



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta textilní



# ČIŠTĚNÍ VODY POMOCÍ NANOVLÁKENNÉ VRSTVY

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B3107 – Textil

*Studijní obor:* 3106R002 – Chemická technologie textilní

*Autor práce:* **Nikifor Asatiani**

*Vedoucí práce:* prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.



## Prohlášení

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

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

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

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

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Nikifor Asatiani**  
Osobní číslo: **T11000632**  
Studijní program: **B3107 Textil**  
Studijní obor: **Chemická technologie textilní**  
Název tématu: **Čištění vody pomocí nanovláknenné vrstvy**  
Zadávací katedra: **Katedra materiálového inženýrství**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rešerše
2. Navrhněte a realizujte zařízení pro kontinuální filtraci pracující s 2D nanovláknennou vrstvou
3. Zařízení otestujte, jako modelový kontaminant vody použijte textilní barvivo
4. Kvantifikujte množství barviva zachyceného na nanovláknenech za různých podmínek pokusu
5. Diskutujte z hlediska možnosti reálného uplatnění v čištění odpadní vody



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **45**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. MALÝ, J.; HLAVÍNEK, P. Čištění průmyslových odpadních vod . 1. vyd. Brno : NOEL 2000 s.r.o., 1996. ISBN 80-86020-05-3.
2. TUČEK, F.; CHUDOBA, J.; KONÍČEK, Z. Základní procesy a výpočty v technologii vody. 2. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988
3. FUJIHARA, K.; Teo, W. et al. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2005.

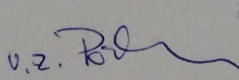
Vedoucí bakalářské práce:

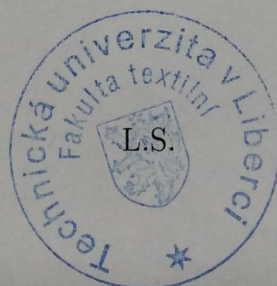
**prof. Ing. Jakub Wiener, Ph.D.**

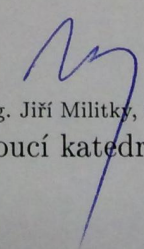
Katedra materiálového inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **14. května 2015**

  
Ing. Jana Drašarová, Ph.D.  
děkanka



  
prof. Ing. Jiří Militky, CSc.  
vedoucí katedry

V Liberci dne 31. října 2014

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěl bych především poděkovat svému vedoucímu prof. Ing. Wienerovi, Ph.D za odborné vedení mé práce, trpělivost a čas který mi věnoval v rámci napsání této práce.

Také děkuji Ing. Yan Wang za pomoc při měření, zpracování vzorků a výpočtech v experimentální části.

Dále chci poděkovat své rodině za jejich podporu po celou dobu mého studia.

**Abstrakt:** Cílem této práce, bylo vyzkoušet vliv různého množství filtračního materiálu a různých koncentrací simulované odpadní vody na vlastnosti filtrace aby zkoumat filtrační mechanismus nanovlákněné membrány z Polyamidu 6. Během práce bylo smontováno zařízení pro zajištění kontinuální slepé filtrace aby zkoumání filtračních schopností membrány bylo flexibilnější a účinnější. Byla použita nanovlákněná membrána z elektrostaticky zvlákněných vláken Polyamidu 6 s plošnou hustotou  $1.26\text{g/m}^2$  jako filtr a různé koncentraci 0.005, 0.01, 0.02 a 0.03g/L barviva Acid Blue 41 byli použity, jako simulovaná odpadní voda. Proces slepé filtrace se prováděl s 1 a 2 vrstvami filtru s různými koncentracemi odpadní vody. Byli spočítáni a jednotlivě porovnány odstranění barviva a relativní rozdíly absorbance. Aby sledovat morfologie filtrů po filtrace byli udělaný snímky ze SEM. Výsledky výzkumu ukázali že nanovlákněná membrána z polyamidu 6 vykonala účinnější odstranění barviva a horší původní účinnost za vyšší koncentraci simulované odpadní vody. Přidání jedné vrstvy mohlo mírně zdokonalit odstranění barviva a původní efektivitu cca o 10%.

**Klíčová slova:** Nanovlákněná; Sorpce; Polyamid 6; Čištění vody.

**Abstract:** The aim of this thesis was to research the impact of different quantity of filter materials and different concentrations of simulated wastewater on the filtration properties in order to study the filtration mechanisms of Polyamide 6 nanofibrous membrane. An apparatus for achieving continual dead-end filtration process was assembled and used in order to explore the filtration properties of membrane more flexibly and efficiently. Polyamide 6 electrospun nanofibrous membrane with areal density  $1.26\text{g/m}^2$  was used as the filter and Acid Blue 41 with different concentrations 0.005, 0.01, 0.02, and 0.03g/L were used as the simulated wastewater in this study. Dead-end filtration process was performed with 1 or 2 layers filters under different concentration of simulated wastewater. Relative absorbance difference and dye removal were calculated and compared respectively and SEM images were taken in order to observe the morphology of filters after filtration. The results showed that polyamide 6 electrospun nanofibrous membrane performed more effective dye removal and worse initial efficiency under higher concentration of simulated wastewater, and adding one more layer could improve the dye removal slightly and initial efficiency around 10%.

**Keywords:** Nanofibers; Sorption; Polyamide 6; Water treatment.

## Obsah

ÚVOD .....	8
Seznam použitých zkratk.....	10
1. TEORETICKÁ ČÁST .....	11
1.1 Čištění textilních odpadních vod.....	11
1.1.1 Voda v textilním průmyslu.....	11
1.1.2 Textilní odpadní vody .....	11
1.1.3 Ukazatelé znečištění vody.....	12
1.1.4 Mechanické způsoby čištění .....	14
1.1.5 Chemické způsoby čištění.....	14
1.1.6 Biologické odbarvení textilních odpadních vod.....	17
1.1.7 Fyzikální způsoby čištění odpadních vod .....	18
1.2 Adsorpce .....	20
1.2.1 Langmuirova rovnice adsorpční izotermy.....	22
1.2.2 Freundlichova rovnice adsorpční izotermy .....	23
1.2.3 Kinetika adsorpce.....	23
1.2.4 Základní charakteristiky adsorbentů .....	24
1.2.5.1 Zrnitost adsorbentů.....	24
1.2.5.2 Pórovitost .....	24
1.2.5.3 Specifický povrch a chemické vlastnosti adsorbentu.....	25
1.2.6 Vliv teploty .....	25
1.3 Nanovlákna .....	25
1.3.1 Úvod.....	25
1.3.2 Elektrostatické zvlákňování (Electrospinning) .....	26
1.3.3 Vlastnosti nanovláken .....	28
1.3.4 Použití .....	29
1.3.5 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály.....	29
1.4 Polyamidová vlákna .....	31
1.4.1 Vlastnosti polyamidových vláken .....	32
1.4.2 Barvení polyamidových vláken.....	33
1.4.2.1 Kyselá barviva (Acid dyes).....	33
1.4.2.2 Kyselá barviva na polyamidových vláknech.....	34
2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	35
2.2 Materiály a zařízení.....	35
2.2.1 Filtr.....	35
2.2.2 Kontaminant.....	36

2.2.3 Přístroje .....	36
2.2.3.1 Elektronový mikroskop.....	36
2.2.3.2 UV-VIS detektor .....	38
2.2.3.4 Software ECOMAC .....	39
2.2.4 Testování.....	40
2.2.5 Výpočty.....	41
3. Závěr .....	54
Seznam tabulek .....	55
Seznam obrázků.....	55
Seznam grafů.....	56
Seznam použité literatury.....	57



## ÚVOD

Industrializace a urbanizace mají velký podíl v překotném zhoršení kvality vody. Vědecké důkazy a výzkumy dokazují, že odpadní vody uvolňující z různých odvětví, např. textil, kůže, barvy, atd. se skládají z nebezpečných toxických látek, z nichž některé jsou známé karcinogeny a další pravděpodobné karcinogeny[3][2]. Textilní průmysl, zejména ten, který je zapojen na procesu finálních úprav, je hlavním spotřebitelem vody a zdrojem značného znečištění. Environmentální výzva pro textilní průmysl je spojena s kapalným odpadem, který má nadvládu nad vzdušnými emisemi a pevným odpadem z hlediska závažnosti vlivů na životní prostředí [3] [1]. Typická textilní firma nebo průmysl vytváří různé druhy odpadních vod, které se liší v kvalitě, a také v rozsahu. Tak například odpadní vody z tiskacích a barvicích jednotek jsou obvykle barevné, spolu se zbytkami reaktivních barviv a chemikálií, proto je nutné pořádné zpracování před zbačením do životního prostředí [3][1][2]. Celková spotřeba barviva z textilního průmyslu celosvětově přesahuje 107kg/rok a odhadem 90% z toho končí na výrobkách. Následkem, více než 106 kg barviv za rok jsou textilními fabrikami vypouštěny do odpadních vod. [AMY]. Dalšími průmyslovými odvětví, které využívají barviva, jako jsou: plastikářský průmysl, výroba papíru, výroba barviv, kosmetický průmysl, petrochemie, farmaceutický průmysl, výroba kosmetiky atd. [1]. Vypouštění některých barviv do toků vede k vážným environmentálním vlivům, hodně barviv způsobují zdravotné problémy jako je alergická dermatitida, rakovina, podráždění kůže, a také mutaci u člověka. [2][1].

Kromě toho, barviva absorbují sluneční záření ve vodním médiu, což vede k zabránění fotosyntézy vodních rostlin. Z výše uvedených důvodů odstraňování barviv z odpadních vod získalo velký význam a přitahuje velké množství výzkumných aktivit [1][2]. Zvýšení koncentrace barviv dělá vody nevhodnými pro domácí nebo průmyslové účely, snížením propustnosti, barviva omezují růst rostlin a procesy samočištění. Navíc oni vyvíjejí nepříznivý vliv na život ryb [2]. Odstranění barviv konvenčními způsoby úpravy, jako je ozonizace, bělení, peroxid vodíku/UV, elektrochemické techniky nejsou dostačující vzhledem k tomu, že většina textilních barviv má komplexní aromatické molekulární struktury, které jsou odolné vůči degradaci [2] [1]. Tato barviva jsou odolná vůči světlu, oxidačním činidel a

aerobnímu trávení. Z těchto důvodů potřeba pro efektivnější zpracování přitahuje pozornost na použití membránových technik za tlaku. Membránová filtrace umožňuje nejen vysokou účinnost odstranění, ale také umožňuje opětovné použití vody a některé z cenných složek odpadu (obzvláště barviv). Ultrafiltrace byla úspěšně použita pro recyklaci barviv s vysokou molekulární hmotností a nerozpustných barviv (např. disperzních), přídavných chemikálií (polyvinylalkohol) a vody [2].

Nicméně, ultrafiltrace neodstraňuje barviva rozpustné a s nízkou molekulovou hmotností (kyselá, přímá, reaktivní a bazická), však efektivní odstranění barvy bylo dosaženo nanofiltrací. Vzhledem k citlivosti membrány ke znečištění, adsorpce najde uplatnění v terciární čištění odpadních vod jako lešticí krok před úplným vypouštěním [2]. Nanofiltrační (NF), membrána je tlakově řízená membrána s vlastnostmi mezi reverzní osmózou (RO) a ultrafiltrační (UF) membránou. Existuje několik výhod spojených s použitím NF, jako je vysoký průtok, vysoká úroveň zadržování molekul, nízký provozní tlak, nízké investice a nízké náklady na údržbu [3].

Během výzkumní práce se budou používat nanovláknenné membrány z elektrostaticky zvlákněných vláken polyamidu 6, existuje řada důvodů, proč by se měli používat tyto elektrostaticky membrány. O některých se zde zmíníme. Za prvé, jednou z nejvýznamnějších charakteristik nanovláken je velmi vysoký podíl povrchové plochy na jednotku hmotnosti nebo spíše velký poměr povrchové plochy k objemu (až 105 v porovnání se standartními vlákny) [5] [4]. Elektrostaticky zvlákněná nanovláknenná membrána představuje vynikající propustnost kyslíku, odpařování řízené kapaliny a povýšený odtokový výkon tekutiny a zároveň zbrzdění vpádu kyslíkatých mikroorganismů, protože má ultrajemné póry [5].

Aby prozkoumat účinek různých množství filtračních materiálů a různých koncentrací simulované odpadní vody na filtrační vlastnosti a mechanismy nanovláknenné membrány z polyamidu 6, filtrační postup se prováděl s 1 a 2 vrstvami membrány při 4 různých koncentracích simulované odpadní vody.

### **Seznam použitých zkratk**

TPP - textilní pomocné prostředky

PVAL – polyvinylalkohol

PA- polyamid

BM – bez membrány

UV – ultrafialové záření

dpi (dots per inch) – počettečeknaúsečcdlouhéhojedenpalec

VIS - viditelná část spektra

Nm–nanometr

CHSK<sub>Cr</sub> - chemická spotřeba kyslíku stanovená dichromanem draselným

BSK<sub>5</sub> - biochemická spotřeba kyslíku za pět dní

# 1. TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Čištění textilních odpadních vod

### 1.1.1 Voda v textilním průmyslu

Voda plní v textilním průmyslu několik funkcí současně. Aby textilním výrobkům mohly být dodány požadované užitkové vlastnosti, jako je bělost, barevnost, příjemný omak, savost, vodoodpudivost, nemačkavost a další je nutné nejprve získat textilní surovinu v co možná nejčistější formě. K izolaci textilních vláken od nečistot, ať již přirozených nebo doprovodných, se používají vodní lázně, v nichž se nečistoty rozpouštějí, suspendují nebo emulgují, a tak se odstraňují.

Další funkci plní voda jako rozpouštědlo pro chemikálie, jimiž se na textilie působí, a tím se mění jejich vlastnosti. At již jde o sloučeniny napomáhající uvolňování nečistot nebo o barvicí lázně či o roztoky apretačních TPP. Jako rozpouštědlo slouží voda také při praní, které se provádí po každé technologické operaci a jehož účelem je odstranit nevyužitě zbytky zušlechťovacích lázní. Voda má také funkce teplotního média. Mnoho užívaných chemických reakcí probíhá teprve při vyšší teplotě nebo potřebují vyšší teplotu, aby probíhaly dostatečnou rychlostí.

V nedávné minulosti se ve světě projevila snaha nahradit vodu např. v textilním zušlechťování organickými rozpouštědly. Po počátečním optimismu se však projevily nedostatky tohoto řešení (cena, nemožnost 100%ní regenerace) a až několik málo případů zůstala voda v textilním zušlechťování nezastupitelná.

Textilní výroba stále zůstává na vodě závislá a její rozvoj je mnohde vodními zdroji limitován. Přesto že se voda ve výrobě v podstatě nespotebovává, je nutno ji považovat za současného stavu za nenahraditelnou surovinu a je třeba s ní přiměřeně hospodařit.

[9][7]

### 1.1.2 Textilní odpadní vody

V textilních závodech se vyskytuje několik druhů vod, které se významně liší svými vlastnostmi.

Nejčastěji se vyskytující druhy jsou:

- technologické odpadní vody
- splaškové vody
- srážkové vody

Hlavní znečištění je obsaženo v technologických vodách. Podle zdrojů znečištění připadá největší podíl na zpracování surového materiálu, především vlny, lnu a bavlny. Hlavními zdroji znečištění odpadních vod je praní surového materiálu, bělení, barvení, potiskování a finální úpravy. Významnou složkou textilních odpadních vod jsou tenzidy, které jsou přítomny prakticky ve všech stupních zpracování vláknitých materiálů. [7]

### 1.1.3 Ukazatelé znečištění vody

Nedílnou součástí hospodaření s vodou je sledování jejího chemického složení. Každý producent odpadních vod je povinen sledovat odcházející znečištění. Sledují se tyto základní ukazatelé znečištění vody:

- teplota
- pH vody
- $\text{CHSK}_{\text{Cr}}$  - chemická spotřeba kyslíku stanovená dichromanem draselným
- $\text{BSK}_5$  - biochemická spotřeba kyslíku za pět dní
- nerozpuštěné a rozpuštěné látky
- dusík a fosfor [7]

Většina odpadních vod obsahuje velkou směs různých organických látek. Kvantitativní a kvalitativní stanovení jednotlivých sloučenin by bylo velmi pracné a zdlouhavé. Proto se obvykle stanovuje skupina příbuzných látek podle standardu.

Mezi skupinová stanovení patří i metody, kterými se stanovuje suma všech organických látek pomocí kyslíku, spotřebovaného na jejich oxidaci. [11]



## Stanovení chemické spotřeby kyslíku CHSK

CHSK je mírou organického znečištění vody a vyjadřuje obsah organických látek schopných chemické oxidace za definovaných reakčních podmínek. Výsledky se udávají v množství kyslíku, které je ekvivalentní spotřebě použitého oxidačního činidla. K oxidaci organických látek se používá:

- manganistan draselný  $\text{KMnO}_4$
- dichroman draselný  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

A proto se rozlišuje  $\text{CHSK}_{\text{Mn}}$  a  $\text{CHSK}_{\text{Cr}}$ , však pro odpadní vody se používá především  $\text{CHSK}_{\text{Cr}}$  (dichromanová metoda). [7][11]

## Stanovení biochemické spotřeby kyslíku BSK<sub>5</sub>

Hodnota BSK<sub>5</sub> je nejpoužívanějším ukazatelem organického znečištění odpadních vod. Společnou vlastností těchto stanovitelných látek je schopnost podléhat biologickému rozkladu.

Biochemická spotřeba kyslíku je definována jako množství kyslíku spotřebovaného mikroorganismy při biochemických pochodech na rozklad organických látek ve vodě při aerobních podmínkách.

Stanovení BSK<sub>5</sub> spočívá ve stanovení obsahu rozpuštěného kyslíku v nultý den a po pěti dnech. Z poklesu koncentrace kyslíku se usuzuje na obsah biochemicky rozlišitelných látek.

## Stanovení pH

Hodnotu pH je definována jako záporně vzatý dekadický logaritmus aktivity vodíkových iontů v roztoku. Nabývá hodnot 1 až 14 – je mírou kyselosti nebo zásaditosti roztoku. Měření hodnoty pH se provádí měřením potenciálů měrné a referenční elektrody ponořených do měřeného roztoku. [13]

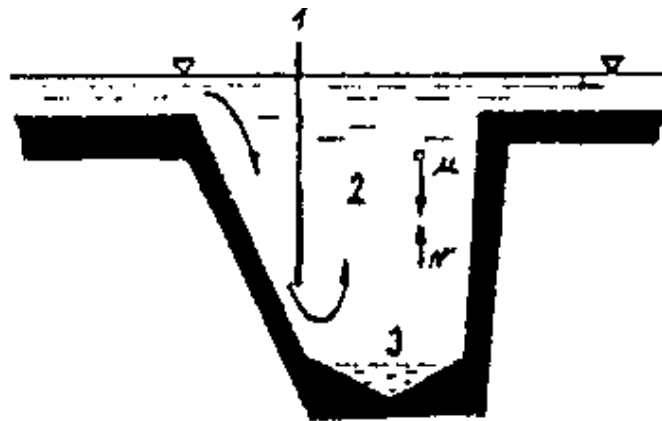
K čištění odpadních vod se používají **mechanické, fyzikální, chemické a biologické postupy**.

### 1.1.4 Mechanické způsoby čištění

Mechanické postupy jsou založeny na cezení vody, na sedimentaci látek těžších než voda a na vzplývání látek lehčích než voda. Investičně jsou mechanické způsoby čištění nejlevnější a tvoří základ všech čistíren. K čištění se používají česle, lapače písku, lapače tuku, síta a usazovací nádrže.

K čištění se používají:

- česle
- lapače písku
- lapače tuku
- síta
- usazovací nádrže



Obr. 1 Vertikální lapač písku [7]

1 - normá stěna, 2 - usazovací pasta, 3 - písek, u - usazovací rychlost, v - vstupní rychlost

Norná stěna (1) mění směr průtoku vody nejprve ke dnu a za nornou stěnou opět o 180° C, načež stoupá směrem vzhůru. Doba zdržení v usazovacím prostoru má být při maximálním průtoku asi 2 minuty. Usazený písek se shromažďuje v kalovém prostoru (3).

### 1.1.5 Chemické způsoby čištění

Chemické metody využívají:

- neutralizaci
- srážení
- oxidaci a redukci

## **Neutralizace.**

Neutralizací se rozumí chemická reakce mezi kyselinou a zásadou, při které reagují vodíkové a hydroxylové ionty za vzniku molekul vody.

Při neutralizační reakci silné kyseliny se silnou zásadou reaguje vzniklý roztok soli neutrálně, ale sebemenší nadbytek neutralizačního činidla způsobí prudkou změnu pH směrem k hodnotě pH neutralizačního činidla. Při neutralizační reakci mezi slabou kyselinou a silnou zásadou nebo silnou kyselinou a slabou zásadou je rychlost změny pH v závislosti na přídatku neutralizačního činidla podstatně nižší.

### **Neutralizace může být prováděna:**

1. **Vypouštěním odpadních vod do toku.** Kyseliny z odpadních vod jsou přítomně neutralizovány hydrogenuhlíčitany přítomnými v říční vodě. Tuto metodu lze použít pouze pro neutralizaci malých množství kyselých odpadních vod.
2. **Mícháním kyselých a zásaditých odpadních vod.** Tuto metodu lze s výhodou použít tehdy, vznikají-li v jednom podniku vody kyselé i alkalické. Většinou se neutralizace provádí ve vyrovnávací nádrži s usazováním.
3. **Přídavkem dalších chemikálií,** např. neutralizace kyselých odpadních vod hydroxidem vápenatým. [7]

## **Chemická oxidace a redukce**

Při čištění některých typů odpadních vod je někdy vhodné použít k likvidaci nebo k inaktivaci nežádoucích látek chemické oxidace či redukce. K oxidaci dochází tehdy, když daný iont či atom elektrony ztrácí, při redukci naopak elektrony přijímá. Kolik elektronů iont či atom ztrácí či přibere, o tolik se změří jeho oxidační stupeň.

Obecné požadavky na oxidační a redukční činidla jsou:

- vysoká rychlost a účinnost reakce
- nízká cena
- snadná manipulace
- nízká toxicita a tvorba reziduí.

Pro chemickou oxidaci se používají nejčastěji tato činidla:

- sloučeniny chloru (plynný chlor, chlornan sodný a vápenatý, oxid chloričitý)
- ozon nebo směs ozonu a vzduchu
- manganistan draselný
- peroxid vodíku

### **Čiření.**

Čiření je proces používaný pro odstranění koloidních, příp. jemně suspendovaných částic z vody. Jeho podstatou je dávkování roztoků hydrolyzujících solí, např. železitých, hlinitých nebo železnatých, které reakcí s vodou poskytují příslušné hydroxidy. Tyto částice hydroxidu reagují s částicemi nečistot obsaženými v čištěné vodě a vytvářejí vločky, které lze odstranit mechanickými způsoby.

Čiření je komplexní děj složený z řady dílčích procesů vzájemně na sobě závislých. Dílčí procesy jsou závislé na pH, Iontové síle, teplotě, oxidačně-redukčním potenciálu vody a koncentraci separovaných částic.

Proces čiření lze rozdělit na tyto na sebe navazující etapy:

- 1) Dávkování chemikálií a jejich promísení s vodou.
- 2) Neprodleně po promísení dochází ke koagulaci – destabilizaci koloidního systému.
- 3) Flokulace, při níž vznikají nejdříve mikrovločky.
- 4) Kdy částice dosahují velikosti nad 1 $\mu$ m dochází k jejich další agregaci za tvorby makrovloček.
- 5) Oddělení vloček koagulantu s adsorbovanými nečistotami od vyčiřené vody.[8]

Účinnost mechanicko-chemických čistíren odpadních vod závisí na charakteru čištěné vody a na provozních podmínkách. Průměrné hodnoty, dosahované na odstavných a průtočných čistírnách jsou uvedeny v tab. 1. [7][10]

PARAMETR	ÚČINNOST [%]
BSK <sub>5</sub>	40
CHSK <sub>Cr</sub>	30
Odbarvení	45-75

**Tab. 1** Průměrná účinnost mechanicko-chemických čistíren[9]

### **1.1.6 Biologické odbarvení textilních odpadních vod**

Zbytky barviv, které byly nevyužity při barvení a tisku textilních materiálů způsobují barevnost textilních odpadních vod. Do odpadních vod se dostávají ve formě vyčerpaných barvicích lázní, zbytků tiskacích past nebo z následného praní. Přesto že barviva představují pouze zanedbatelnou část vypouštěného znečištění, jako jediná složka jsou zjistitelná pouhým okem i ve velmi nízkých koncentracích, a proto vyvolají negativní reakce jako provozovatelů čistíren odpadních vod, tak laické veřejnosti.

Biologické čištění odpadních vod je biologický proces, při kterém se využívá schopností mikroorganismů rozkládat a postupně mineralizovat organické látky obsažené v odpadních vodách. Mikroorganismy využívají těchto organických látek jako potravy (substrátu).

Biologické čištění je rozšířenou technologií z hlediska odstranění organického znečištění odpadních vod. Však vůči barvivům z výroby textilií, které jsou biologicky nerozložitelná, je biologické čištění praktické neúčinné. V provozních podmínkách účinnost dosahuje cca 5%. Organická barviva přítomná v odpadních vodách jsou za aerobních podmínek biologicky nerozložitelná. Rozkládají se ale za podmínek anaerobních. Proto za obecných podmínek aerobního čištění se využívají procesy bioflokulace nebo sorpce. Nicméně barviva jsou pouze sorbována a při odvodnění kalů se často uvolňují zpět do kalové vody. [12][9]



### **1.1.7 Fyzikální způsoby čištění odpadních vod**

Významného průmyslového využití dosáhly **elektrodialýza, ultrafiltrace a reverzní osmóza**.

#### **Elektrodialýza**

Elektrodialýza je jev, při kterém nastává transport iontu rozpuštěného elektrolytu membránou pod vlivem elektrického pole vloženého na membránový systém. Separace iontů z roztoků lze dosáhnout použitím měničů iontů. Membránou měničů iontů je tenký, pevný film obsahující výměnné skupiny s kladným nábojem (anexové membrány) nebo s záporným (katexové membrány). [7]

#### **Reverzní osmóza**

Osmóza je samovolné přecházení rozpouštědla z roztoku zředěnějšího do roztoku koncentrovanějšího přes membránu propouštějící pouze molekuly rozpouštědla, nikoli molekuly rozpuštěných látek.

Působíme-li však na koncentrovanější roztok tlakem, tok rozpouštědla membránou se zpomaluje, až při určitém tlaku (tzv. osmotickém) se zastaví. Dalším zvyšováním tlaku začne rozpouštědlo proudit v obráceném směru a dochází k obrácené (reverzní) osmóze.

Provozní aplikace reverzní osmózy v čistírně odpadních vod pro zušlechťování není známa. Jednotlivá zařízení slouží buď jako čisticí stupeň zařazený přímo u příslušného stroje, nebo jde o poloprovozní zařízení, která byla odzkoušena, ale nebyla realizována provozně. [7]

#### **Nanofiltrace**

Nanofiltrace je poměrně mladým oborem z tlakových membránových procesů a stojí mezi ultrafiltrací a reverzní osmózou. Je vhodná pro zachycení částic velikosti přibližně od 1 do 10nm, tedy řady rozpustných organických sloučenin, jako jsou cukry a částečně i soli. Tak umožňuje současné zkoncentrování roztoků organických látek a jejich částečné odsolení, neboť propustnost solí je výrazně vyšší než u reverzní osmózy.

Příkladem použití je odsolení barviv, které přítomností solí ztrácejí na kvalitě.

Dalším příkladem je využití nanofiltrace pro čištění odpadní vody z organických syntéz, charakterizovaných vedle vysokého organického znečištění se stovkami různých sloučenin, v mnoha případech biologicky nerozložitelných i značnou koncentrací solí, jejichž přítomnost podminuje korozivní vlastnosti těchto vod a tím ztěžuje použití jiných metod jejich zpracování. [8]

### Ultrafiltrace

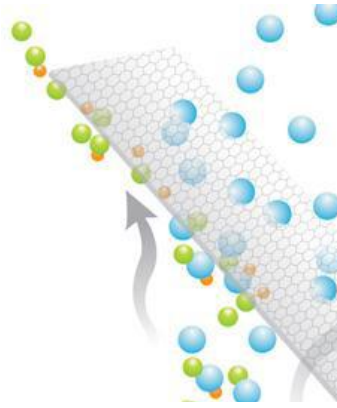
Ultrafiltrace je proces podobný reverzní osmóze. Liší se porozitou použitých membrán, účinností separace látek z roztoku a použitým tlakem. Ultrafiltrací se zadržují látky s relativní molekulovou hmotností 500 až 500 000, přičemž mechanismus jejich odstraňování spočívá v tzv. síťovém efektu.

Nejširšího provozního uplatnění dosáhla ultrafiltrace při rekuperaci šlichtovacích přípravků na bázi polyvinylalkoholu, karboxymethylcelulózy, akrylátů apod. [7]

### **1.2 Sorpce**

Sorpce je proces, při kterém dochází jak k adsorpci, tak k absorpci, popř. také k chemické reakci nebo jinému vázání sorbentu. Při **absorpci** je jedna z fází zachycena nejen na povrchu pevné fáze, ale také proniká do celého objemu.

Na rozhraní vzájemného styku pevné fáze s kapalnou či plynnou fází vzniká specifická oblast tzv. **fázového rozhraní**. V této oblasti může dojít ke zvýšení koncentrace kapalně či plynné fáze, hovoříme tedy o **adsorpci**. [14]

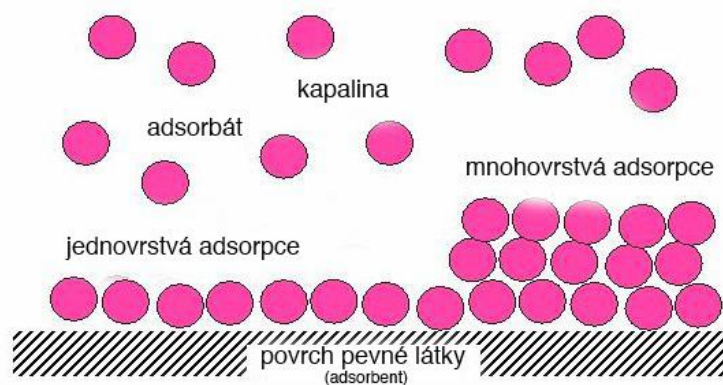


**Obr. 2** Rozdíl mezi adsorpcí a absorpcí [21]

Na obrázku č. 2 je vidět, že různé částice (zelené, oranžové a modré) jsou adsorbovány na povrchu sorbentu, ale jenom modré částice pronikají (absorbují) dovnitř sorbentu, ostatní částici se jen shromažďují na povrchu.

### 1.2.1 Adsorpce

**Adsorpce** je separační proces, jehož principem je adsorpce rozpuštěné látky (**adsorbátu**) na povrchu pevné látky (**adsorbentu**) účinkem mezipovrchových přitažlivých sil. [19] Během adsorbce rozpuštěné látky jsou transportovány k granulovanému pórovitému adsorbentu difuzí a následně se adsorbují na vnitřní povrch adsorbentu. A proto musí mít adsorbent co největší povrch. Jako adsorbenty se používají pórovité a práškové materiály. [15]



**Obr. 3** Proces adsorpce [20]

Podle povahy sil poutajících adsorbát na adsorbentu rozdělujeme adsorpci na: fyzikální adsorpci, chemickou adsorpci a elektrostatickou adsorpci, nazývaná obvykle výměna iontů, pokud je vratná.

- **Fyzikální adsorpce (fyzisorpce)** - její podstatou jsou van der Waalsovy mezimolekulární síly. Na tuhé fázi se může vytvořit i několik vrstev adsorbátu, a může být proto dosaženo značné adsorpční kapacity.
- **Chemická adsorpce (chemisorpce)** – adsorbát se poutá chemickými vazbami (obvykle kovalentními) a koordinační číslo adsorbentu se doplňuje na maximum. Proto je tento typ adsorpce o hodně silnější než předchozí. Částečně se může narušit chemická vazba mezi atomy v adsorbátu. [15]

U většiny adsorpčních dějů se uplatňují různé typy adsorpce a jejich podíl na konečném výsledku je obtížné přesně vymezit.[8]

Adsorbenty se rozlišují se buď podle polaritě, nebo podle kyselosti. Z hlediska molekulové adsorpce se rozlišují **polární adsorbenty** (silikagel, hydratované oxidy, hlinitokřemičitany) a **nepolární adsorbenty** (aktivní uhlí). Polární adsorbenty lépe sorbují polární sloučeniny a naopak. Z hlediska iontové adsorpce se někdy rozlišují zásadité adsorbenty (např. hydratované oxidy) a kyselé adsorbenty (silikagel, křemičitany). Chování adsorbentů z hlediska jejich „kyselosti“ nebo „zásaditosti“ závisí na hodnotě pH nulového bodu náboje a na hodnotě pH prostředí. [16] Také se adsorbenty rozdělují na přirozené a syntetické (umělé). Mezi přirozené patří např.

zeolity, hlinky, saze atd. Ze syntetických adsorbentů jsou to aktivní uhlí, silikagel, oxid hlinitý, oxid titaničitý, porézní sklo nebo kovy v jemně práškovité formě. [17]

Znečištění povrchu může značně ovlivňovat adsorpční vlastnosti pevných adsorbentů. Adsorbenty se čistí extrakcí (vodou, vodnými roztoky kyselin, organickými rozpouštědly), a tím se odstraní hlavně tuhé nečistoty. Evakuací za současného zahřátí na vysokou teplotu se dá odstranit většinu plynných a kapalných látek adsorbovaných na povrchu. Při zahřívání během čištění je třeba dbát na to, aby nedošlo ke slnutí pórů, změně struktury apod. [17]

Z fyzikálně chemického hlediska se k popisu adsorpce nejčastěji používají adsorpční izotermy, které charakterizují stav když adsorbent s adsorbátem se nachází v rovnováze. Však z praktického hlediska je důležitá i znalost hodnot základních parametrů dynamiky ustavování adsorpční rovnováhy.

Při styku tuhé fáze s roztokem látky se rozpuštěná látka postupně hromadí na povrchu tuhé fáze. Koncentrace látky v kapalně fázi klesá až do okamžiku, kdy její koncentrace v roztoku a na povrchu adsorbentu jsou v rovnováze. Závislost adsorbovaného množství na koncentraci rozpuštěné látky v roztoku za rovnováhy při konstantní teplotě vyjadřuje tzv. adsorpční izoterma. K jejímu matematickému popisu se nejčastěji používá Freundlichovy a Langmuirovy rovnice. [16]

### 1.2.2 Langmuirova rovnice adsorpční izotermy

Langmuirův model adsorpčního děje předpokládá, že povrch adsorbentu je inertní s konečným počtem adsorpčních center, která jsou všechna stejná a adsorpční teplo, které se při adsorpci uvolňuje není závislé na adsorbovaném množství  $a$ . Na základě této představy byl formulován (s ohledem na možnost linearizace a následné zpracování experimentálních dat lineární regresí) vztah, který se pro adsorpci z vodných roztoků obvykle uvádí ve tvaru:

$$a = a_{max} \frac{b c_r}{1 + b c_r} \quad (1)$$



kde  $a$  je adsorpční kapacita v mol g<sup>-1</sup>, resp. v g g<sup>-1</sup>,  $a_{max}$  je maximální adsorpční kapacita (maximální absorbované množství) ve stejných jednotkách,  $c_r$  je rovnovážná koncentrace adsorbované látky v mol g<sup>-1</sup>, resp. v g l<sup>-1</sup> a  $b$  je konstanta. [15][16]

### 1.2.3 Freundlichova rovnice adsorpční izotermy

Freundlichův model vychází z podobných předpokladů jako model Langmuirův, ale na rozdíl od něho předpokládá, že adsorpční teplo je závislé na adsorbovaném množství  $a$ . Na základě této představy byl formulován (zase s ohledem na snadnou možnost linearizace a následné zpracování experimentálních dat lineární regresí) vztah, který se pro adsorpci z vodných roztoků obvykle uvádí ve tvaru:

$$a = kc_r^n \quad (2)$$

kde  $k$  a  $n$  jsou konstanty ( $0 < n < 1$ ),  $a$  a  $c_r$  mají stejný význam jako v rovnici Langmuirově. [15][17]

### 1.2.4 Kinetika adsorpce

Rychlost odstraňování rozpuštěných látek čili kinetika adsorpce je závislá na rychlosti několika na sebe navazujících dějů, a to

- 1) transport látek k povrchu adsorbentu (vnější difúze),
- 2) průnik adsorbátu do mikropórů adsorbentu (vnitřní difúze),
- 3) vlastní adsorpce [8]

U kontaktních nádrží s vysokým stupněm promíchání, zvláště pak při adsorpci ze zředěných roztoků a výměnné iontové adsorpci, je nejčastěji limitujícím krokem rychlost difúze v pórech.[18]U kontinuálních průtočných systémů, u nichž čištěná voda prochází vrstvou adsorbentu, bývá časově limitujícím dějem rychlost difúze k povrchu adsorbentu. [8]

### 1.2.5 Základní charakteristiky adsorbentů

Adsorbenty se blíže definují nejčastěji zrnitostí, pórovitostí, specifickým povrchem a některými chemickými vlastnostmi.

#### 1.2.5.1 Zrnitost adsorbentů

Velikost částic adsorbentů se zpravidla určuje síťovou analýzou. Síťová analýza se používá u částic větších než 0,05 mm. Princip síťové analýzy je dost jednoduchý. Vzorek adsorbentu se po určité době prosévá soustavou normalizovaných sít s různou velikostí. Pro tuhé částice adsorbentu o velikosti cca 0,002 až 0,005 mm lze použít sedimentační analýzu. Vzorek se suspenduje ve vodě a měří se zastoupení částic podle jejich usazovacích rychlostí. Ze známé hustoty adsorbentu můžeme určit příslušné ekvivalentní průměry částic. Nejspolehlivější určení velikosti částic adsorbentů lze dosáhnout pomocí měření pod mikroskopem. Však tato metoda je poměrně instrumentálně náročná. [18]

#### 1.2.5.2 Pórovitost

Pórovitost je určena celkovým objemem pórů  $V_p$  v hmotnostní jednotce látky. Udává se obvykle v  $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ . Pórovitost  $P_a$  je definována jako podíl celkového objemu pórů  $V_p$  k celkovému objemu zrn  $V_z$ , při vyloučení volného prostoru mezi zrny.

Vyjádřuje se v procentech:

$$P_a = \frac{V_p}{V_z} \cdot 100 \quad (3)$$

Vlastnosti tuhých látek závisí kromě pórovitosti také do značné míry i na velikosti pórů.

Zastoupení pórů podle velikosti se stanovuje pomocí rtuti tzv. rtuťová pyrometrie. Tato metoda je nejpoužívanější ze všech existujících metod. Princip rtuťové pyrometrie spočívá v postupném zvyšování tlaku za stálého měření objemu rtuti vtlačené do pórů. [18]

### **1.2.5.3 Specifický povrch a chemické vlastnosti adsorbentu**

Specifický povrch udává plochu povrchu hmotnostní jednotky adsorbentu. Udává se v  $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ . Při stanovení specifického povrchu se využívají metody založené na určování počtu molekul tvořících monomolekulární vrstvu. [18] Z chemických vlastností má velký význam zejména polarita adsorbentu. Ta určuje, do jaké míry bude ovlivňovat polarita adsorbátu a schopnost jeho adsorpce. Čím je adsorbent polárnější, tím větší bude mít tendenci adsorbovat látky polárního charakteru a naopak čím je méně polární, tím menší vliv bude mít polarita adsorbátu na dosažený výsledek adsorpce. Záleží na poměru počtu polárních a nepolárních míst na povrchu adsorbentu. [8]

### **1.2.6 Vliv teploty**

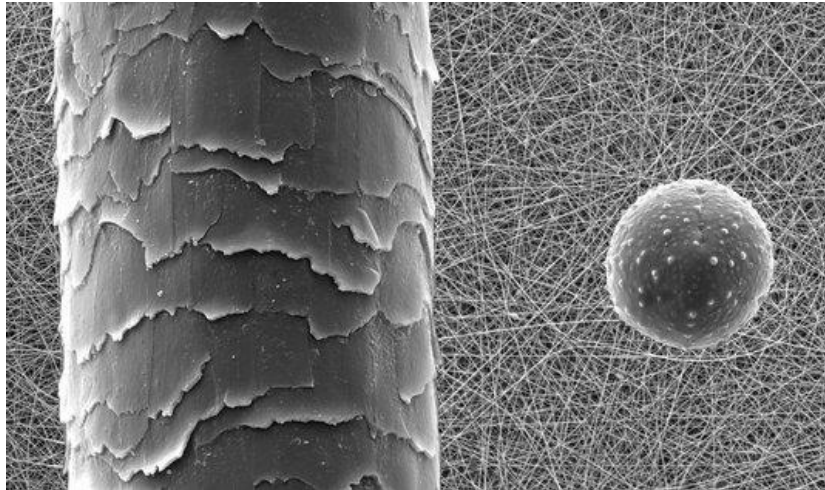
Teplota má pozitivní vliv na rychlost adsorpce. Neboť se snižuje viskozita kapaliny a zvyšuje se rychlost difuze. To má význam při adsorpci z plynného prostředí, kde je třeba dosáhnout rychle rovnováhy. Při adsorpci z kapalného (vodného) prostředí je tento faktor méně významný. Celkově adsorbované množství látky se při zvyšování teploty poněkud snižuje. [8]

## **1.3 Nanovlákná**

### **1.3.1 Úvod**

Nejjednodušší definice nanovláken je, že jde o vlákna o průměru menším než 1000nm (nanometr = 1 miliardtina metru). Poněkud ostřejší definice je, že jde o vlákna

s průměrem pod 1000nm a s poměrem jejich délky k průměru větším než 50. Nanovláknna se dají vyrobit několika způsoby – elektrostatickým zvlákňováním, zvlákňováním z tavenin, dále např. metodami electroblowing a centrifuge spinning. Nejčastěji se pro výrobu nanovláken používá tak zvaná metoda elektrostatického zvlákňování (anglicky Electrospinning). Jedná se o výrobu vláken z roztoku či taveniny za přítomnosti elektrostatického pole. [23][22][24].



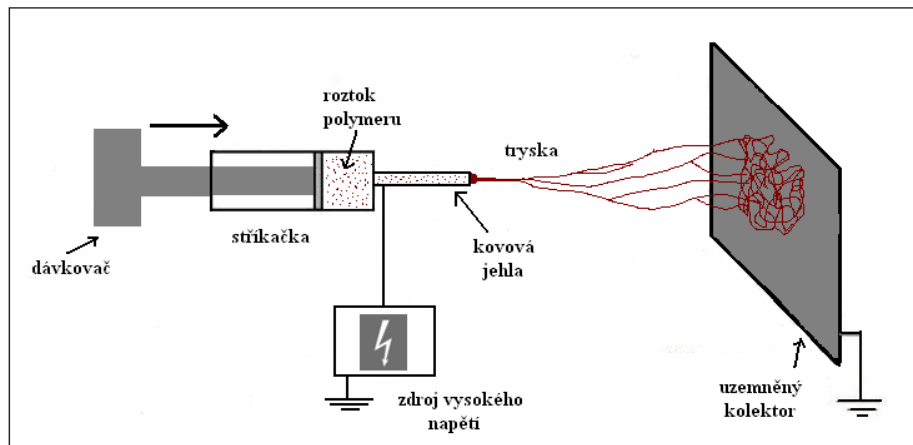
**Obr. 4** Porovnání velikosti lidského vlasu, pylového zrna a nanovláken [28]

### **1.3.2 Elektrostatické zvlákňování (Electrospinning)**

V současnosti existuje jediná metoda výroby nanovláken, kterou lze aplikovat na průmyslovou výrobu, a to je metoda elektrostatického zvlákňování, při které se používá roztok polymeru jako zdroje pro tvorbu. Princip této metody je znám již od počátku 20. století. Tato metoda umožňuje vytvářet velmi jemná vlákna s průměry v rozsahu mezi 100 - 500nm a plošná hmotnost vrstvy tvořené nanovláknnyobvykle se pohybuje kolem  $0,1 - 5 \text{ g.m}^{-2}$ . [23] [24].

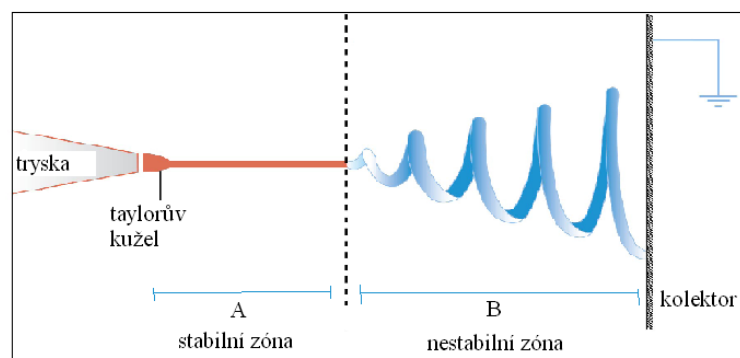
V procesu elektrostatického zvlákňování (viz obr.5) je využito vysoké napětí k vytvoření elektricky nabitého proudu polymerního roztoku nebo taveniny. Elektroda vysokého napětí je spojena přímo s polymerním roztokem. Roztok je následně zvlákňován kapilárou (zvlákňovací tryskou). Díky vysokému elektrickému napětí mezi špičkou

kapiláry a uzemněným kolektorem vzniká tzv. Taylorův kužel (viz obr.6) na špičce kapiláry, z kterého jsou produkována submikronová vlákna.



**Obr. 5** proces elektrostatického zvlákňování [23]

Taylorův kužel je následkem relaxace indukovaného náboje k volnému povrchu kapaliny na výstupu ze zvlákňovací trysky. Následuje vytlačování nabité kapaliny. Vlákna ztuhnou po odpaření rozpouštědla a vytvoří vláknennou vrstvu na povrchu kolektoru. Nabitý proud se zrychluje a ztenčuje v elektrickém poli, nakonec narazí na uzemněnou protielektrodu kolektoru, na které se usadí. Za jistých podmínek se kapalinový proud stává nestabilním před dosažením kolektoru [29].



**Obr.6** zvlákňovací prostor [23]

### 1.3.3 Vlastnosti nanovláken

Výhody nanovláken lze zhruba rozdělit do pěti skupin: Velký měrný povrch vláken, možnost využití jako nosiče aktivních látek, malé póry, malý průměr a malé množství použitého materiálu.

- **Obrovský měrný povrch**

Specifický (měrný) povrch je povrch vlákna na jednotku hmotnosti [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ] a je tím větší, čím je menší jemnost vlákna. [6] Čím větší je povrch použitého filtračního materiálu, tím se zvětšuje pravděpodobnost interakce mezi ním a zachytávanými částicemi. Z toho důvodu se pro filtrační aplikace používají vlákna tvarovaných průřezů, nebo malých průměrů vyráběná například technologiemi meltblown, flash spinning a zvlákňování bikomponentních vláken. Využití nanovláken je v tomto kontextu dalším krokem ke zvýšení měrného povrchu. [25]

- **Průměr vláken**

Průměr v zásadě definuje nanovláknem, protože zrovna tato veličina se ohledně vláken pohybuje v rozsahu nanometrů. Malý průměr vlákna vytváří vlákna velmi ohebná proti vláknům klasickým. Nízká délková hmotnost a ohebnost vedou také k mnohonásobně větší tepelné izolaci a splývavosti z nich vyrobených textilií. [26]

- **Malá velikost pórů**

Pro filtraci částic v kapalinách je klíčovým faktorem síťový mechanismus a tedy velikost pórů. Struktura nanovláknenné vrstvy umožňuje vykazovat velikost pórů řádově v jednotkách mikrometrů, ale na katedře netkaných textilií bylo zjištěno, že lze posunout tuto hranici až na 100nm.

- **Malé množství potřebného materiálu**

Pokusně bylo zjištěno, že pro dosažení vhodných filtračních vlastností stačí nanovláknenná vrstva o plošné hmotnosti  $0,5 - 5 \text{ g/m}^2$ . Tato vrstva má tloušťku cca 10 - 30  $\mu\text{m}$ . Tento fakt umožňuje snížit nároky na objem filtru a některá bezpečnostní rizika (např. hořlavost)

- **Nosič aktivních látek**

Příkladem využití aktivních látek je inhibice růstu zachycených bakterií. Pokud bakterie pouze zachytíme, mohou postupně prorůstat mezi vlákny a časem kontaminovat čistou stranu filtru. Pro praktickou realizaci procesu filtrace s aktivními látkami je nutné

zajistit stabilní ukotvení katalyzátoru a zároveň co nejlepší kontakt katalyzátoru s likvidovanou látkou. Běžným způsobem ukotvení je nános katalyzátoru na membránový filtr. Nevýhodou je však malá propustnost membránového filtru a tím vysoká energetická náročnost procesu. V případě rozptýlení katalyzátoru ve hmotě nanovláken se uplatní jejich vysoký měrný povrch a porézní struktura s relativně dobrou propustností kapaliny. [25]

#### 1.3.4 Použití

Využití nanotechnologií a nanomateriálů je velmi rozsáhlé. Dále je uvedeno jen několik příkladů oblastí použití:

- **elektronika** (paměťová média, spintronika, bioelektronika, kvantová elektronika)
- **textilní průmysl** (nemačkávé, hydrofóbní a nešpinící se tkaniny)
- **zdravotnictví** (cílená doprava léčiv, umělé klouby, chlopně, náhrada tkání, desinfekční roztoky nové generace, analyzátory, ochranné roušky)
- **chemický průmysl** (nanotrubice, nanokompozity, selektivní katalýza, aerogely)
- **automobilový průmysl** (nesmáčivé povrchy, filtry čelních skel),
- **kosmický průmysl** (katalyzátory, odolné povrchy satelitů)
- **vojenský průmysl** (nanosenzory, konstrukční prvky raketoplánů),
- **životní prostředí** (odstraňování nečistot, biodegradace, značkování potravin).

#### 1.3.5 Porovnání nanovláken s ostatními filtračními materiály

Podmínky jednotlivých filtračních aplikací se velmi liší hodnotami požadovaných vlastností a jejich důležitostí. Zároveň parametry materiálů vyrobených různými technologiemi se liší. Z toho důvodu považujeme uvedené srovnání za orientační, dávající hrubý náhled možností použití nanovláčenných materiálů.

Kritéria pro porovnávání materiálů vycházejí z filtračních vlastností, především z hodnot efektivity a tlakového spádu, které je vhodné sledovat zároveň, neboť oba spolu

úzce souvisí. Ke srovnání vlastností byly vybrány typické komerčně používané filtrační technologie:

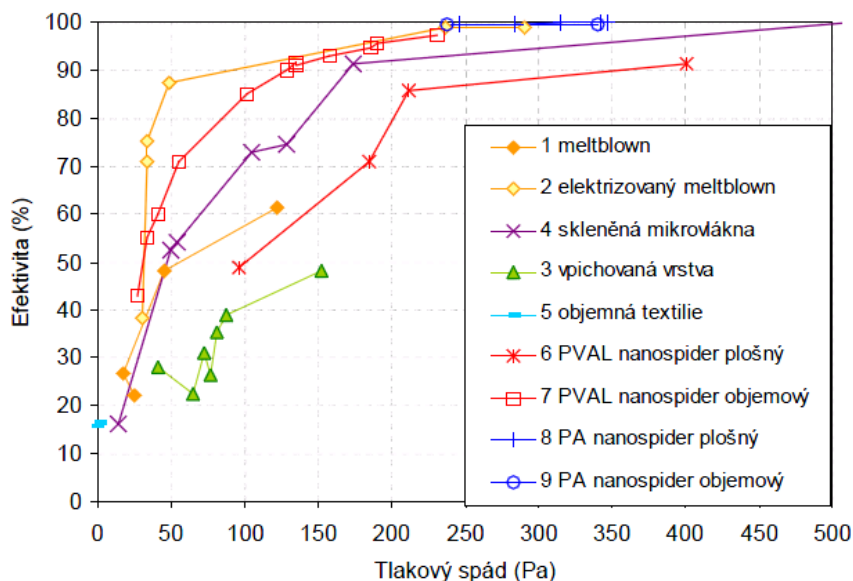
- meltblown
- elektrizovaný meltblown
- jemně vpichovaná textilie
- textilie ze skleněných mikrovláken připravených naplavováním
- objemné textilie pojené horkým vzduchem
- obě modifikace metody Nanospider pro PVAL a PA vlákna.

Typ textilie	Plošná hmotnost	Průměry vláken	Tloušťka vrstvy
Meltblown	15 – 100 g/m <sup>2</sup>	1,01 – 2,5 μm	0,21 – 1,5 mm
Elektrizovaný meltblown	35 – 80 g/m <sup>2</sup>	1,01 – 2,5 μm	0,2 – 2 mm
Vpichovaná vrstva	100 – 400 g/m <sup>2</sup>	11 – 30 μm	2,1 – 3,5 mm
Skleněná mikrovlákna	65 – 200 g/m <sup>2</sup>	1,01 – 3,5 μm	0,41 – 1 mm
Objemné textilie	100 – 200 g/m <sup>2</sup>	20 – 30 μm	10,5 – 15 mm

**Tab. 2** Parametry použitých materiálů [25]

Obr. 7 ukazuje poměr efektivity a tlakového spádu pro filtrační materiály lišící se použitou technologií i svými parametry. Pro test byly vybrány částice NaCl o střední velikosti 0,6 μm nalétávající rychlostí 5 m/min na plochu 100 cm<sup>2</sup> testovaného vzorku.





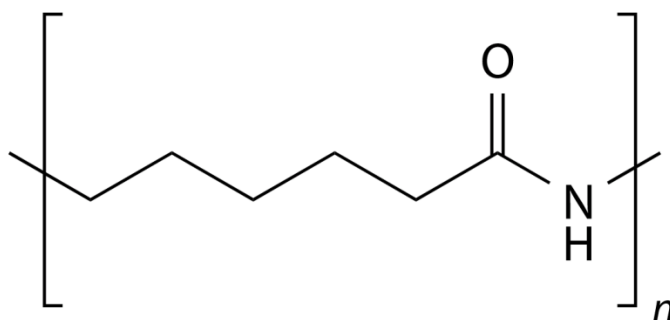
**Obr. 7** Porovnání tlakového spádu a efektivity různých filtračních materiálů.[25]

Posun po diagonále z levého spodního rohu do pravého horního udává změnu filtračních aplikací od hrubé filtrace s nízkými tlakovými spády do velmi jemné filtrace s tlakovými spády velkými. Posun po diagonále z pravého spodního rohu do levého horního uvádí změnu kvality filtru v rámci určité filtrační aplikace.

Z obrázku je patrné, že nejlepší poměr efektivity a tlakového spádu vykazují filtry z elektrizovaného meltblownu. Tento výsledek však nezohledňuje fakt, že elektrostatické pole nepůsobí stejně na všechny částice (aerosol NaCl je na elektrostatické pole citlivý) a navíc u elektrizovaných filtrů může dojít ke ztrátě náboje a tím i efektivity filtrace. Reálně se tedy hodnoty elektrizovaných filtrů budou pohybovat mezi křivkami elektrizovaného a neelektrizovaného meltblownu. [25]

#### 1.4 Polyamidová vlákna

Polyamidová vlákna jsou charakterizována tím, že jednotlivé články jejich makromolekul jsou spolu vázány pravidelně se opakující skupinou  $-CO.NH-$ ; makromolekuly samy jsou pak zakončeny skupinami  $-NH_2$  a  $-COOH$ . Stavební jednotky jsou u různých typů polyamidových vláken různé, jejich délka pak určuje některé vlastnosti vláken. U PA 6 je jedna makromolekula složena z  $90 \div 200$  základních článků. [31]



**Obr. 8** Chemická struktura Polyamidu 6[34]

#### 1.4.1 Vlastnosti polyamidových vláken

- teplota měknutí PA 6 je 170÷190°C
- teplota tání PA 6 je 215÷225 °C
- vynikající odolnost vůči oděru (až 10x větší než bavlna)
- mimořádná pevnost (při nízkých teplotách asi do  $-8^{\circ}\text{C}$  se dokonce poněkud zvyšuje, při delším působení vyšší teploty dochází k poklesu)
- vysoká tažnost (při nízkých teplotách klesá)
- za normálních podmínek polyamidová vlákna dobře odolávají běžných chemikáliím. Zředěné kyseliny mají malý vliv, horké minerální kyseliny (např. 5%ní HCl) tato vlákna rozkládají, koncentrované minerální kyseliny je rozpouštějí i zastudena
- odolnost polyamidových vláken proti alkáliím je vysoká
- PA ze všech polyamidových vláken nejvíce přijímá vlhkost (3,5÷4,5 %) a nejnáze se barví
- navlhavost PA 6 je malá, za standardních podmínek 4÷4,5 %
- bobtnání polyamidu je asi 2 % zvětšení plochy řezu. [31]

### 1.4.2 Barvení polyamidových vláken

Polyamidová vlákna se barví snadněji než ostatní vlákna ze syntetických polymerů. Mají amfoterní charakter (ve své molekule mají kyselé a zásadité skupiny). Vyznačují se vyšší navlhavostí. Při barvení dochází u vlákna k velké rychlosti natahování barviva, stačí nízká teplota k nasycení vlákna barvivem a změny v afinitě se projevují pruhovitostí.[36] Polyamidová vlákna se barví téměř všemi skupinami barviv.[33]

Nejvíce se používají technologické skupiny barviv:

- disperzní barviva – mají průměrnou stálost za mokra a při fixaci, velmi dobře kryjí pruhovitost
- kyselá barviva – jsou nejpoužívanější, vyznačují se dobrou stálostí a středním krytím pruhovitosti
- 1:2 kovokomplexní barviva – vybarvení s výbornými stálostmi včetně stálostí na světle, ale s horším krytím afinitních rozdílů vláken. [33]

#### 1.4.2.1 Kyselá barviva (Acid dyes)

Jde o strukturně i výrobně jednoduchá (levná) anionická barviva – sodné soli barevných sulfokyselin – vybarvující proteinová a polyamidová vlákna a přírodní hedvábí z různých kyselých lázní. Podskupiny se značně liší mokrymi stálostmi. Stálost na světle se pohybuje u kyselých barviv kolem stupně 5. [32]

Barviva této skupiny se nazývají kyselá proto, že vybarvují živočišná vlákna z kyselé barvicí lázně. Většinou obsahují ve své molekule sulfoskupiny nebo karboxylové skupiny, které jim dodávají kyselý charakter. Podle afinity a egalizačních schopností se kyselá barviva rozdělují do tří skupin:

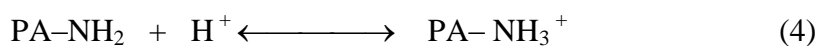
- kyselá barviva vytahující ze silně kyselé lázně  
Tato barviva mají nízkou afinitu k textilnímu materiálu. Tuto nižší afinitu poněkud vyrovnává aplikace ze silně kyselé lázně ( pH 2 - 3 ).
- kyselá barviva vytahující ze slabě kyselé lázně  
Vytahují na vlněné vlákno ze slabě kyselých lázní ( pH 4 - 5 ) za přísady kyseliny octové.

- kyselá barviva vytahující ze slabě kyselé až neutrální lázně  
Tato barviva mají vysokou afinitu, proto se snižuje přísada kyseliny na minimum, popřípadě se nahrazuje síranem nebo octanem amonným. Aplikují se z lázně s optimálním pH 6 - 7. [35]

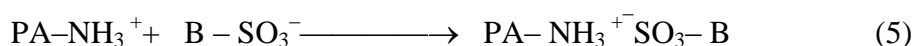
#### 2.4.2.2 Kyselá barviva na polyamidových vláknech

Polyamidy mohou vázat aniontová barviva  $B-SO_3^-Na^+$  obdobně jako vlna iontovými vazbami prostřednictvím ionizovaných  $-NH_2$  skupin, které jsou zde k dispozici pouze na koncích řetězců polymeru. [31]

Aniont barviva se iontově váže na ionizovanou aminoskupinu vlákna, která vzniká přijmutím protonu  $H^+$  kyseliny (rovnováha reakce se posuzuje doprava s rostoucí kyselostí lázně).



ionizace



vybarvení

Vazba přes aminoskupiny vlákna:  $H-[NH-(CH_2)_5-CO]_n-OH$  má za následek, že kyselá barviva „odhalují“ kolísání polymeračního stupně i změny nadmolekulární struktury polyamidu – tím vzniká „pruhovité“ vybarvení. [33]

Stálosti kyselých barviv na světle jsou na PA- vláknech střední, ve světlých odstínech však často již nevyhovující. Kromě toho se vyskytuje obávané katalytické blednutí katalytickým účinkem buď matovacího prostředku nebo aviváže, apretu a případně i jiného barviva. [32]

## 2. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 2.1 Úvod do experimentální části

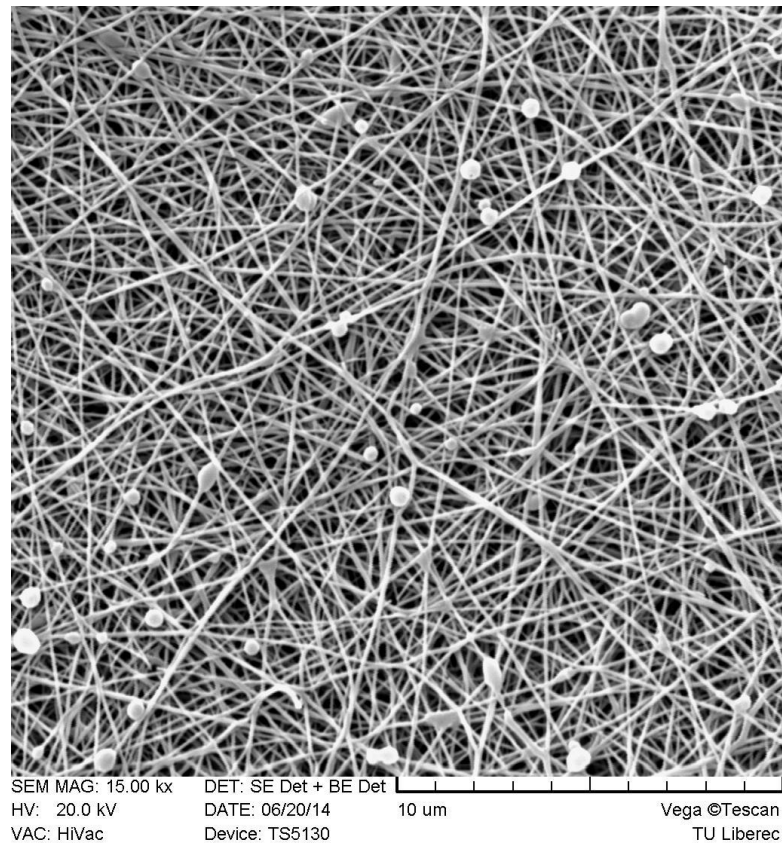
Cílem této práce, bylo vyzkoušet vliv různého množství filtračního materiálu a různých koncentrací simulované odpadní vody na vlastnosti filtrace aby zkoumat filtrační mechanismus nanovláknenné membrány z Polyamidu 6. Během práce bylo smontováno zařízení pro zajištění kontinuální slepé filtrace, aby zkoumání filtračních schopností membrány bylo flexibilnější a účinnější.

### 2.2 Materiály a zařízení

#### 2.2.1 Filtr

Jako filtr byla použita nanovláknenná membrána z elektrostaticky zvlákněných vláken polyamidu 6 s plošnou hustotou  $1.26\text{g/m}^2$  zakoupená od spol. **ELMARCO s. r. o.**

Průměr vlákna byl  $113 \pm 16\text{nm}$  (což bylo změřeno na SEM obrázcích 50krát) (viz. Obr.9).

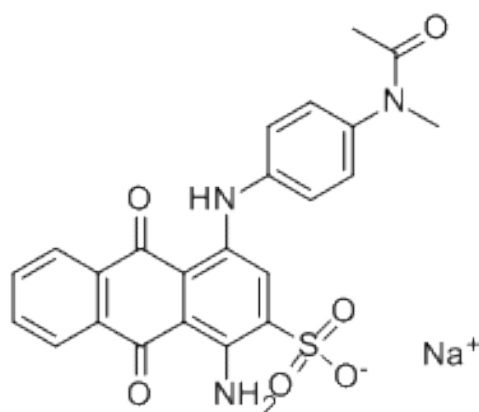


**Obr.9** SEM snímek filtru použitého v této práci.

### 2.2.2 Kontaminant

Během výzkumu bylo použito 4 různých koncentrací AB41 včetně **0.005**, **0.01**, **0.02**, a **0.03g/L**.

Nejprve byl připraven roztok AB41 s koncentrací 1g/L, pak roztok byl rozředěn destilovanou vodou do jednotlivých koncentrací zmíněných výše.



Obr.10 Molekulární struktura C.I. Acid blue 41.

### 2.2.3 Přístroje

Během práce bylo smontováno zařízení pro zajištění kontinuální slepé filtraci, aby zkoumání filtračních schopností membrány proběhlo flexibilněji a účinněji. Zařízení obsahovalo hlavně UV-VIS detektor s proměnnou vlnovou délkou, jednopístové čerpadlo s průtokem 0.01-9.99ml/min při standardním nastavení a vysokotlakový filtr, který se používal pro podporu a fixace membránového filtru mezi trubkami bez úniku vzduchu. Nádoby se používali pro přítok a výtok. Veškeré části zařízení byli spojený s trubicemi, aby vytvořit obvod, jak je ukázáno na obr. 14.

#### 2.2.3.1 Elektronový mikroskop

Nanometr je jednotka, pouhým okem neviditelná, a proto snímky vzorků filtru byli získány pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu – „Tescan” (obr. 11)

Tento mikroskop má rozlišení 3,5 nm a zvětšení 20 až 500000x.

Rastrovací (řádkovací) elektronový mikroskop je optický přístroj, který umožňuje zobrazovat částičky o velikosti v rozsahu nanometrů. Na rozdíl od světelných mikroskopů jsou fotony nahrazeny elektrony a skleněné čočky elektromagnetickými čočkami.

Principem metody spočívá v tom, že úzký paprsek elektronů prochází každé místo vzorku po řádcích (odtud - řádkovací). Každé zasažené místo vzorku vysílá sekundární elektrony, zpětně odražené elektrony, rentgenové záření a jiné signály, které jsou pak detekovány a analyzovány. Ze signálů, jejichž úroveň se mění pohybem po vzorku, je sestavován výsledný obraz.[37][38]



**Obr. 11** Elektronový rastrovací mikroskop (SEM) TESCAN VEGA

### 2.2.3.2 UV-VIS detektor SAFÍR (SAPPHIRE) 600

Spektrální analyzátor roztoků Safir 600 UV-VIS (obr. 12), který umožňuje detekovat barevnost textilií a zejména je vhodný pro analýzu roztoků barviv.

Přístroj měří změny absorpci světla v kapalinách protékajících kyvetou na zvolené vlnové délce, v rozsahu 190 až 600nm. Přístroj lze předprogramovat pro změny vlnové délky během analýzy, Jako zdroj světla je použita deuteriová výbojka. Základní parametry:

- *Rozsah vlnových délek – 190-600nm*
- *Spektrální pološířka – 6nm*
- *Přesnost nastavení – 1nm*
- *Reprodukovatelnost – 0,5nm*



Obr. 12 UV-VIS detektor

### 2.2.3.3 Čerpadlo

„Kappa 10“ je jednoduché čerpadlo s jedním pístem, plynule nastavitelným průtokem v rozsahu 0,01-10 ml/min a maximálním pracovním tlakem 40(20) MPa, vhodné



pro promývání a regeneraci kolon v kapalinové chromatografii. Průměr pístu je 1/8".  
(obr. 13) [39]



**Obr. 13** Jednopístové čerpadlo Kappa 10

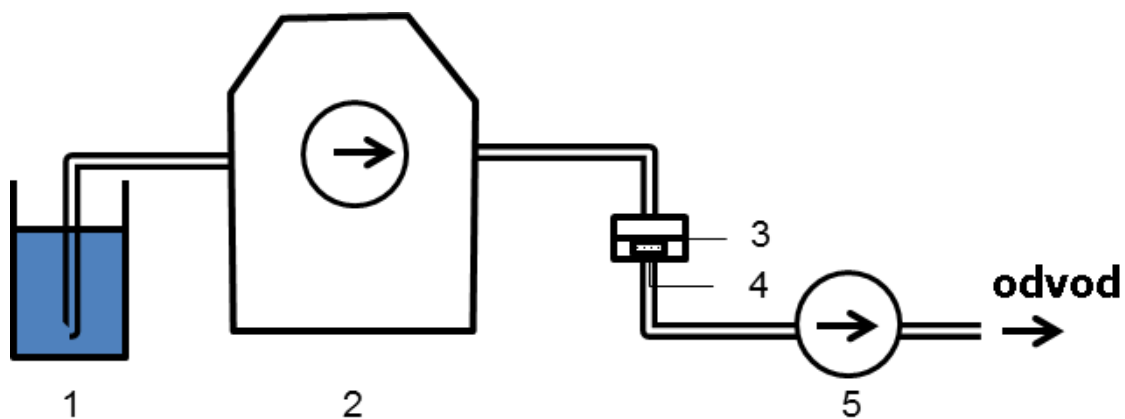
#### **2.2.3.4 Software ECOMAC**

ECOMAC je aplikace pro Windows, řídící chromatografické procesy.

SW umožňuje řízení přístrojů a záznam jejich signálů (dat) interaktivním způsobem.

Řídí chromatografické přístroje jako pumpy, detektory, jímače frakcí a další, a přijímá data z těchto přístrojů a ukládá je pro další vyhodnocení. [40]

ECOMAC používá vlastní interní formát dat. Data lze exportovat do široké škály formátů od jednoduchých textových souborů, až po formát dat zpracovatelný pomocí nástrojů jako je např. MATLAB nebo Octave. [41]



**Obr. 14. Smontované zařízení pro kontinuální filtraci:** (a) Struktura zařízení: 1 -kádinka s odpadní vodou 2-jednopístové čerpadlo 3- sorbent se styčnou plochou  $2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , 4-membránová komora, 5- UV-detektor s proměnnou vlnovou délkou; (b) Ukázka smontovaného zařízení.

### 2.2.4 Testování

Kontinuální filtrace probíhala na zařízení ukázaném na obrázku 14. Koncentrace po filtraci se kontrolovala on-line pomocí UV-VIS detektoru s proměnnou vlnovou délkou. Také byla vypočítána akumulovaná hmotnost absorbovaných membránou barviv. Během filtrace byl použit průtok  $3 \text{ ml/min}$  a proudění  $474 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$ .

## 2.2.5 Výpočty

Pro výpočet koncentrací roztoků procházejících detektorem byla použita rovnice 1

$$C_I = C_{L0} \frac{A_i}{A_0}; C_L = C_{L0} \frac{A_t}{A_0} \quad (1)$$

Kde  $C_I$  je koncentrace odpadní vody bez membrány

$C_L$  je koncentrace filtrátu

$C_{L0}$  je původní koncentrace roztoku před filtrací

$A_i$  je absorbance odpadní vody bez membrány

$A_t$  je absorbance filtrátu

$A_0$  je původní absorbance roztoku barviva před filtrací

Pro změnu hmotnosti se da použít rovnici 2 :

$$\Delta m = m_I - m_L = C_I \cdot V - C_L \cdot V = (C_I - C_L) \cdot V = (C_I - C_L) \cdot v \cdot t \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Kde  $\Delta m$  je změna hmotnosti (mg);

$m_I$  je původní hmotnost;

$m_L$  je hmotnost po filtraci;

$v$  je čerpací rychlost 3ml/min;

$t$  je časový interval mezi dvěma body zaznamenování, což přibližně rovná se 0.003min;

$10^{-3}$  je jednotka L/ml.

Akumulovaná hmotnost ( $AM$ ) je součtem hmotností barviva akumulovaného na membráně během filtrace, což ukazuje rovnice 3

$$AM_n = \sum_1^n \Delta m_n, n = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Procent odstraňování barviva ( $DR$ ) může být spočítán pomocí následující rovnici:

$$DR = \frac{m_0 - m_L}{m_0} \cdot 100\% \quad (4)$$

Efektivita adsorpce nebo kapacita byla spočítána pomocí rovnice 5:

$$\Gamma = \frac{AM_n}{m_m} \quad (5)$$

Kde  $m_m$  je adsorpční plocha membrány, což přibližně se rovná  $0.00038 \text{ m}^2$  při průměru 22mm.

Pro výpočet relativních rozdílů absorbancí byla použita rovnice 6:

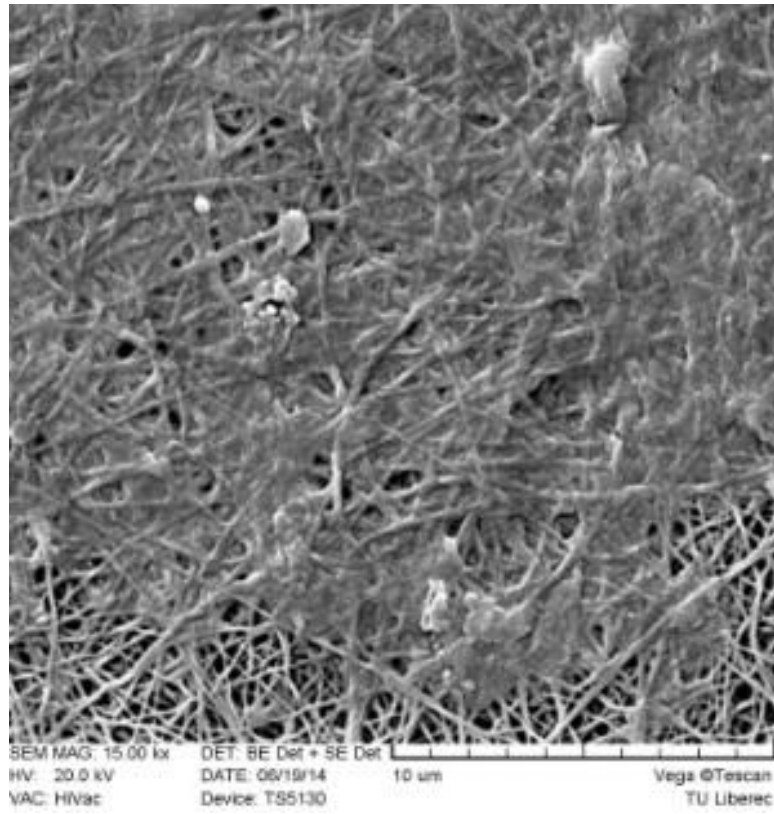
$$\text{RAD}(\%) = \frac{C_I - C_L}{C_0} \times 100\% \quad (6)$$

Concentration	Absorbance $A_0$
0.005	0.0233
0.01	0.0468
0.02	0.0925
0.03	0.139

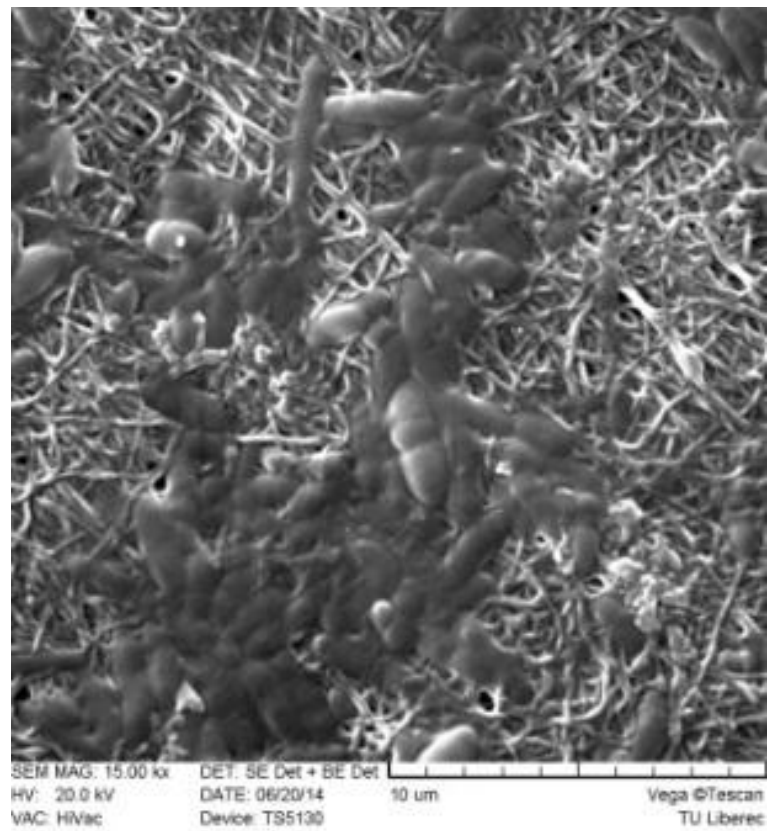
**Tab. 3** Původní absorbance roztoku barviva před filtrací pro různé koncentrací.

### 2.3 Pokusy a výsledky

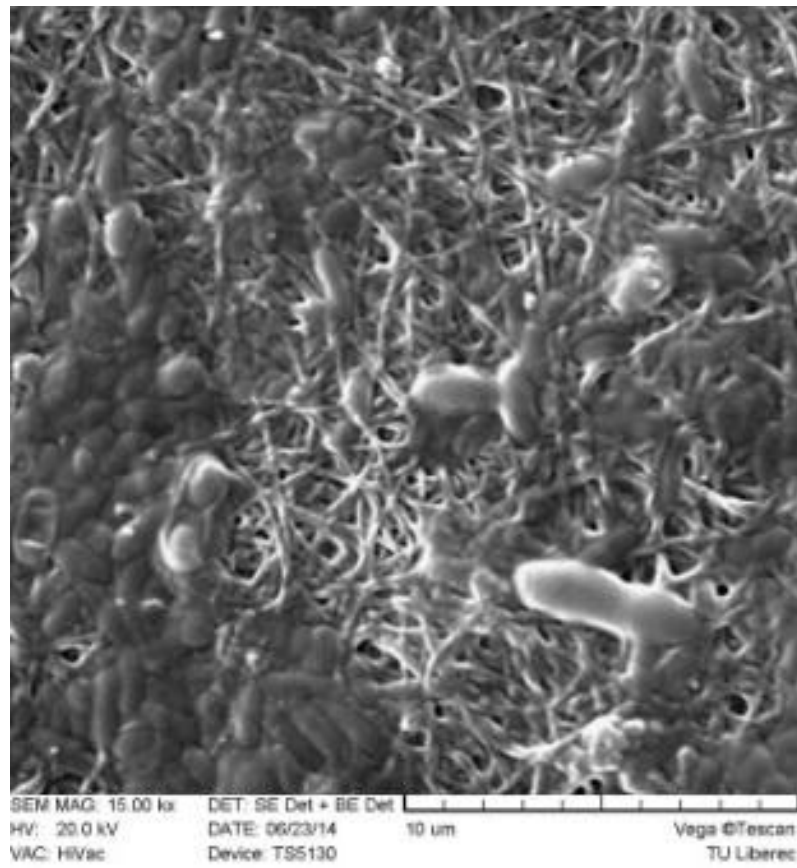
Na zmíněném výše obrázku 9, nanovlákněná membrána před filtrací byla ukázaná s vyskytnutím částic o rozměrech cca 200nm, připomínajících koule. Které můžeme považovat za prach. Některé množství nepřerušovaného filmu se vytvořilo na povrchu první vrstvy, jak je ukázáno na obr. 15 (a – c), protože první vrstva membrány absorbovala barvivo a mezitím zachytila i větší částici barviva. Pokrytí tmavých filmů se zvyšovalo se zvyšováním koncentraci roztoku barviva, což naznačuje větší množství zachyceného filtrem barviva za vyšší koncentraci. Druhá vrstva vykázala extrémně čistý povrch bez jakýchkoliv částic (viz obr. 15 d-f) kvůli spláchnutí odpadní vodou během filtrací a také kvůli adhezi s první vrstvou během oddělení od ní po sušení.



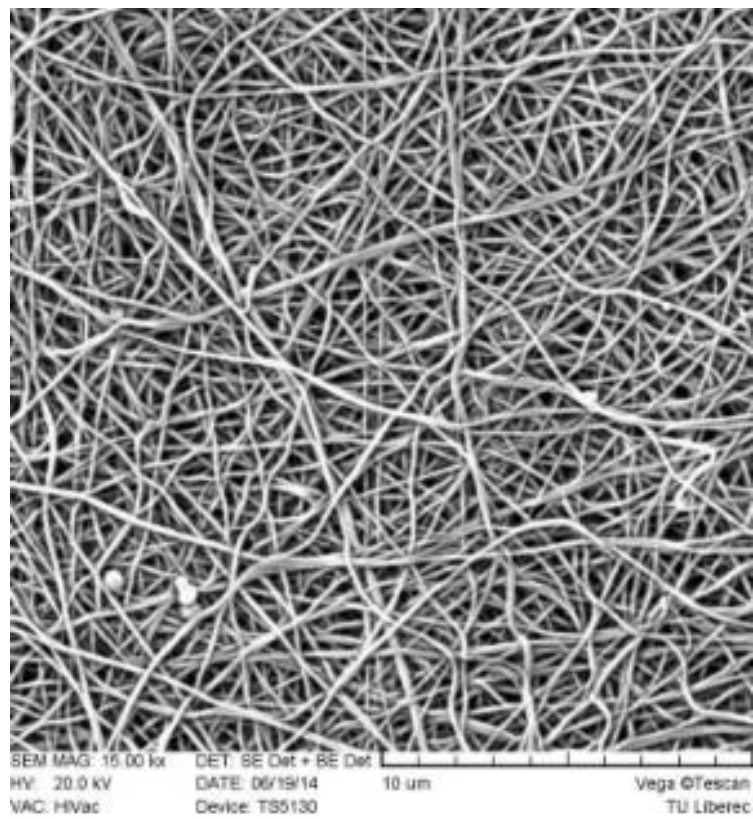
(a)



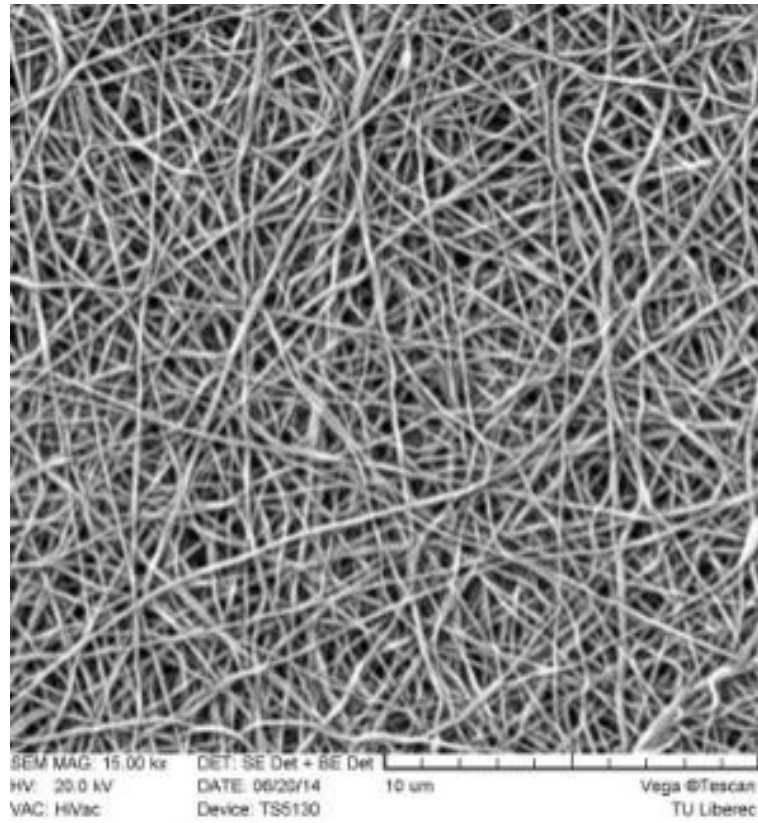
(b)



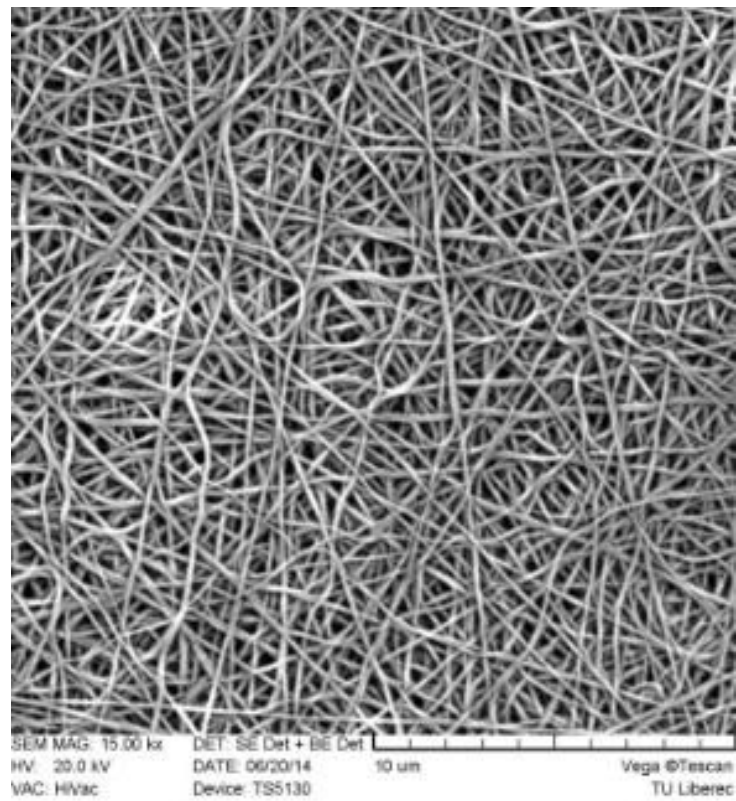
(c)



(d)



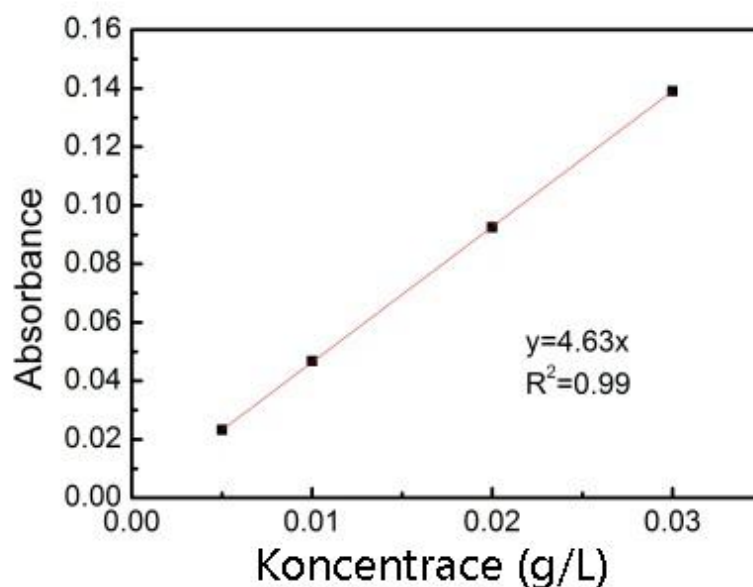
(e)



(f)

**Obr. 15. SEM snímkyfiltrůpo filtraci barviva.** A) první vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.01g/L; b) první vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.02g/L; c) první vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.03g/L; d) druhá vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.01g/L; e) druhá vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.02g/L; f) druhá vrstvamembrány po filtraces koncentraci barviva 0.03g/L.

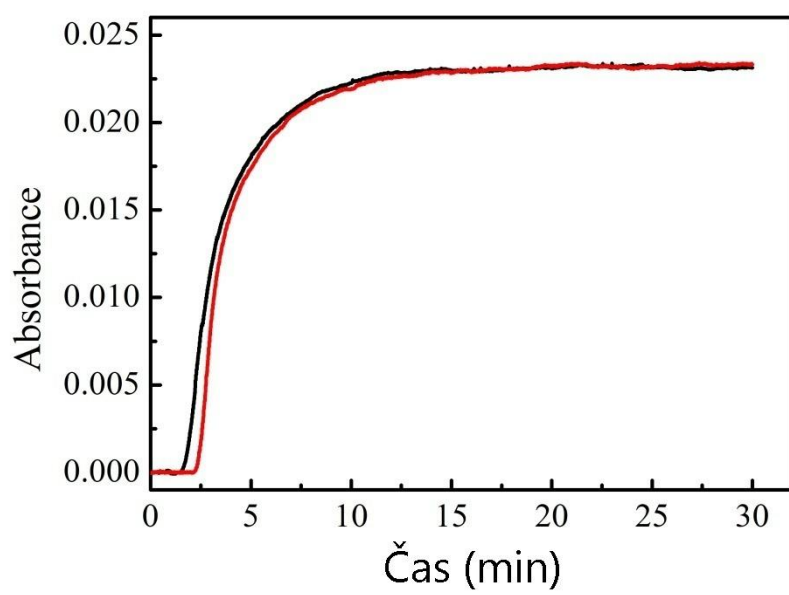
Jak je ukázáno na Grafu 1, koncentraci odpadní vody se dá vypočítat buď z funkce zmíněné na obrázku, anebo z porovnání se zjištěnými koncentracemi, protože 4 zjištěné koncentrace vykazují lineární závislost s korelačním koeficientem více než 0.99.



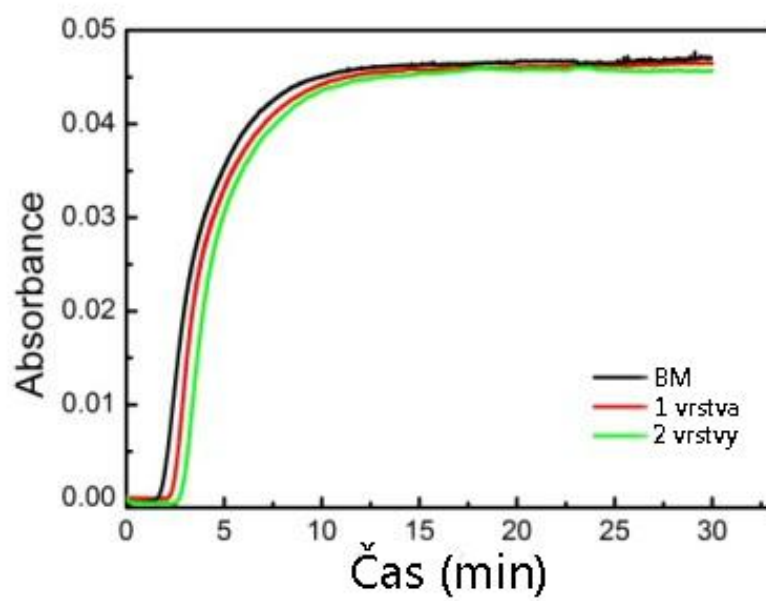
**Graf 1:** Souvislost koncentraci roztoku barviva a zjištěné absorbance, prověřené pomocí UV-VIS detektoru s proměnnou vlnovou délkou a lineární aproximační funkcí.

Křivky absorbance *bez*, s 1 vrstvou a 2 vrstvami filtru za koncentrací roztoku barviva 0.005, 0.01, 0.02 a 0.03g/L jsou uvedeny na Grafu 2. Narůst křivek se objevil cca na 2.2min a křivky s 1 a 2 vrstvami vykázali zdržení, pak během cca 10min veškeré křivky dosáhli maximální absorbance, což označovala saturace filtru.

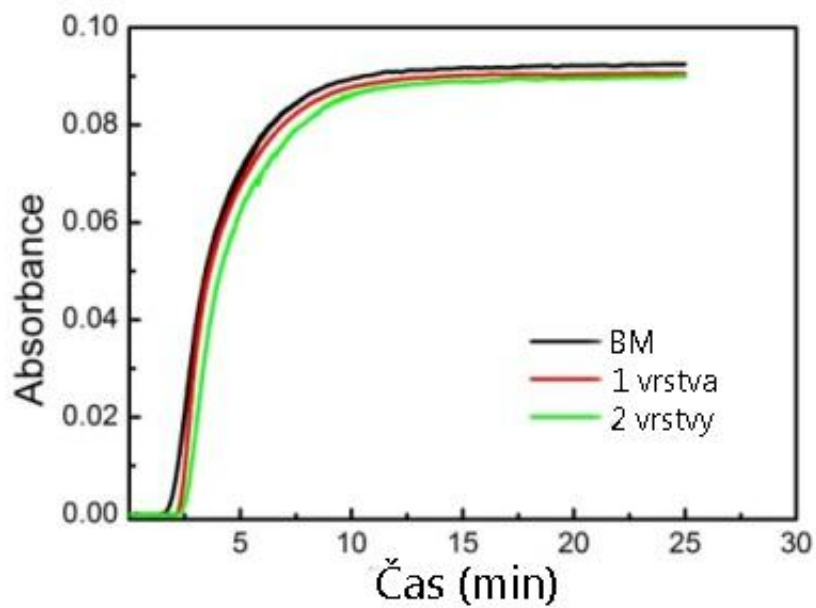




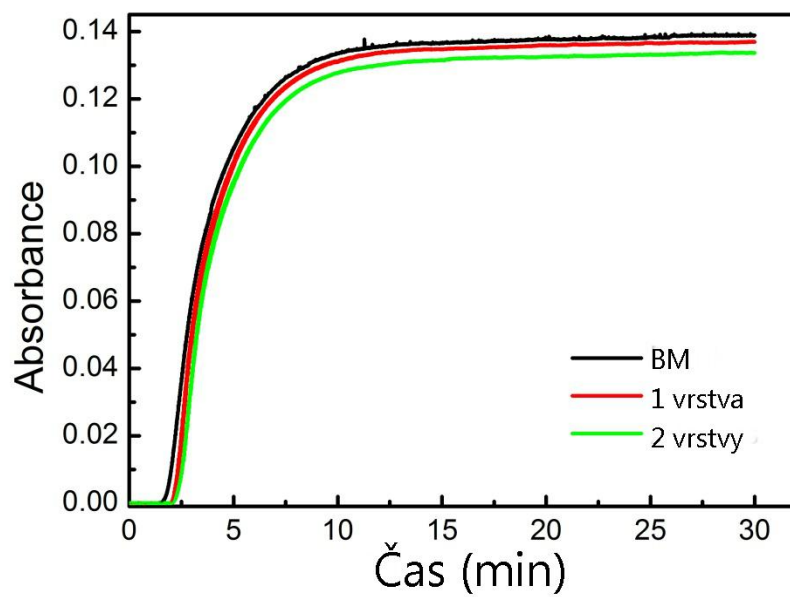
(a)



(b)

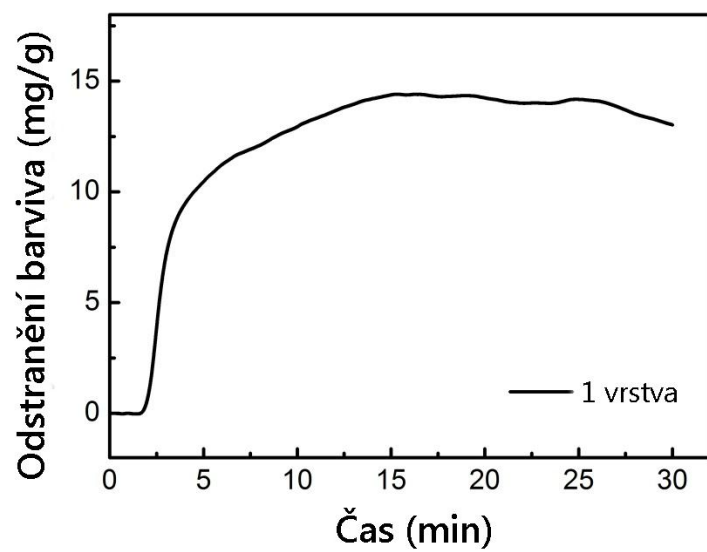


(c)

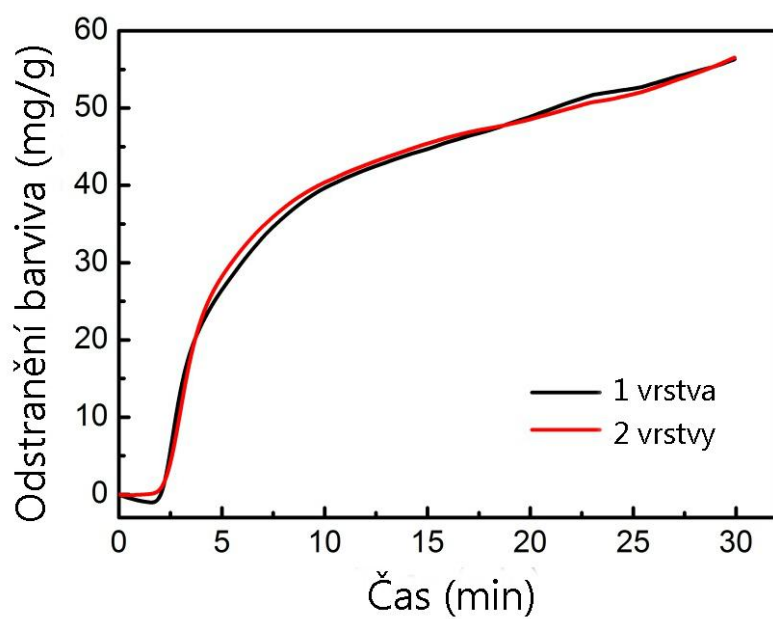


(d)

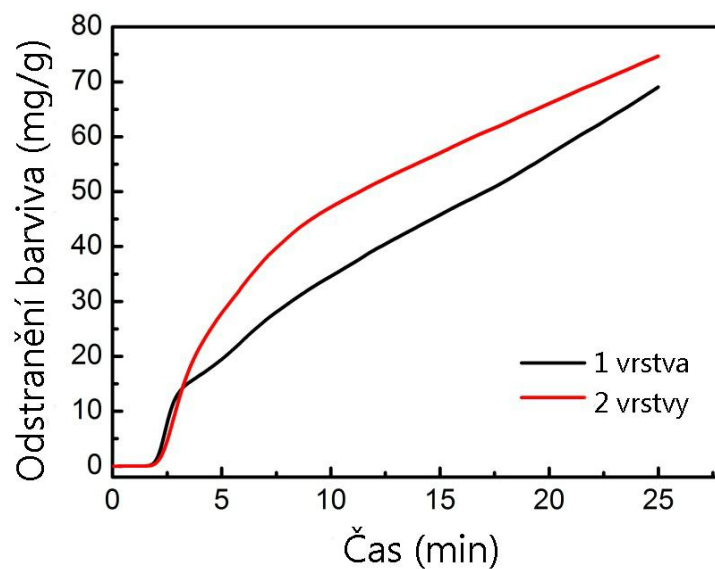
**Graf 2:** Absorbanční křivky různého množství filtru; a) zjištěná absorbance koncentraci 0.005g/L; b) zjištěná absorbance koncentraci 0.01g/L; c) zjištěná absorbance koncentraci 0.02g/L; d) zjištěná absorbance koncentraci 0.03g/L



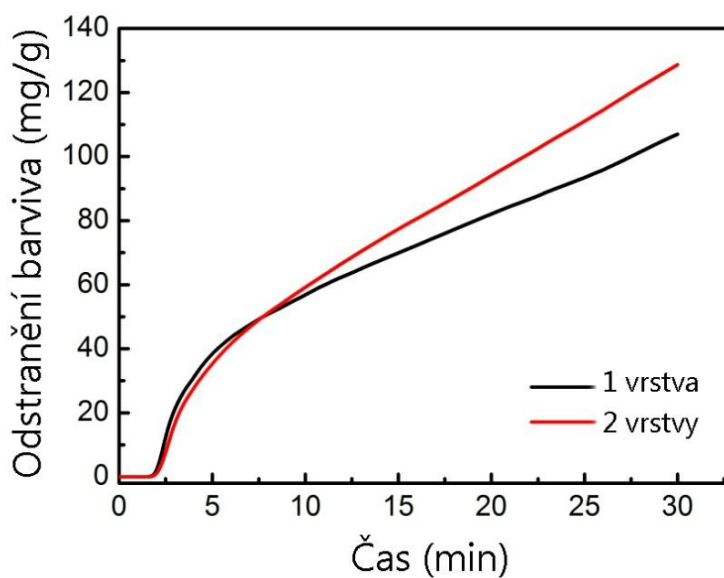
(a)



(b)



(c)



(d)

**Graf 3:** Odstranění barviva (mg/g) pro 4 různé koncentrace a) 0.005 g/L b) 0.01 g/L c) 0.02 g/L d) 0.03 g/L

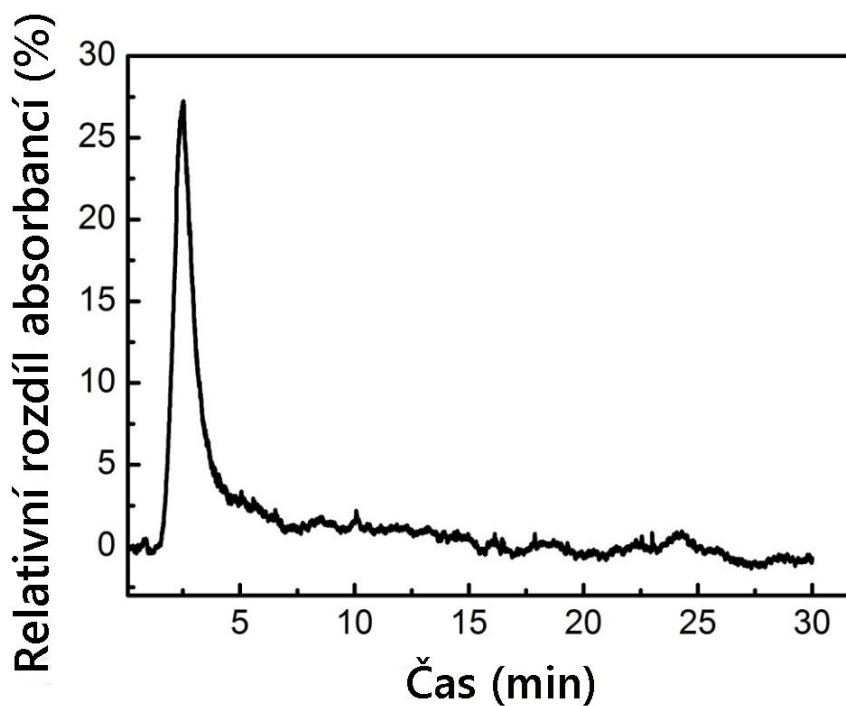
Aby dosáhnout stabilní hodnoty saturace, jsme spočítali odstranění barviva v mg/g v době filtraci 12.5min. Veškeré hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4.

**Tabulka 4:** Porovnání hodnot odstranění barviva když filtrace dosahuje 12.5min

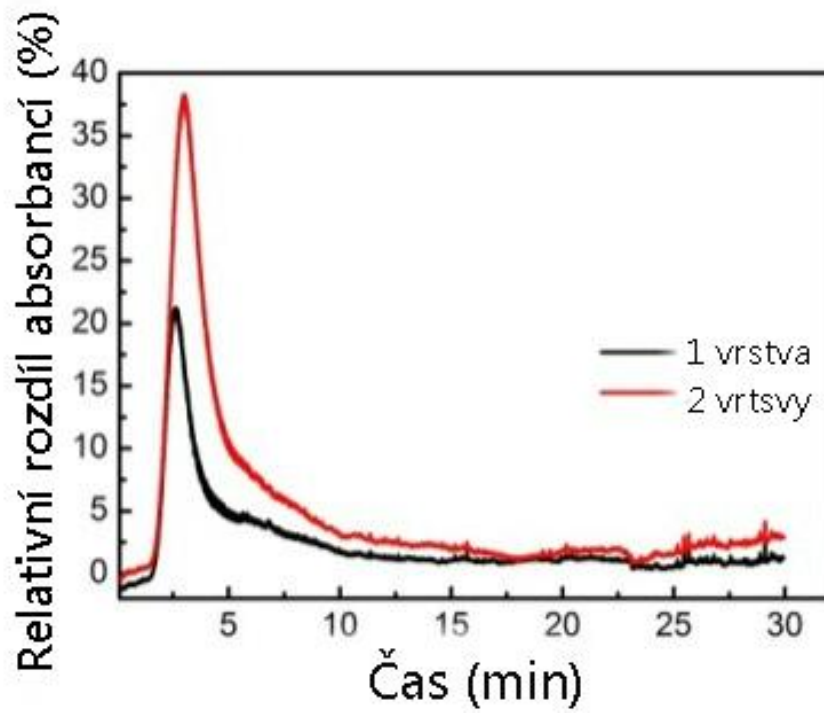
Koncentrace roztoku g/L	Odstranění barviva mg/g	
	1 vrstva	2 vrstvy
0.005	13.83	---
0.01	34.52	37.88
0.02	40.47	52.39
0.03	63.72	68.57

Hodnoty odstraňování barviva vykázali narůst, když se zvyšovala koncentrace. Když byly použity 2 vrstvy filtru, množství odstraněného barviva se nepatrně zvětšilo v porovnání s případem, když jsme použili jednu vrstvu.

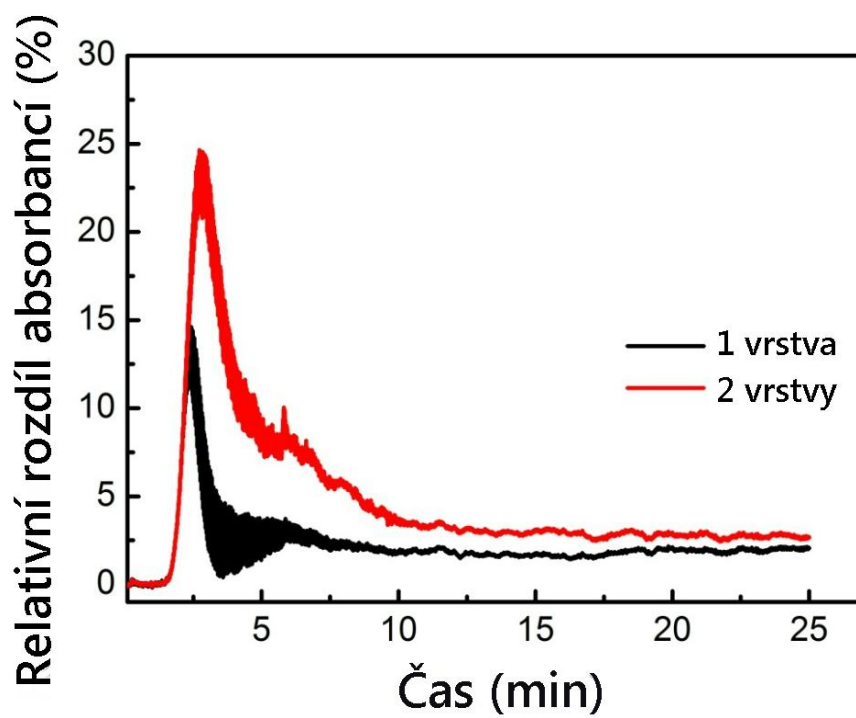
Při porovnání relativních rozdílů absorbance (RAD), Graf 4(b, c, d) a Tabulka 5 ukazují větší hodnotu RAD, což znamená, 2 vrstvy filtru měly lepší počáteční účinnost filtracecca o 10% při každé koncentraci roztoku barviva.



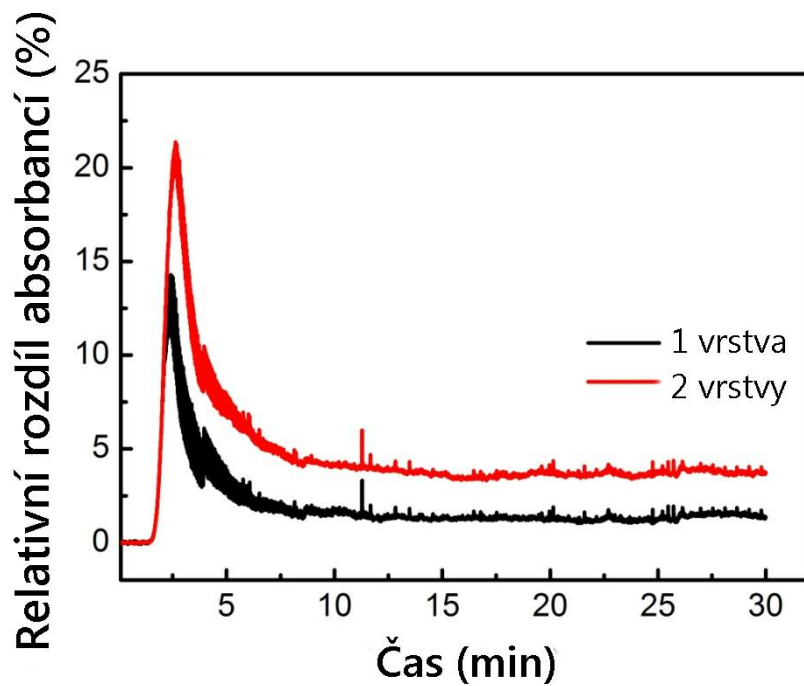
(a)



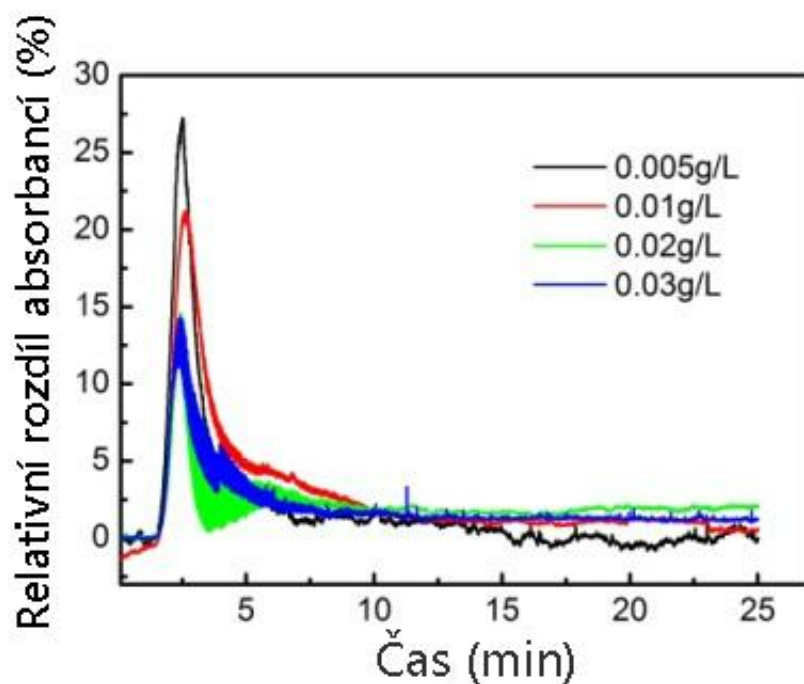
(b)



(c)



(d)



(e)

**Graf 4:** Porovnání relativních rozdílů absorbancí mezi různým množstvím filtrů s různými koncentracemi roztoků barviva: a) RAD křivky při koncentraci barviva 0.005g/L; b) RAD křivky při koncentraci barviva 0.01g/L; c) RAD křivky při koncentraci barviva 0.02g/L; d) RAD křivky při koncentraci barviva 0.03g/L; e) RAD křivky různých koncentrací roztoku barviva s jednou vrstvou filtru.

**Tabulka 5:** Porovnání relativních rozdílů absorpance mezi různým množstvím filtrů s různými koncentracemi roztoků barviva.

Koncentrace roztoku g/L	RAD %	
	1 vrstva	2 vrstvy
0.005	27.16	---
0.01	21.21	38.27
0.02	14.61	24.66
0.03	14.29	21.38

Na Grafu 4 (e), nejnižší koncentrace roztoku barviva vykazuje nejlepší počáteční efektivitu filtrace a 2 nejvyšších koncentrací vykazali stejné hodnoty když byla použita pouze jedna vrstva filtru. Tabulka 5 ukazuje stejnou tendenci když byli použity 2 vrstvy filtru pro každou koncentraci roztoku barviva.

### 3. Závěr

Během procesu filtrace nanovlákná membrána z elektrostaticky zvlákněných vláken polyamidu 6 vykazala lepší odstránění barviva když koncentrace simulované vody byla vyšší. A přidání jedné vrstvy navíc by mohlo mírně zlepšit odstránování.

Při porovnání relativních rozdílů absorpance, což může být také považováno i jako relativní rozdíly koncentrací, filtr ukázal účinnější filtrace na počáteční fázi za nižší koncentrací. A přidání jedne vrstvy filtru navíc by mohlo zdokonalit tuto počáteční účinnost cca o 10% při stanovené koncentraci simulované odpadní vody.



## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1</b> - Průměrná účinnost mechanicko-chemických čistíren [9].....	17
<b>Tabulka 2</b> - <i>Parametry použitých materiálů</i> [25].....	29
<b>Tabulka 3</b> Původní absorbance roztoku barviva před filtrací pro různé koncentrace.....	42
<b>Tabulka 4</b> - Porovnání hodnot odstranění barviva když filtrace dosahuje 12.5min.....	51
<b>Tabulka 5</b> - Porovnání relativních rozdílů absorbancí mezi různými množstvími filtrů s různými koncentracemi roztoků barviva. ....	54

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1</b> Vertikální lapač písku [7].....	14
<b>Obr. 2</b> Rozdíl mezi adsorpcí a absorpcí [21].....	20
<b>Obr. 3</b> Proces adsorpce [20].....	21
<b>Obr. 4</b> Porovnání velikosti lidského vlasu, pylového zrna a nanovláken [28].....	26
<b>Obr. 5</b> proces elektrostatického zvlákňování [23].....	27
<b>Obr. 6</b> zvlákňovací prostor [23].....	27
<b>Obr. 7</b> Porovnání tlakového spádu a efektivity různých filtračních materiálů.[25].....	31
<b>Obr. 8</b> Chemická struktura Polyamidu 6 [34].....	32
<b>Obr. 9</b> SEM snímek filtru použitého v této práci.....	35
<b>Obr. 10</b> Molekulární struktura C.I Acid blue 41.....	36
<b>Obr. 11</b> Elektronový rastrovací mikroskop (SEM) TESCAN VEGA.....	37
<b>Obr. 12</b> UV-VIS detektor.....	38
<b>Obr. 13</b> Jednopístové čerpadlo Kappa 10.....	39
<b>Obr. 14</b> Smontované zařízení pro kontinuální filtraci.....	40
<b>Obr. 15</b> SEM snímky filtrů po filtraci barviva.....	43

## Seznam grafů

<b>Graf 1</b> Souvislost koncentraci roztoku barviva a zjištěné absorbanci, prověřené pomocí UV-VIS detektoru s proměnnou vlnovou délkou a lineární aproximační funkcí.....	47
<b>Graf 2</b> Absorbanční křivky různého množství filtru.....	49
<b>Graf 3</b> Odstranění barviva (mg/g) pro 4 různé koncentrace.....	51
<b>Graf 4</b> Porovnání relativních rozdílů absorbance mezi různým množstvím filtrů s různými koncentracemi roztoků barviva.....	54

## Seznam použité literatury

- [1] Akbari, A. et al. Treatment of textile dye effluent using a polyamide-based nanofiltration membrane, *Chemical Engineering and Processing*, 2002.
- [2] Guceri, S. et al. *Nanoengineered Nanofibrous materials*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [3] Ahmed M. et al. Effect of structural properties of acid dyes on their adsorption behaviour from aqueous solutions by amine modified silica, *Journal of Hazardous Materials*, 161, 1544 – 1550, 2009.
- [4] Ioannis S. Chronakis. Et al. *Micro-/Nano-fibers by Electrospinning Technology: Processing, Properties and Applications*, William Andrew, 2010.
- [5] Chakraborty, S. et al. Nanofiltration of textile plant effluent for color removal and reduction in COD, *Separation and Purification Technology*, 31, 141 – 151, 2003.
- [6] Yan Wang, Jakub Wiener, Guocheng Zhu, -Langmuir isotherm models applied to the sorption of acid dyes from effluent onto polyamide nanofibers.
- [7] Prášil M. a kol. – *Ekologické aspekty textilních procesů*, skripta TUL, 1997.
- [8] Malý J., Hlavínek P. – *Čištění průmyslových odpadních vod*, NOEL 2000 Brno, 1996.
- [9] Bartušek P. – *Odpadní vody v textilním průmyslu*, SNTL Praha, 1985.
- [10] Žáček L. – *Chemické a technologické procesy úpravy vody*, SNTL Praha, 1981.
- [11] Chudoba J., Dohányos M., Wanner J. – *Biologické čištění odpadních vod*, SNTL Praha, 1991.
- [12] Inotex spol. s r.o. – *Oborový manuál prevence a minimalizace odpadů výroba textilií*, Dvůr Králové nad Labem.
- [13] Horáková M. – *Chemické a fyzikální metody analýzy vod*, SNTL Praha, 1986.
- [14] Bartovská L., Šišková M., – *Co je co v povrchové a koloidní chemii*, VŠCHT, Praha, 2005.
- [15] Klouda, P. – *Fyzikální chemie – druhé vydání*, Nakladatelství Pavel Klouda, Ostrava 2002.
- [16] Pitter P. – *Hydrochemie*. Vydavatelství VŠCHT, Praha 1999.
- [17] Novák P. J. a kol. – *Fyzikální chemie II*, VŠCHT, Praha 2001.

- [18] Tuček, F., Chudoba, J., Koníček, Z. – Základní procesy a výpočty v technologii vedy. 2. Vyd, Nakladatelství technické literatury, Praha 1988.
- [19] Klouda P. – Fyzikální chemie, 1. Vyd, Ostrava, 1997.
- [20] [Online][cit. 25. 01. 2015]. Dostupné z: <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/traitement-dair-charge-en-composes-organiques-volatils-par-adsorption-sur-solides-microporeux-739>
- [21] [Online][cit. 27. 01. 2015]  
Dostupné z: [http://www.co2crc.com.au/aboutccs/co2\\_capture\\_separation.html](http://www.co2crc.com.au/aboutccs/co2_capture_separation.html)
- [22] Sodomka. L., [Online], [cit. 17. 02. 2015] Dostupné z: <http://lubomirsodomka.blog.cz/1005/v-nanovlakna-vcera-dnes-a-zitra>
- [23] Košťálová, E. – Úvod do nanomateriálů a nanotechnologie, úvod do textilních nanomateriálů. [Online], [cit. 13. 12. 2014]  
Dostupné z: [http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/predn%C3%A1%C5%A1ka%201\\_uvod\\_do\\_nanomaterialu\\_na%20web.pdf](http://www.ft.tul.cz/depart/knt/nanotex/predn%C3%A1%C5%A1ka%201_uvod_do_nanomaterialu_na%20web.pdf)
- [24] NAFIGATE a.s., O nanovlákněch, [Online], [cit. 9. 01. 2015] Dostupné z: <http://www.nafigate.com/cs/section/portal/app/portal-article/detail/69818-o-nanovlaknech>
- [25] Hruža J., Nanovláknenné filtry a jejich použití v sanačních Technologiích [Online], [cit. 10. 04. 2015], Dostupné z: <http://artec.tul.cz/?content=upload/ARTEC-kapitola6-sidlof-hruza.pdf&lang=cs>
- [26] Sodomka. L., [Online], [cit. 10. 04. 2015], Dostupné z: [http://kap.fp.tul.cz/~simunkova/jcmf/Lubomir\\_Sodomka\\_nanovlakna\\_materialy\\_21\\_s\\_toleti.pdf](http://kap.fp.tul.cz/~simunkova/jcmf/Lubomir_Sodomka_nanovlakna_materialy_21_s_toleti.pdf)
- [27] Zpracovatelské vlastnosti textilních vláken, [Online], [cit. 27. 01. 2015], Dostupné z: <https://skripta.ft.tul.cz/databaze/data/2006-03-22/09-17-12.pdf>
- [28] ELMARCO s.r.o., [Online], [cit. 28. 01. 2015], Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/technologie/nanovlakna/>
- [29] Růžičková, J. – Elektrostatické zvlákňování nanovláken, Vyd. 2. Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [30] Jakub Hruža. – Kandidátská disertační práce. „Zlepšování filtračních vlastností vláknenných materiálů“, Technická Univerzita v Liberci, Liberec 2005.
- [31] Machaňová D., Wiener J. – Údržba textilií I, skripta TUL, Liberec 2010.
- [32] Kryštůfek J., Wiener J., Machaňová D. – Barvení textilií II, skripta TUL, Liberec 2011.

- [33]Wiener J., Zušlechtování textilií, Návody na cvičení, skripta TUL, Liberec 2010.
- [34]EsterindustriesLTD, [Online] <http://www.esterindustries.com/product.aspx?clink-id=7&mcat-id=54>
- [35] Vik M., Viková M., přednášky: Zušlechtování textilií, Liberec: TUL, 2012
- [36]Šrámek, J. Barvení textilií pro 2. a 3. ročník SOU, SNTL, Praha 1985.
- [37][Online],[cit. 22. 03. 2015]  
Dostupné z:[http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD\\_mikroskop](http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronov%C3%BD_mikroskop)
- [38] Rastrovací elektronová mikroskopie [online], [cit. 03. 05. 2015], Dostupné z:<http://biologie.upol.cz/mikroskopie/rastrovaci%20em.htm>
- [39]ECOM spol. s.r.o, [online], [cit. 04. 05. 2015], Dostupné z:  
<http://www.ecomsro.com/cz/s40-produkt/cerpadla/c39-analyticka/p53-kappa-10#>
- [40]Separlab Ltd., SYSTÉM PRO PREPARATIVNÍ KAPALINOVOU CHROMATOGRAPHII SEPARSYS 400.01, návod k obsluze [Online], [cit. 17. 04. 2015], Dostupné z:  
[http://www.separlab.eu/files/soubory/SEPARSYS\\_400\\_1.pdf](http://www.separlab.eu/files/soubory/SEPARSYS_400_1.pdf)
- [41] CHEMAGAZÍN „Software Ecomac pro jednoduchou automatizaci nejen v laboratoři“, Číslo 6 (2010)[online], [cit. 02. 05. 2015], Dostupné z:[http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin\\_2010/file/CHEMAGAZIN\\_XX\\_6\\_cl5.pdf](http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/CHEMAGAZIN_XX_6_cl5.pdf)