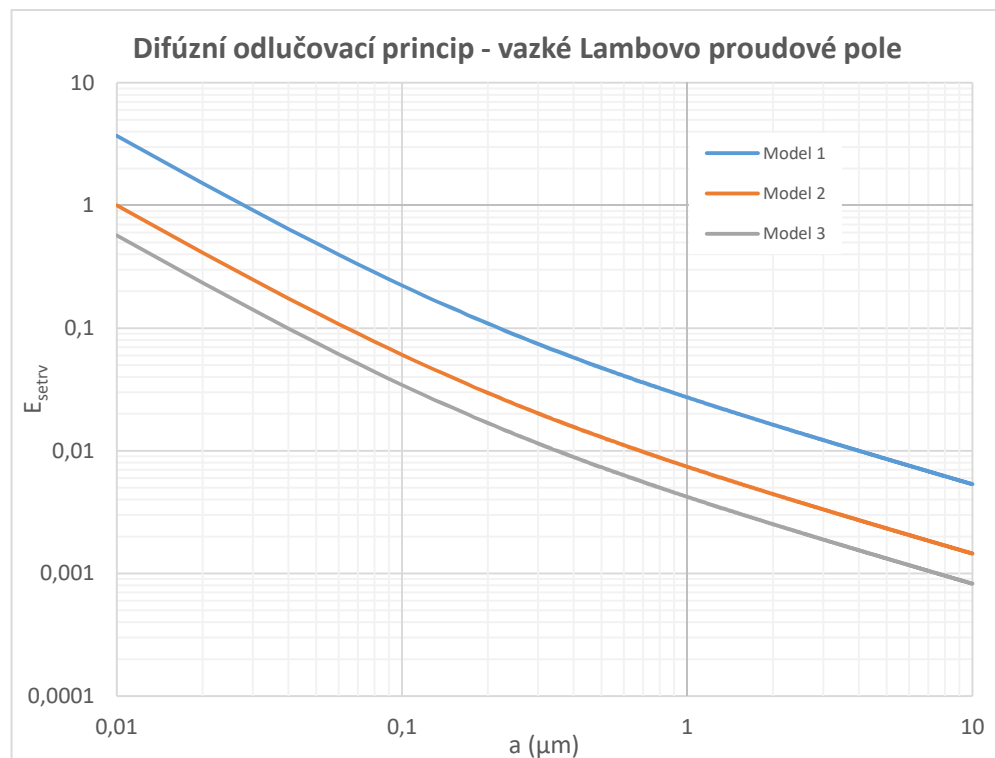
Průběhy odpovídají předpokládaným teoretickým závislostem. Je vidět, že průběh pro vazké Lambovo proudové pole a Kuwabarovo proudění jsou si blízké na rozdíl od potencionálního proudění, kdy je rozdíl znatelný. Z toho vyplývá, že vliv sousedních vláken je významný a nelze jej zanedbat.

Následující grafy 7.8, 7.9, 7.10 ukazují srovnání jednotlivých proudových polí u difúzního odlučovacího principu pro všechny tři modely vrstvy v závislosti na velikosti částice. Z těchto grafů vyplývá důležitý fakt, že u difúzního

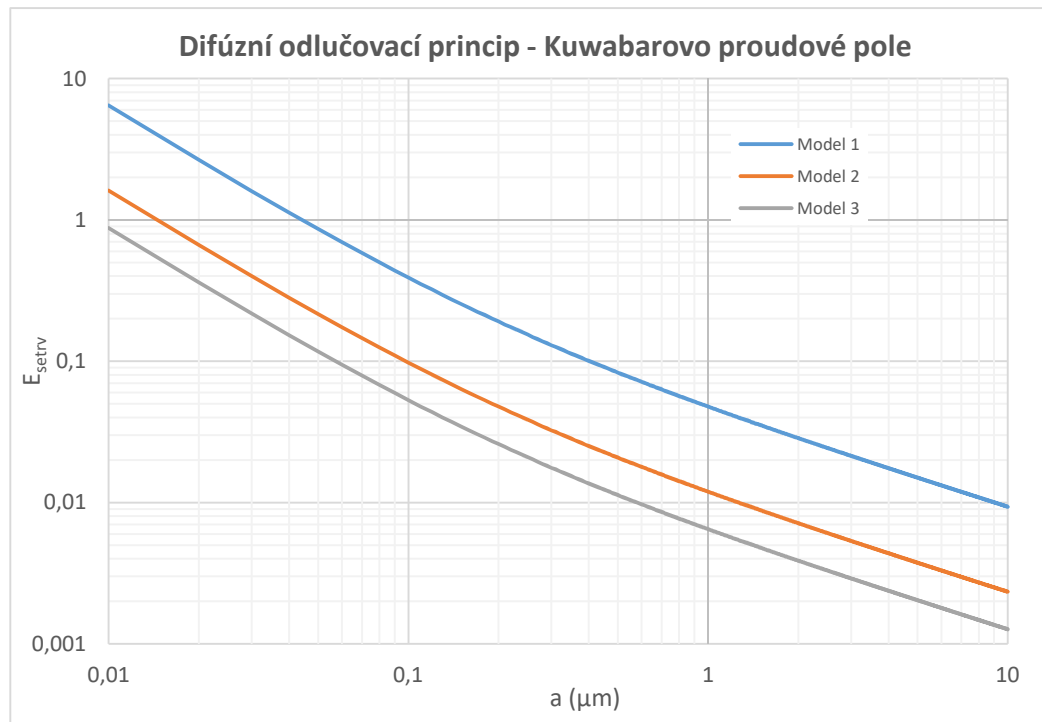
odlučovacího principu se zmenšující se velikostí částice roste výrazně frakční odlučivost izolovaného vlákna.



Obr. 7.8 - Difúzní odlučovací princip pro potenciaální proudění v závislosti na velikosti částice

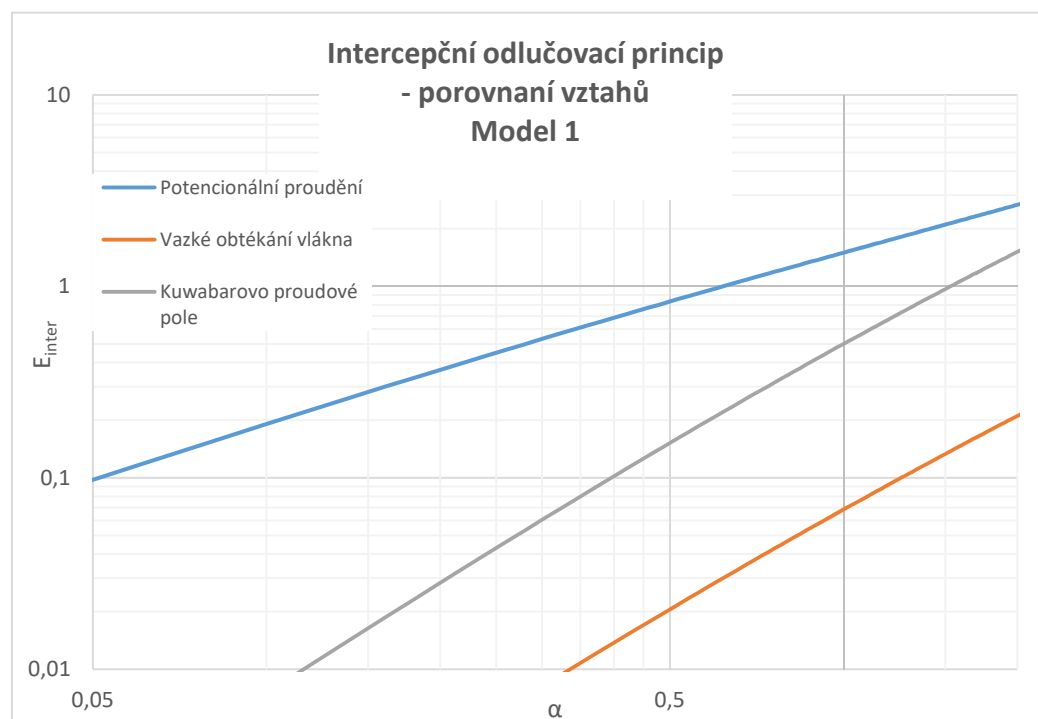


Obr. 7.9 - Difúzní odlučovací princip pro vazké proudění v závislosti na velikosti částice

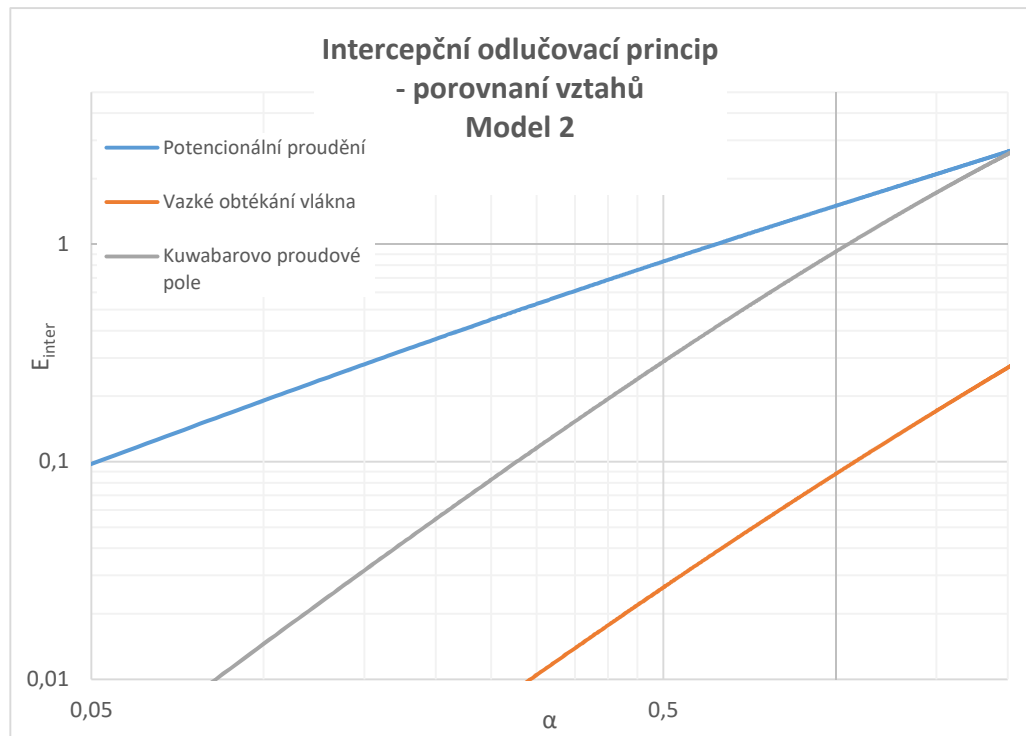


Obr. 7.10 - Difúzní odlučovací princip pro Kuwabarovo proudové pole v závislosti na velikosti částice

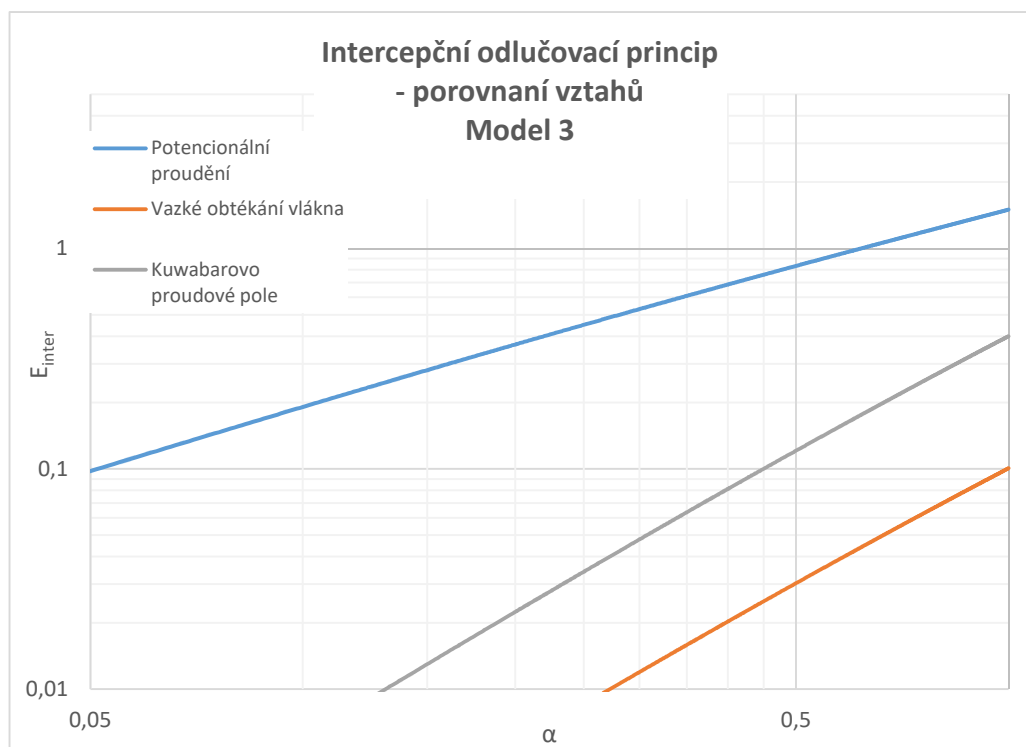
Na grafech 7.11, 7.12, 7.13 jsou zobrazeny závislosti účinnosti odlučování u intercepčního odlučovacího principu na parametru intercepce a pro zvolené modely filtrační vrstvy.



Obr. 7.11 - Intercepční odlučovací princip v závislosti na parametru intercepce - Model 1



Obr. 7.12 - Intercepční odlučovací princip v závislosti na parametru intercepce - Model 2

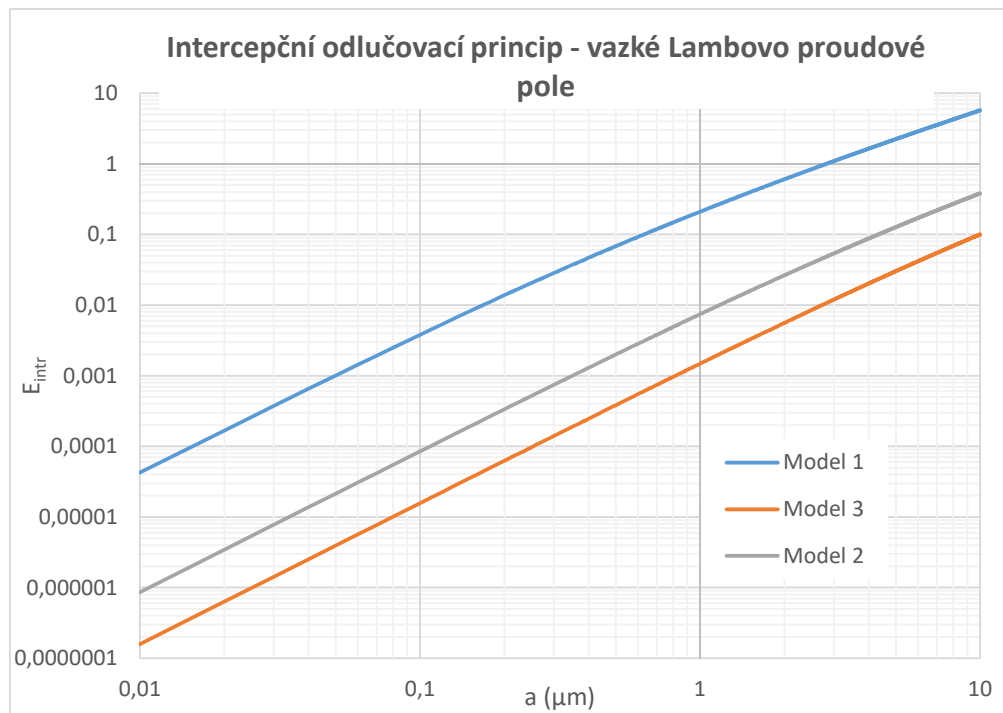


Obr. 7.13 Intercepční odlučovací princip v závislosti na parametru intercepce - Model 3

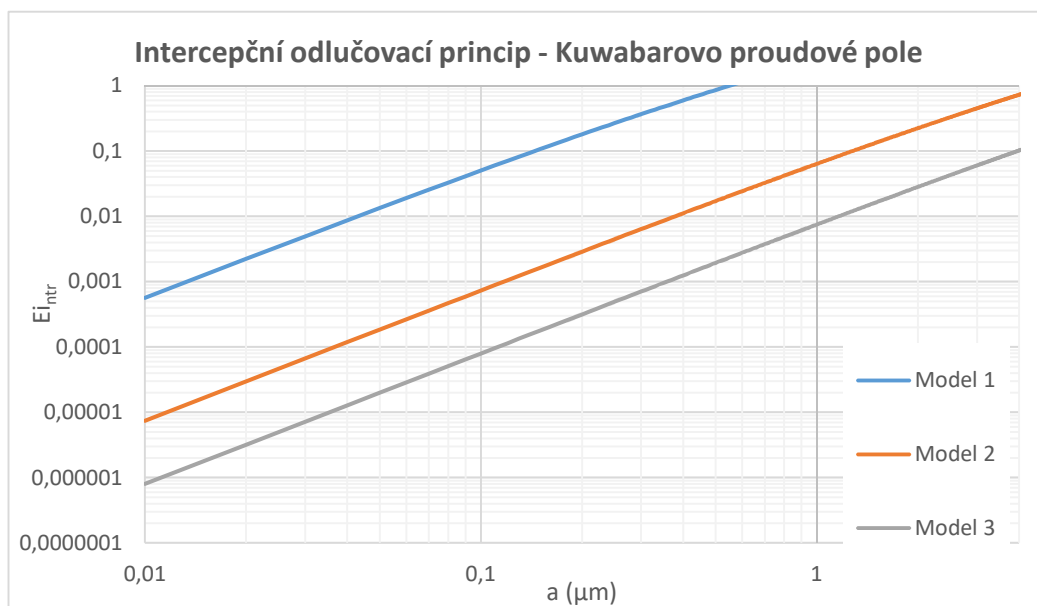
Z těchto grafů je vidět, že výsledky odpovídají teoretickému průběhu a že se průběhy velmi liší, protože u potenciálního proudění, které má nejvyšší hodnoty

odlučivosti proteče v okolí vlákna největší množství tekutiny. Naopak nejmenší množství tekutiny proteče u vazkého Lambova pole, protože se na povrchu vlákna vytváří významná mezní vrstva a proto má Lambovo pole nejnižší hodnoty.

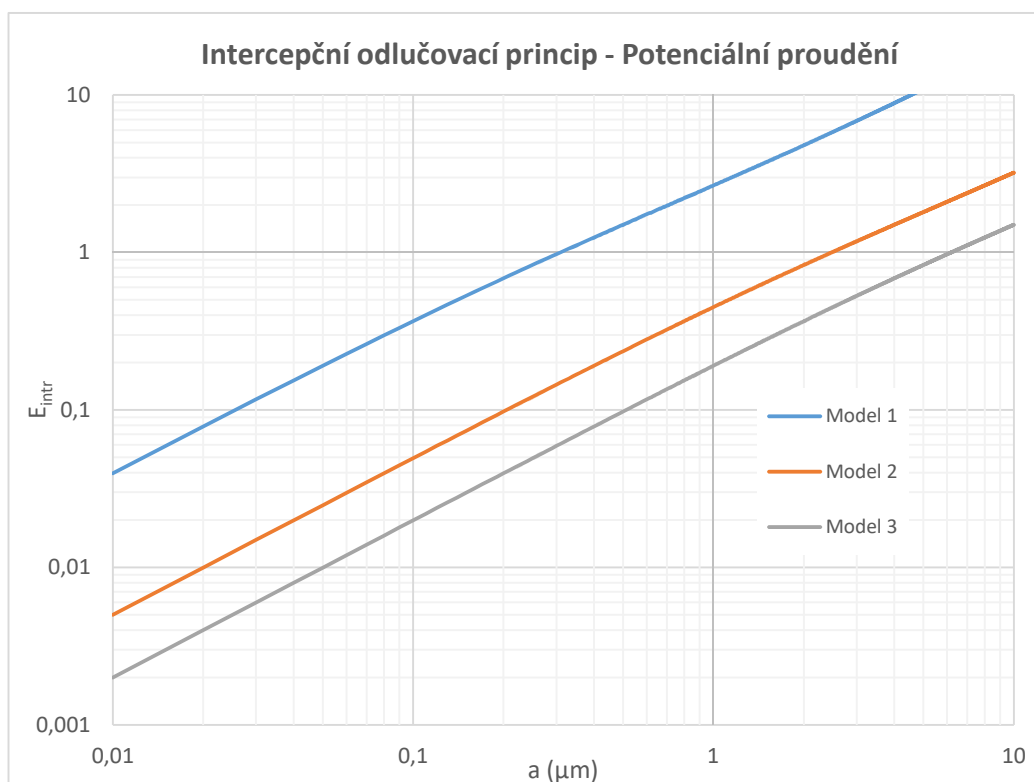
Na grafech 7.14, 7.15, 7.16 je zobrazena účinnost odlučování u intercepčního principu v závislosti na velikosti částice.



Obr. 7.14 - Intercepční odlučovací princip pro vazké proudové pole - účinnost odlučování v závislosti na velikosti částice



Obr. 7.15 - Intercepční odlučovací princip pro Kuwabarovo pole - účinnost odlučování v závislosti na velikosti částice



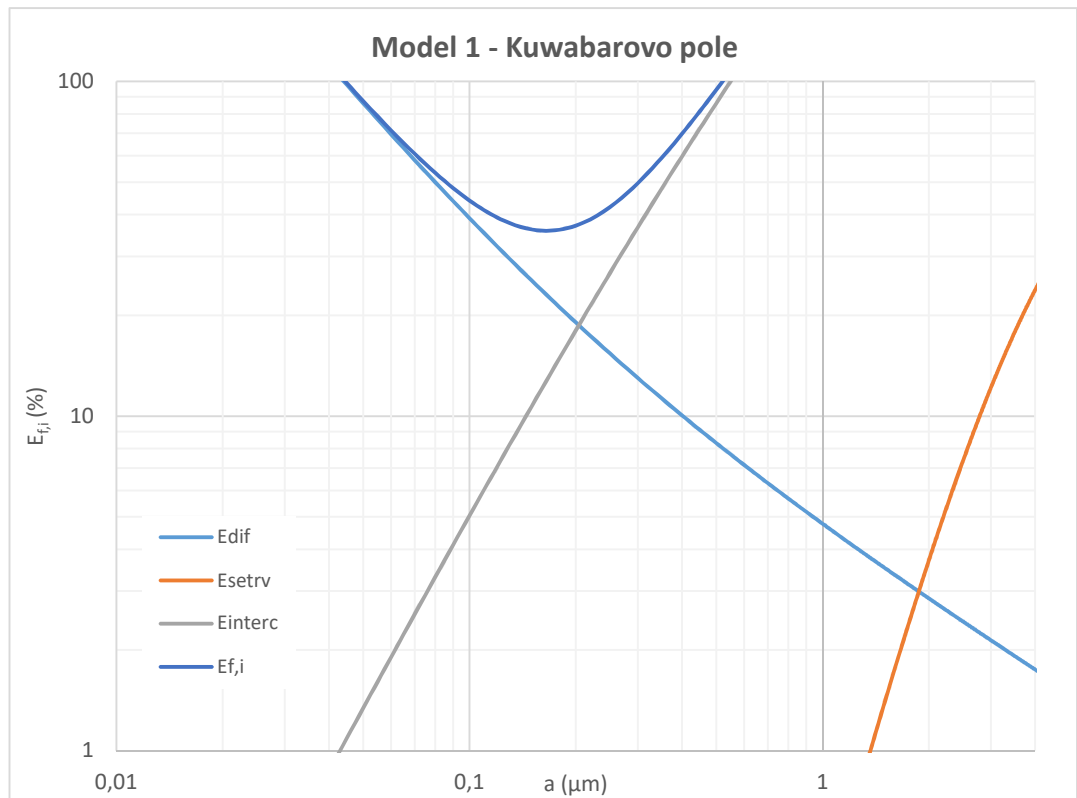
Obr. 7.16 - Intercepční odlučovací princip pro potenciální proudění - účinnost odlučování v závislosti na velikosti částice

Z těchto předchozích grafů pro intercepční odlučovací princip a pro všechna proudová pole je vidět, že se zmenšujícím parametrem intercepce klesá výrazně frakční odlučivost a to z důvodu zmenšující se odlučované částice.

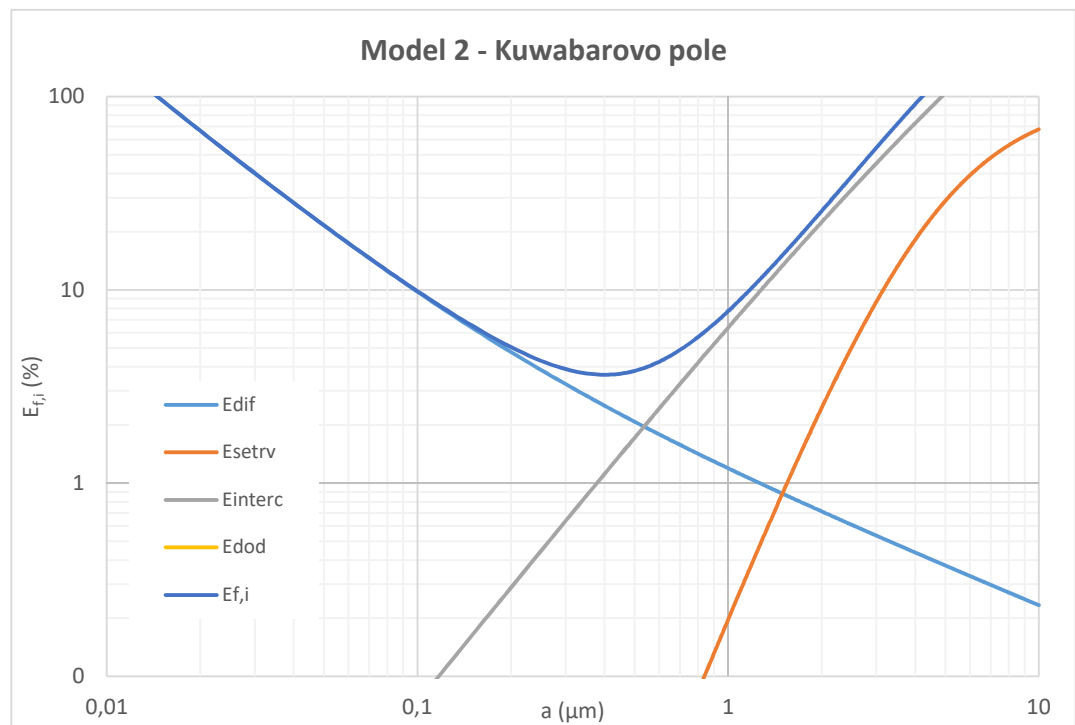
Mezi jednotlivými vztahy jsou velké rozdíly a celkově lze říct, že pro intercepční odlučovací princip a pro dané parametry je frakční odlučivost větší, čím větší je velikost částice. Ale velmi záleží na proudovém poli, jak je vidět na předchozích grafech. Největší frakční odlučivost je u potenciálního proudění a nejmenší hodnoty jsou u vaského Lambova proudového pole.

Závěrem lze říct, že u jemných vláken při malé rychlosti převládá difúzní odlučovací princip. Ale naopak pro velké rychlosti a pro hrubá vlákna bude převládat setrvačný princip.

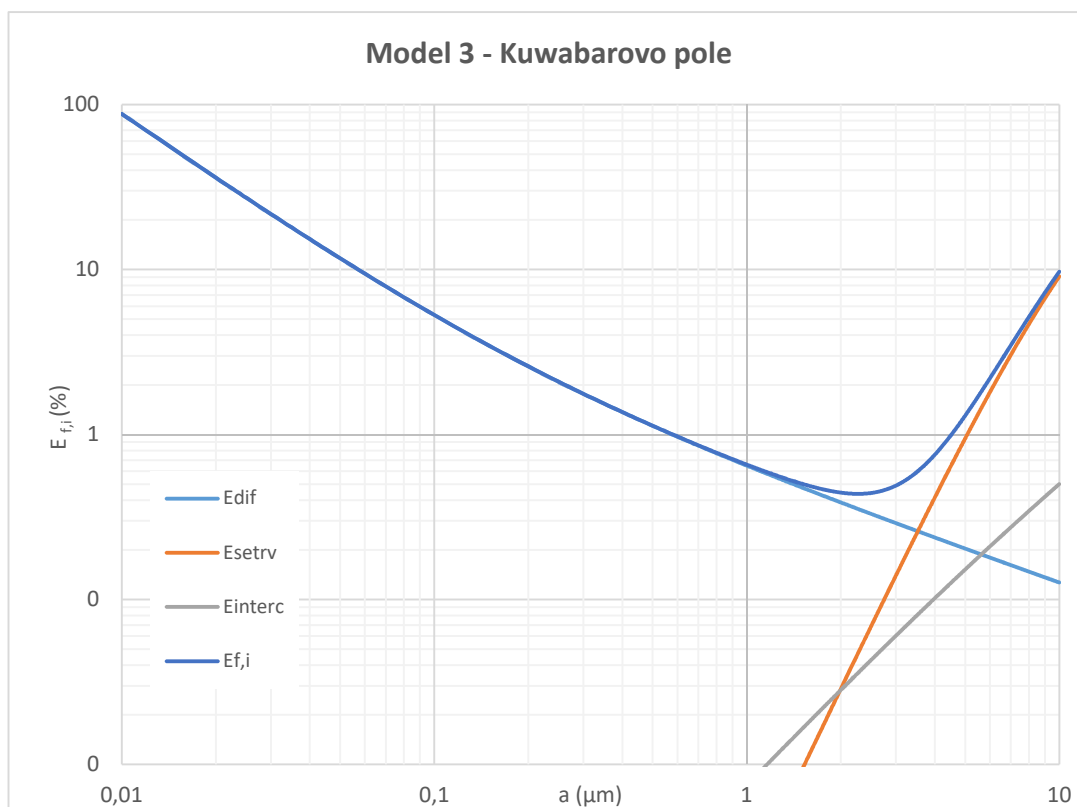
Na obrázcích 7.17, 7.18, 7.19 jsou grafy, na kterých je ukázka vlivu jednotlivých odlučovacích principů pro různé zvolené filtrační vrstvy a pro Kuwabarovo pole, které představuje nejlepší vyjádření proudového pole ve vláknité vrstvě. $E_{r,i}$ značí výslednou frakční odlučivost izolovaného vlákna, která se spočítá sečtením účinností jednotlivých odlučovacích principů na základě principu aditivnosti.



Obr. 7.17 - Výsledná frakční odlučivost izolovaného vlákna v závislosti na velikosti částice pro Model 1



Obr. 7.18 - Výsledná frakční odlučivost izolovaného vlákna v závislosti na velikosti částice pro Model 2



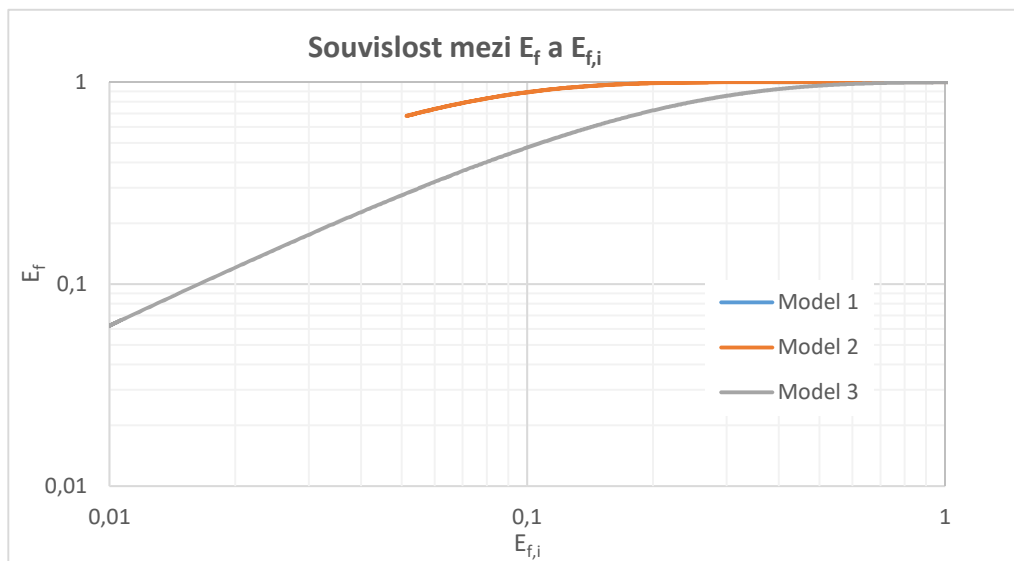
Obr. 7.19 - Výsledná frakční odlučivost izolovaného vlákna v závislosti na velikosti částice pro Model 3

Z porovnání předchozích grafů vyplývá, že za těchto stanovených podmínek se na výsledné frakční odlučivosti v oblasti velikosti částic kolem hodnoty $0,4 \mu\text{m}$ nejvíce podílí difúzní odlučovací princip a nad $0,4 \mu\text{m}$ se nejvíce uplatňuje intercepční a setrvačný princip.

Dále je vidět, že u difúzního odlučovacího principu roste účinnost se snižující se velikostí odlučované částice. Naopak u setrvačného a intercepčního odlučovacího principu, frakční odlučivost izolovaného vlákna klesá se snižující se velikostí odlučované částice.

Z těchto výsledků vyplývá, že dle předpokladů modelová filtrační vrstva pro vysoceúčinnou filtraci má největší účinnost frakční odlučivosti izolovaného vlákna, naopak nejhorší má modelová filtrační vrstva pro hrubou filtraci. Celkově tedy lze říct, že ve filtraci u běžného větrání se na odlučovacím efektu podílí setrvačný a intercepční princip a pro vysoce účinnou filtraci převládá difúzní odlučovací princip.

Na grafu 7.20 je závislost mezi frakční odlučivostí izolovaného vlákna a frakční odlučivostí vláknité vrstvy.

Obr. 7.20 – Vzájemná souvislost mezi E_f , $E_{f,i}$ a λ

Je vidět, že graf odpovídá teoretickému průběhu. To znamená, že frakční odlučivost vláknité vrstvy je větší, čím větší je součin parametru vrstvy a frakční odlučivosti izolovaného vlákna. Frakční odlučivost vláknité vrstvy je vlastností filtru a rozhoduje o výsledných odlučovacích schopnostech filtru. Model 1 na tomto grafu není vidět, jelikož jsou výsledky skoro totožné s modelem 2.

8. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá filtrací vzduchu rozdělenou na filtraci atmosférickou a průmyslovou. V úvodní části je uvedena teorie filtrace a její hlavní odlučovací principy, mezi které patří intercepční, difúzní a setrvačný odlučovací princip a v určitých případech může hrát významnou roli i elektrický odlučovací princip.

V následujících dvou částech byla popsána atmosférická a průmyslová filtrace a hlavní rozdíly mezi nimi. Hlavní rozdíl mezi filtrací průmyslovou a atmosférickou je, že u filtrace atmosférického vzduchu dochází k hloubkové filtraci. Pojem hloubková filtrace znamená, že k odlučování dochází uvnitř filtrační vrstvy, takže po zanesení filtru částicemi je filtr nutné vyměnit. Naopak u průmyslové filtrace dochází k povrchové filtraci a následné regeneraci.

Dále zde bylo uvedeno rozdělení filtrů pro atmosférickou a průmyslovou filtraci. U průmyslové filtrace neexistuje pro zařazení filtrů žádný předpis. Filtry pro filtraci atmosférického vzduchu dělí na dvě základní skupiny a to na filtry pro běžné větrání a na filtry vysoce účinné. Velká změna proběhla u filtrů pro běžné větrání, kdy od prosince 2016 nahradila stávající normu ČSN EN 779 nová norma ISO 16890, která při zkoušení zavádí nové indikátory a to frakce atmosférického prachu PM_{10} , $PM_{2,5}$ a PM_1 , které jsou v ochraně ovzduší definovány jako částice atmosférického prachu menší než aerodynamická velikost částice 10, 2,5 a 1,0 μm .

U průmyslové filtrace byly popsány obvyklé způsoby regenerace filtrů. Dále zde byly uvedeny používané materiály pro průmyslovou filtraci, technologie výroby, rozdělení filtrů z hlediska použití i konstrukce a povrchové úpravy.

Filtrační materiály jsou vyráběny buď z přírodních nebo umělých materiálů. Filtrační materiály používané pro průmyslovou filtraci lze rozdělit do několika hlavních skupin: netkané textilie, tkané textilie, přírodní vlákna a syntetické materiály. Filtrační textilie pro průmyslovou filtraci jsou opatřeny povrchovou úpravou pro lepší účinnost odlučování drobných částic.

Povrchové úpravy mají velkou váhu z hlediska vlastností a životnosti průmyslových filtrů. Povrchové úpravy se provádějí z důvodu zvýšení odlučivosti a pro zlepšení stávajících vlastností. Mezi hlavní povrchové úpravy patří impregnace, nános abraziva, povrstvování, povlakování, kalandrování, zatírání, natavování povrchu a tepelné pojení.

Další část této diplomové práce byla věnována technologii nanovláken a jejich výrobě a použití ve filtraci vzduchu pro atmosférickou a průmyslovou filtraci. Kromě toho je zde uvedena technologie výroby, vlastnosti nanovláken, materiály pro výrobu nanovláken rizika nanotechnologii a také historie nanotechnologie.

Výroba nanovláken probíhá několika způsoby. Nejrozšířenější a nejpoužívanější je elektrické zvlákňování, naopak méně rozšířený způsob výroby je zvlákňování z taveniny. Dalšími možnostmi jsou drawing, template synthesis, phase separation.

Principem elektrického zvlákňování je využití účinku elektrostatického pole o vysoké intenzitě na elektricky nabitě viskoelastické kapaliny, kde za příznivých podmínek dochází k vytvoření tenkých vláken. Nevýhodou této metody je velmi malá produktivita, za jednu hodinu dokáže vyrobit 0,1 až 1 gram vláken. Další velkou nevýhodou je, že se nedá při výrobě docílit stálé tloušťky vlákna, ale tyto nedostatky lze vyřešit modifikací zařízení. Nejpoužívanější a nejproduktivnější modifikací elektrického zvlákňování je metoda Nanospider. Tato modifikace pracuje s výkonem od 1 – 5 g/min.

Všeobecně velkými výhodami nanovláken je velký měrný povrch, vysoká porozita, vysoká prodyšnost, malá velikost pórů, nízká měrná hmotnost, dále i velké spektrum polymerů vhodných ke zvlákňování. Z hlediska filtrace má tu výhodu, že čím bude menší průměr vlákna, tím bude větší účinnost odlučování. Další výhodou menších vláken je velká škála volitelnosti hustoty filtrační nanotextilie.

Nanofiltr by se dal teoreticky využít všude, kde se běžně využívají jiné filtry. Filtry s nanovláknem se využívají převážně v atmosférické filtraci. Naopak v průmyslové filtraci nemají tak velké využití, protože se oproti filtraci atmosférické pracuje s náročnými provozními podmínkami a nanovláknem většinou nevydrží a trhají se.

Využití nanovláken ve filtraci vzduchu našlo široké uplatnění, protože malé průměry nanovláken vytvářejí větší plochu povrchu, což vede k vyšší filtrační účinnosti, ale na druhé straně dochází ke zvýšení tlakové ztráty filtru s vrstvou nanovláken. Filtr s nanovláknem je obvykle používán ve formě vícevrstvého filtračního materiálu s podkladovým substrátem, kdy větší počet nanovlákených vrstev zlepšuje vlastnosti filtrační vrstvy. Lze říct, že čím více podkladových vrstev, tím je větší tlaková ztráta. Naopak čím větší je obsah nanovláken a menší obsah podkladových vrstev, tím je tlaková ztráta menší.

Na základě řady prací vyplývá fakt, že při odlučování za použití nanovlákené vrstvy dochází ke zvýšení celkové odlučivosti oproti běžným vláknům. Dále vyplývá, že významný nárůst účinnosti filtrace pro částice nejvíce pronikající filtrem v rozsahu velikostí 0,1 až 0,5 μm je doprovázen pouze slabým nárůstem tlakové ztráty a také z těchto prací vyplývá, že pro zvýšení efektivity nanovláken stačí malé množství vláken, proto je využití nanovláken výhodné i z hlediska ekonomického.

Určitou nevýhodou je již zmíněná tlaková ztráta se zmenšujícími se vlákny. Ale lze říct, že výhoda v nárůstu účinnosti převažuje nad negativem nárůstu tlakové ztráty. Další nevýhodou je nízká výrobní produkce jednotlivých metod výroby nanovláken a také je velký problém přichycení nanovlákené vrstvy na podkladový substrát.

U filtrace průmyslové nenacházejí nanovláknem zatím velké využití, protože se u průmyslové filtrace pracuje s daleko většími průtoky vzduchu, teplotami a koncentracemi částic než u filtrace atmosférické. Nanovláknem jako taková jsou velice citlivá na opotřebení a mají menší teplotní odolnost a z tohoto důvodu může dojít k narušení nanovláken ve filtrační vrstvě a následně ztrátě odlučovací

schopnosti. K narušení nanovláken může dojít i při regeneraci filtru, kdy hrozí nebezpečí odtržení nanovláčkové vrstvy.

Mezi výhody v průmyslové filtraci při použití nanovláčkové vrstvy patří stejně jako v atmosférické filtraci nižší tlaková ztráta a vyšší účinnost odlučování. Prozatím se v průmyslové filtraci nanovláčková vrstva využívá u méně náročných aplikací u několika výrobců, kdy uvádějí, že při vyšší účinnosti odlučování nanofiltrů je díky nanovrstvě daleko lepší regenerovatelnost oproti vrstvám bez nanovláken a z toho vyplývá delší životnost nanofiltru a také spotřeba stlačeného vzduchu menší díky menší tlakové ztrátě.

Velkou nevýhodou u nanovláken je jejich cena. Cena je vysoká díky náročnosti technologie. Ale vzhledem k rozvoji technologií se dá předpokládat, že dojde i ke snížení ceny. Nanotextilie se dají určitě považovat za perspektivní materiál jak ve vzduchových filtračních aplikacích, tak také v průmyslových filtračních aplikacích.

Poslední částí bylo vytvoření jednoduchého matematického modelu pro stanovení frakční odlučivosti filtrační vrstvy u vzduchové filtrace na základě základních odlučovacích principů pro tři rozdílné filtrační vrstvy.

Výsledky, které by bylo v další etapě zajímavé porovnat se skutečností, odpovídají teoretickým předpokladům. To znamená, že u difúzního odlučovacího principu roste účinnost se snižující se velikostí odlučované částice. Naopak u setrvačného a intercepčního odlučovacího principu, frakční odlučivost izolovaného vlákna klesá se snižující se velikostí odlučované částice.

Z těchto výsledků vyplývá, že dle předpokladů modelová filtrační vrstva pro vysoceúčinnou filtraci má největší účinnost frakční odlučivosti izolovaného vlákna, naopak nejhorší má modelová filtrační vrstva pro hrubou filtraci. Celkově tedy lze říct, že ve filtraci u běžného větrání se na odlučovacím efektu podílí setrvačný a intercepční princip a pro vysoce účinnou filtraci převládá difúzní odlučovací princip.

Seznam použité literatury

- [1] HEMERKA, J., Vybíral P.: Filtrace atmosférického vzduchu, Vydavatelství ČVUT 2011, PRAHA, ISBN 978-80-01-04902-0
- [2] HEMERKA, J., Vybíral P.: Ochrana ovzduší, Vydavatelství ČVUT 2010, ISBN 978-80-01-04646-3
- [3] NOVÝ, R.: Technika prostředí, Vydavatelství ČVUT 2000, ISBN 80-01-03492-5
- [4] HEMERKA, J.: Filtrace atmosférického vzduchu I. TZB-info [online] Praha, 2009, [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vzduchotechnicka-zarizeni/5815-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-i>
- [5] HEMERKA, J.: Odlučování tuhých částic, Vydavatelství ČVUT 1994, PRAHA, ISBN 80-01-01088-0
- [6] ISO 16890-1 Air filters for general ventilation – Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM), ISO 2016
- [7] HEMERKA, J.: Filtrace atmosférického vzduchu II. TZB-info [online] Praha, 2009, [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/potrubi-a-jeho-soucasti/5843-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-ii>
- [8] HEMERKA, J.: Filtrace atmosférického vzduchu III. TZB-info [online] Praha, 2009, [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/potrubi-a-jeho-soucasti/5877-filtrace-atmosferickeho-vzduchu-iii>
- [9] KS Klima-Service [online]. 2017 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: www.ksklimaservice.cz
- [10] Vpichovaná textilie - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2012 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Vpichov%C3%A1n%C3%AD_\(textil\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Vpichov%C3%A1n%C3%AD_(textil))
- [11] Soukání - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2012 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Souk%C3%A1n%C3%AD>
- [12] Katedra netkaných textilií, stránka předmětu materiálové inženýrství netkaných textilií, [online], [cit. 2017-04-30] Dostupné z: www.nanoed.tul.cz
- [13] ČHMÚ [online]. In: Portál ČHMÚ [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/uoco/isko/grafroc/15groc/gr15cz/IV1_PM_CZ.html
- [14] HEMERKA, Jiří. Odlučování tuhých částic. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1995, 138 s. ISBN 80-010-1088-0
- [15] AirFilters: Kapsové filtry [online]. [cit. 2017-01-010]. Dostupné z: <http://airfilters.cz/filtry/kapsove-filtry/>
- [16] Patronové filtry. Donaldson [online]. [cit. 2017-01-010]. Dostupné z: <http://www2.donaldson.com/toritdce/cs-cz/replacement-partsservices/>

- [17] Průmyslové filtry. DEPURO s.r.o. [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://www.depuro.cz/pr367mysloveacute-filtry.html>
- [18] DOUBEK, P., HEMERKA, J., HEJMA, J.: Pulzní regenerace průmyslových filtrů, Ochrana ovzduší, 1997, č. 4, s. 19-22.
- [19] Katedra termické a chemické technologie výroby netkaných textilií, stránka předmětu Termické a chemické technologie, [online] Dostupné z: www.nanoed.tul.cz
- [20] Impregnace - Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2012 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Impregnace>
- [21] Elektrodesign [online]. 2017 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/iflk-ilht-140-kratky-deskovy-filtr>
- [22] IB Filtr [online]. 2017 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://ibfiltr.cz/images/synteticky-kapsovy-filtr-G3-F5.jpg>
- [23] EWAC [online]. 2017 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: https://www.ewac.cz/galerie/tinymce/multiform-0_1.png
- [24] DencoHappel [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.dencohappel.com>
- [25] VzduchoTechnik [online]. 2017 [cit. 2017-05-25]. Dostupné z: <http://www.vzduchotechnik.cz/wp-content/uploads/2017/02/patronove-filtry-vzduchu.jpg>
- [26] Kayser [online]. 2017 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <https://www.kayser-filtertech.com/index.html>
- [27] Ventilace [online]. 2017 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: http://www.ventilace.eu/katalog/39_1364566169.jpg
- [28] KS Klima-servise [online]. 2017 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://www.ksklimaservice.cz>
- [29] Vodní mlýny [online]. 2017 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://vodnimlyny.cz/upload/media/3029/24536.jpg>
- [30] KFK [online]. 2017 [cit. 2017-06-15]. Dostupné z: <http://www.kapsove-filtry.cz/kapsovy-filtr-g4.html>
- [31] HRŮZA, Jakub. Zlepšování filtračních vlastností vlákných materiálů. Liberec, 2005. Kandidátská disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [32] APF [online]. 2017 [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: http://www.apf.cz/img/proplach_big.html
- [33] NETEX [online]. 2017 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://stary.netex.cz/plst/>
- [34] DocPlayer [online]. 2017 [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/docs-images/62/46698640/images/48-0.jpg>

- [35] Nanotechnology - Wikipedia, the free encyclopedia. Wikipedia, the free encyclopedia [online]. 2012 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology>
- [36] EC Europa - sdělení komise evropskému parlamentu, radě a evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru [online]. 2012 [cit. 2017-05-30]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2012/CS/1-2012-572-CS-F1-1.Pdf>
- [37] Richard Feynman. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman
- [38] Eric Drexler. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-06-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Eric_Drexler
- [39] Elmarco [online]. 2004 [cit. 2012-04-30]. Dostupné z: www.elmarco.cz
- [40] BARHATE, R. S., LOONG, CH. K. a RAMAKRISHNA, S. Preparation and characterization of nanofibrous filtering media. Journal of Membrane Science [online], 2006, roč. 283, č. 1, s. 209-218 [vid. 1.10.2015]. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [41] GRAHAM, K., OUYANG, M., RAETHER, T., GRAFE, T., MCDONALD, B. a KNAUF, P. Polymeric nanofibers in air filtration applications In: Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society [online]. Galveston. 2002. ISBN 978- 1-61804-065-7
- [42] BARHATE, R. S. a RAMAKRISHNA, S. Nanofibrous filtering media: filtration problems and solutions from tiny materials. Journal of Membrane Science [online], 2007, roč. 296, č. 1, s. 1-8 [vid. 28.9.2015]. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [43] Katedra textilních nanomateriálů, stránka předmětu textilní nanomateriály, [online], [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: www.nanoed.tul.cz
- [44] Electrospinz - Electrospinning [online]. 2009 [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://www.electrospinz.co.nz/electrospinning.php>
- [45] Usměrňování nanovláken. Usměrňování nanovláken [online]. 2011, 9/2011 [cit. 2017-06-30]. Dostupné z: <http://3pol.cz/1079-usmernovani-nanovlaken>
- [46] CHUANFANG, Y. Aerosol filtration application using fibrous media—an industrial perspective. Chinese Journal of Chemical Engineering [online]. 2012, roč. 20, č. 1, s. 1-9 [vid.1.10.2015]. ISSN 1004-9541. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com>
- [47] Sodomka, L., Fiala, J.: Základy fyziky kondenzovaných látek s aplikacemi 1,2. Adhesiv, Liberec 2002,2003
- [48] Topinka J., Je nutné studovat možná rizika nanomateriálů pro lidské zdraví?, Vesmír 90, duben 2011, [cit. 2017-10-11]. dostupné na <http://www.vesmir.cz>

- [49] Depositphotos [online]. 2017 [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: https://static7.depositphotos.com/1204117/698/i/450/depositphotos_6989241-stock-photo-tulip-flower-stamens-covered-with.jpg
- [50] Vzdělání21 [online]. 2017 [cit. 2017-10-10]. Dostupné z: <http://www.vzdelani21.cz/foto/853.jpg>
- [51] Electrospinning. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online] Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-26]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Electrospinning_Diagram.jpg/450px-Electrospinning_Diagram.jpg
- [52] Donaldson® Filter Cartridges: Ultra-Web® Filters Have No Equal [online]. Donaldson, 7 s. [cit. 2017-11-08]. Dostupné z: <http://www.donaldson.co.kr/material/pdf/catalog/cartridgefilter.pdf>
- [53] KIM, Gil Tae, Young Chull AHN a Jae Keun LEE. Characteristics of Nylon 6 nanofilter for removing ultra fine particles [online]. Busan, Jižní Korea, 2008 [cit. 2017-11-10]. Dostupné z: <https://www.cheric.org/PDF/KJChE/KC25/KC25-0368.pdf>
- [54] Hollingsworth and Vose [online]. 2004 [cit. 2017-12-10]. Dostupné z: <http://www.hollingsworth-vose.com/>
- [55] CHEN, Y.-S. a HSIAU, S.-S. Cake formation and growth in cake filtration. Powder Technology [online]. 2009, roč. 192, č. 2, s. 217-224 [vid. 1.10.2015]. ISSN 0032-5910. Dostupné z: <http://www.elsevier.com>
- [56] A perfect material for air filters [online]. [vid. 11. 10. 2017]. Last updated: March 3, 2016. Dostupné z: http://www.chemeurope.com/en/news/157114/a-perfect-material-for-air-filters.html?WT.mc_id=ca0262
- [57] Researchers make nanofiber air filter that can be painted onto fabric [online]. [vid. 11. 10. 2017]. Last updated: March 23, 2017. Dostupné z: <https://www.slashgear.com/researchers-make-nanofiber-air-filter-that-can-be-painted-onto-fabric-23479612/>
- [58] 1Filter [online]. [vid 14. 3. 2016] Dostupné z: <http://1filter.cz/filtracni-hadice-pro-plyny.html>