

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2021

Lenka Navrátilová

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ  
KATEDRA BIOLOGICKÝCH A BIOCHEMICKÝCH VĚD

Využití přírodních sorbentů na bázi celulózy pro odstraňování organických  
barviv z odpadních vod

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Univerzita Pardubice  
Fakulta chemicko-technologická  
Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lenka Navrátilová**  
Osobní číslo: **C15247**  
Studijní program: **B3912 Speciální chemicko-biologické obory**  
Studijní obor: **Klinická biologie a chemie**  
Téma práce: **Přírodní adsorpční materiály**  
Zadávající katedra: **Katedra biologických a biochemických věd**

## Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s problematikou adsorpčních materiálů.
2. Seznamte se s druhy používaných sorbentů.
3. Uveďte současné trendy odstraňování barviv.
4. Bakalářskou práci zpracujte v souladu se směrnicí č. 7/2019 vydanou Univerzitou Pardubice.

Rozsah pracovní zprávy: **25 s.**  
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**  
Forma zpracování bakalářské práce: **Tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michaela Filipi, Ph.D.**  
Ústav chemie a technologie  
makromolekulárních látek

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. července 2020**

L.S.

---

**prof. Ing. Petr Kalenda, CSc.**  
děkan

---

**prof. Mgr. Roman Kand'ár, Ph.D.**  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 28. února 2020

## **Prohlašuji:**

Tuto práci s názvem Využití přírodních sorbentů na bázi celulózy pro odstraňování organických barviv z odpadních vod jsem vypracovala samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využila, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byla jsem seznámena s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 11. 6. 2021

Lenka Navrátilová v. r.

## **Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěla moc poděkovat vedoucí práce Ing. Michaele Filipi, Ph.D. za skvělou spolupráci, cenné rady, trpělivost a velmi rychlé odpovědi na moje otázky. V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině a mému příteli za podporu při celé době studia.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá procesy čištění odpadních vod se zaměřením na adsorpční metody. Dále pojednává o typech barviv a jejich využití k barvení textilních vláken. Vyskytuje se tam také přehled nejvýznamnějších přírodních a syntetických materiálů. Zmiňuji se o základních vlastnostech celulózy. Nedílnou součástí jsou i praktické příklady využití sorbentů na bázi celulózy na čištění odpadních vod. K uvedeným sorbentům patří celulózové částice, nemodifikovaný i modifikovaný lignin.

## **Klíčová slova**

Čištění odpadních vod, adsorbenty, flotace, filtrace, celulóza, reaktivní barviva, lignin, syntetická a přírodní vlákna, bavlna

## **Title**

Use of natural cellulose-based sorbents for the removal of organic dyes from wastewater

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with wastewater treatment processes with a focus on adsorption methods. It also discusses the types of dyes and their use for dyeing textile fibers. There is also an overview of the most important natural and synthetic materials. I mention the basic properties of cellulose. An integral part are also practical examples of the use of cellulose-based sorbents for wastewater treatment. These sorbents include cellulose particles, unmodified and modified lignin.

## **Keywords**

Wastewater treatment, adsorbents, flotation, filtration, cellulose, reactive dyes, lignin, synthetic and natural fibers, cotton

## Obsah

Úvod.....	12
1 Čištění odpadních vod .....	13
1.1 Produkce odpadních vod .....	13
1.2 Charakter znečišťujících látek v odpadních vodách .....	13
1.3 Procesy čištění odpadních vod .....	13
1.4 Mechanické čištění odpadních vod .....	14
1.5 Hrubé předčištění .....	14
1.6 Lapáky písku .....	16
1.7 Usazovací a zahušťovací nádrže .....	17
1.8 Usazovací nádrže .....	17
1.9 Zahušťovací nádrže .....	18
1.10 Čistící procesy ve vodním prostředí .....	18
1.11 Půdní (zemní) filtry .....	19
1.12 Filtrační prostředí .....	20
1.13 Fyzikální způsoby čištění (filtrace, flotace, adsorpce) .....	20
1.13.1 Filtrace .....	20
1.13.2 Filtrace vrstvou zrnitého materiálu .....	20
1.13.3 Filtrace přes filtrační přepážku .....	21
1.13.4 Flotace.....	22
1.13.5 Elektroflotace.....	23
1.13.6 Adsorpce .....	24
1.14 Biologické čištění odpadních vod .....	26
1.15 Aerobní biologické pochody .....	26
1.16 Růst a množení mikroorganismů.....	27
1.17 Rozdělení mikroorganismů podle zdroje energie a uhlíku.....	28
1.18 Technologické varianty biologického čištění .....	28
1.19 Aktivace.....	28
1.20 Biologické zkrápěné filtry .....	29
1.21 Biologické stabilizační nádrže.....	29
1.22 Anaerobní biologické pochody.....	30
1.23 Reaktory pro anaerobní čištění .....	30
2 Barviva.....	30
2.1 Názvosloví barviv .....	30
2.2 Barvení textilních materiálů .....	31



2.3	Přehled nejdůležitějších přírodních a syntetických vláken .....	32
2.3.1	Celulózová vlákna.....	32
2.3.2	Vlákna živočišného původu.....	34
2.3.3	Syntetická vlákna.....	36
2.3.4	Vazba barviva s vláknem.....	38
3	Celulóza .....	39
3.1	Chemické složení celulózy.....	41
4	Konkrétní příklady využití celulózových sorbentů na odstraňování barviv .....	42
4.1	Využití smrku ztepilého, břízy bělokoré, lnu setého a řepky olejky pro odstraňování reaktivních vinylsulfonových barviv z odpadních vod.....	42
4.1.1	Lignocelulózové materiály .....	43
4.1.2	Reaktivní barviva.....	44
4.1.3	Experiment.....	45
4.1.4	Výsledky .....	46
4.1.5	Závěrečné shrnutí.....	47
4.2	Odstranění reaktivního barviva Brilliant Red HE-3B z vodných roztoků pomocí průmyslového ligninu .....	47
4.2.1	Shrnutí.....	48
4.3	Adsorpce barviva Procion Blue MX-R z vodných roztoků pomocí ligninu chemicky modifikovaného hliníkem a manganem.....	49
4.3.1	Závěrečné shrnutí.....	50
4.4	Využití celulózových částic jako adsorbent na čištění roztoků od barviv .....	51
4.4.1	Závěrečné shrnutí.....	52
5	Závěr .....	53
6	Seznam zdrojů.....	54

## Seznam grafů, obrázků a tabulek

Graf 1: Složení bavlny (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.15) .....	33
Graf 2: Složení konopí (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.16) .....	34
Graf 3: Použitelnost (a) reakce pseudo-prvního řádu, (b) pseudo-druhého řádu při sorpci reaktivního barviva Brilliant Red HE-3B na lignin při pH = 1,5; 14 g ligninu/l; 150 mg/l (Suteu, 2010, s.90) .....	49
Graf 4: UV-VIS spektra odpadních vod před a po úpravě pomocí CML-Al a CML-Mn. (A) Odpadní voda A, (B) Odpadní voda B (Adebayo, 2014, s.49).....	51
Obrázek 1: Schéma čističky odpadních vod BIO CLEANER BC 500-14000 EO (Bartoš, Pavel a Jan Brandejs, 2009, s.16) .....	14
Obrázek 2: Trojúhelníkový žlab s parabolickou clonou (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.39).....	16
Obrázek 3: Strojně stíraný horizontálně protékající lapák (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.39).....	16
Obrázek 4: Schéma horizontální sedimentační nádrže (Turic, Jakub, Veselý Jaroslav, 2016, s.33).....	17
Obrázek 5: Schéma čtvercové vertikální sedimentační nádrže (Turic, Jakub, Veselý Jaroslav, 2016, s.34).....	18
Obrázek 6: Schéma klasického uspořádání zařízení flotace (Litschmann, Patrik, Renata Biela, 2018, s.12).....	22
Obrázek 7: Schéma zařízení pro tlakovou flotaci (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.141) .....	23
Obrázek 8: Růstová křivka (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003, s.165).....	27
Obrázek 9: Podélný průřez bavlny (Hlobilová, Kristýna. 2009, s.15).....	32
Obrázek 10: Podélný průřez vlákna vlny (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.18).....	35
Obrázek 11: Strukturní vzorec polyamidu 6 (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.21).....	36
Obrázek 12: Strukturní vzorec polyethylentereftalátu (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.22).....	37
Obrázek 13: Strukturní vzorec polyakrylonitrilu (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.23).....	37
Obrázek 14: Disacharid cellobiózy (Neradová, Ilona. 2006, s.11).....	39
Obrázek 15: Schéma celulóze vlákna (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.14) .....	40
Obrázek 16: Řetězec celulózy (Neradová, Ilona. 2006, s.12).....	41
Obrázek 17: Chemické struktury reaktivních barviv Reactive Black 5, Reactive Blue 19 a Reactive Orange 16 (Filipi, Michaela. 2018, s.2).....	43
Obrázek 18: Eliminačně adiční mechanismus vinylsulfonových reaktivních barviv s celulóze vybarvovaným substrátem (Filipi, Michaela. 2018, s.4).....	45
Obrázek 19: Rovnice výpočtu sorpční kapacity (Filipi, Michaela. 2018, s.6) .....	46
Obrázek 20: Chemická struktura části makromolekuly ligninu (Suteu, 2010, s.86).....	48
Obrázek 21: (a) Struktura Methylene Blue; (b) Struktura Brilliant Red HE-3B (Suteu, 2015, s.526).....	52

Tabulka 1: Zařízení pro mechanické čištění (Bartoš Pavel a Jan Brandejs, 2009, s.14) .....	15
Tabulka 2: Oblast absorbovaného světla a komplementární barva pro daný rozsah vlnových délek (Zahradník M., 1986, s.16).....	31
Tabulka 3: Pojmy a základní údaje o celulóze (Neradová, Ilona. 2006, s.11) .....	41
Tabulka 4: Sorpční kapacita různých zdrojů lignocelulóзовého sorbentu vyjádřená v mg zachyceného reaktivního vinylsulfonového barviva na 1 g sorbentu při teplotě 25 °C a 90 °C (Filipi, Michaela. 2018, s.6).....	46

## Úvod

V této bakalářské práci se zabývám problematikou čištění odpadních vod s použitím adsorpčních procesů. Na začátku můžeme vidět způsoby čištění odpadních vod počínaje hrubým předčištěním až po fyzikální způsoby čištění (filtrace, flotace, adsorpce). Dále se zmiňuji o biologickém čištění odpadních vod včetně aerobních a anaerobních čistících procesech.

Poté bych vás ráda seznámila s typy barviv a jejich využití v barvení různých syntetických, tak i přírodních vláken. Přírodní a syntetická vlákna jsou také předmětem této bakalářské práce.

V dnešní době je velkým problémem znečišťování odpadních vod barvivy, která se dostávají do vodného prostředí z továren na barvení různých vláken. Hledají se možnosti levného a účinného odstranění těchto polutantů z odpadních vod. Ukázalo se, že vhodnými adsorbenty jsou látky na bázi celulózy či lignocelulóзовé materiály. Jako je například modifikovaný a nemodifikovaný lignin nebo celulóзовé částice. Podle studií, které jsou v této práci uvedené, se řadí tyto látky mezi funkční adsorbenty, a proto nic nebrání tomu, aby byly využívány u procesu čištění odpadních vod.

# 1 Čištění odpadních vod

## 1.1 Produkce odpadních vod

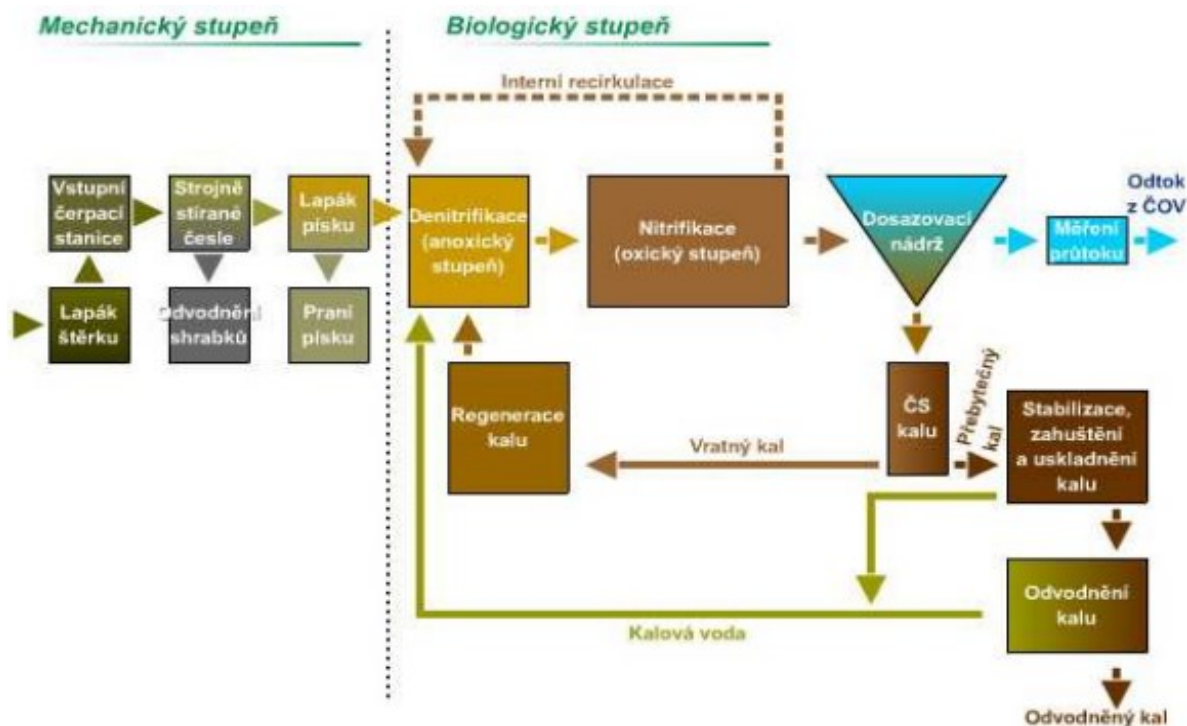
Produkce odpadních vod v ČR je v současné době téměř miliarda m<sup>3</sup> za rok, převážná většina těchto vod se nějakým způsobem čistí. Mezi odpadní vody patří vody průmyslové, srážkové a splaškové. Aby došlo k úspěšnému výběru optimální technologie čištění, musí se u každé odpadní vody znát co nejdetailnější informace o složení, nejrizikovějších látkách, které se v určité vodě vyskytují a o charakteru znečištění (Bindzar, 2009, s.32).

## 1.2 Charakter znečišťujících látek v odpadních vodách

Znečišťující látky se dělí na rozpuštěné a nerozpuštěné. Mezi rozpuštěné látky se řadí anorganické a organické. Organické jsou buď biologicky rozložitelné (cukry, mastné kyseliny), nebo biologicky nerozložitelné (azobarviva). Nerozpuštěné látky se dělí na organické a anorganické. Mezi organické látky patří biologicky rozložitelné, biologicky nerozložitelné, usaditelné, neusaditelné. Neusaditelné látky zahrnují koloidní a plovoucí. Mezi anorganické nerozpuštěné látky patří usaditelné (písek, hlína) a neusaditelné (brusný prach) (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.23).

## 1.3 Procesy čištění odpadních vod

Procesy se dělí na mechanické, chemické a fyzikálně chemické, biologické aerobní a biologické anaerobní. Mezi mechanické se řadí cezení (česle), usazování (usazovací nádrže), centrifugace (centrifugy), flotace (flotační nádrže) a filtrace (pískové filtry, síta). Do chemických a fyzikálně chemických procesů patří čiření (koagulace a srážení), neutralizace, oxidace a redukce, sorpční procesy (aktivní uhlí), procesy založené na výměně iontů, extrakce (fenol), odpařování a spalování (silně koncentrované odpadní vody), vyvážení (amoniak). Biologické aerobní procesy jsou biologické filtry, aktivační proces a stabilizační nádrže a laguny. Mezi biologické anaerobní procesy se řadí metanizace (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.24).



Obrázek 1: Schéma čističky odpadních vod BIO CLEANER BC 500-14000 EO (Bartoš, Pavel a Jan Brandejs, 2009, s.16)

## 1.4 Mechanické čištění odpadních vod

Nejčastěji se při čištění odpadních vod používají mechanické procesy, mezi které se řadí usazování a zahušťování suspenzí. Usazování i zahušťování suspenzí probíhá současně. U hrubého předčištění odpadních vod se dá pozorovat usazování v lapácích písku a v usazovacích, resp. dosazovacích nádržích.

## 1.5 Hrubé předčištění

Úkolem hrubého předčištění je odstranění velkých plovoucích nebo vodou odnášených předmětů. Hrubé předčištění je také nazýváno jako ochranná část čistírny. Tyto nežádoucí látky by mohly způsobit poruchy strojního zařízení či narušovat pracovní procesy. Zařízení hrubého předčištění jsou lapáky štěrku a česle. Pomocí lapáků štěrku se odstraňují velké a těžké předměty. Lapák štěrku je jímka umístěná těsně před čistírnou na přivaděči odpadních vod. Česle se řadí k významným částím hrubého předčištění městských odpadních vod. Slouží hlavně k zachycování jak větších předmětů, jako jsou větve, shluky trávy, hadry, tak hrubých nerozpuštěných částic, jako jsou větší zbytky ovoce, zeleniny, papíry, korkové zátky a cigaretové filtry. Česle se skládají z tzv. česlic (ocelových prutů), které mají kruhový, obdélníkový či lichoběžníkový profil a jsou zasazeny do pevného rámu. Česle podle vzdálenosti

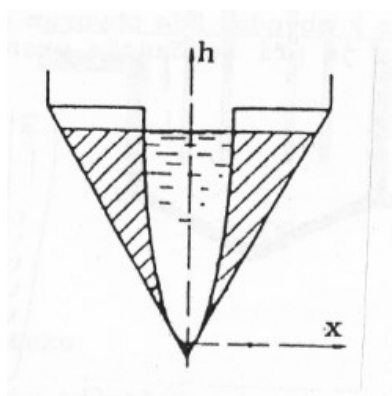
mezi česlicemi se dělí na česle hrubé a jemné. Česle hrubé mají šířku mezi česlicemi větší než 60 mm a jemné česle mají průřez menší než 40 mm. Hrubé a jemné česle za sebou se využívají ve velkých čistírnách odpadních vod. U menších čistíren odpadních vod se instalují jen česle hrubé. Materiály, které se hromadí mezi česlicemi, se nazývá shrabky. K jejich odstraňování dochází strojním či ručním stíráním pomocí hrabel. Strojní stírání se rozlišuje horní nebo spodní. Toto stírání se provádí spíše na větších čistírnách. Při stírání je důležitá průtočná rychlost ve žlabu. Neměla by klesnout pod 0,3 m/s, aby nedocházelo k usazování písku a zároveň by neměla stoupnout nad 0,9 m/s, při takové vysoké rychlosti by byly strhávány již zachycené částice. Jelikož shrabky jsou materiál značně hygienicky závadný, je důležité u jejich likvidace postupovat pečlivě. Nejbezpečnějším zpracováním shrabků je jejich spalování při teplotě kolem 700 °C. Dalšími možnostmi zpracování jsou kompostování, skládkování po hygienickém zabezpečení vápnem či chlorovým vápnem a ukládání v kontejnerech (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.36).

Tabulka 1: Zařízení pro mechanické čištění (Bartoš Pavel a Jan Brandejs, 2009, s.14)

<b>Metoda</b>	<b>Používaná zařízení</b>
<b>Filtrace (cezení):</b> otvory, kterými protéká cezená voda, jsou rozměrově menší než zachycované nerozpuštěné příměsi	Síta Pískové lože Ultrafiltrační membrány Kalolisy Česle Bubnové filtry Sítopásové lisy
<b>Usazování a zahušťování:</b> pro jejich průběh je klíčová gravitační síla a rozdíl hustot oddělovaných složek	Lapák písku a štěrků Zahušťovací nádrže Usazovací nádrže Dosazovací nádrže
<b>Flotace:</b> hustota příměsí je snižována uměle a k oddělení složek (vztlakem) je třeba vzniklý rozdíl hustot	Elektroflotační vany Flotační vany s tlakovým vzduchem
<b>Odstředování (centrifugace):</b> odstředivá síla a rozdíl hustot oddělovaných složek se v této metodě využívají	Kontinuální odstředivky

## 1.6 Lapáky písku

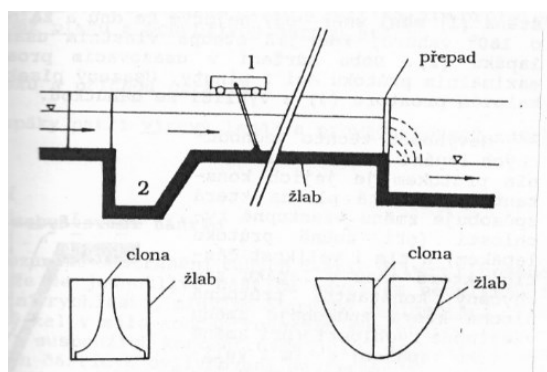
Pomocí lapáků písku je možné odstranit suspendované, těžké anorganické látky jako písek, úlomky skla a jemná škvára. Tyto látky se musí odděleně odstranit od ostatních nerozpuštěných látek organického původu. Nerozpuštěné látky organického původu se odstraňují v sedimentačních nádržích. Lapáky písku pracují na principu snížení průtočné rychlosti vody. Za ideálních podmínek by se v lapáku písku měl zachytit pouze minerální podíl suspenze do velikosti zrn 0,1 až 0,2 mm bez organických příměsí. Kvůli konfiguraci terénu a povrchové úpravě odvodňovacích ploch je množství písku v městských odpadních vodách velmi různé. Podle směru průtoku vody lapáky dělíme na lapáky písku horizontální, vertikální a lapáky s příčnou cirkulací (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.37).



h: celková hloubka žlabu

x: dno žlabu

Obrázek 2: Trojúhelníkový žlab s parabolickou clonou (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.39)



1: shrabovací zařízení

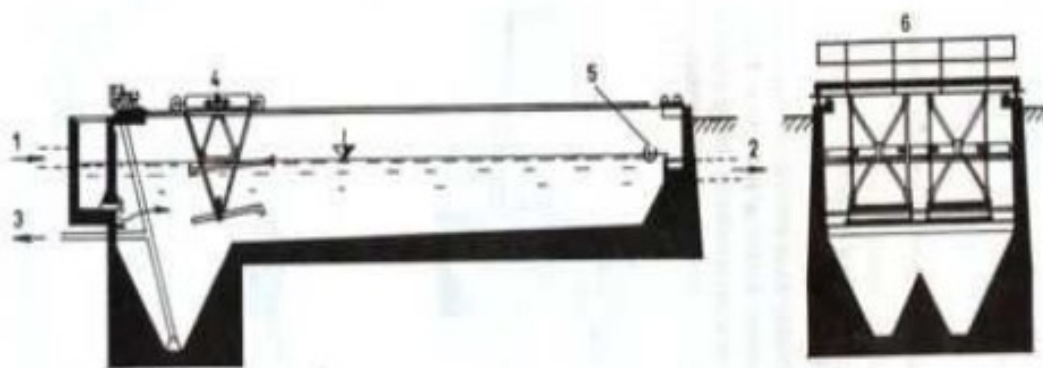
2: kalová jímka

Obrázek 3: Strojně stíraný horizontálně protékající lapák (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.39)



## 1.7 Usazovací a zahušťovací nádrže

Usazování se dá popsat jako odstranění tuhých částic vlivem tíhového zrychlení. Pokud se jednotlivé částice neovlivňují navzájem a klesají konstantní rychlostí, jedná se o prostou sedimentaci. Prostou sedimentací sedimentuje zrnitý kal v málo koncentrovaných suspenzích (max 0,5 objemových %). U koncentrovanějších suspenzí dojde vlivem sedimentace prvních částic k ovlivňování sedimentační rychlosti částic druhých, a tak se pád druhých částic zpomaluje. Tomuto jevu se říká usazování rušené (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.41).



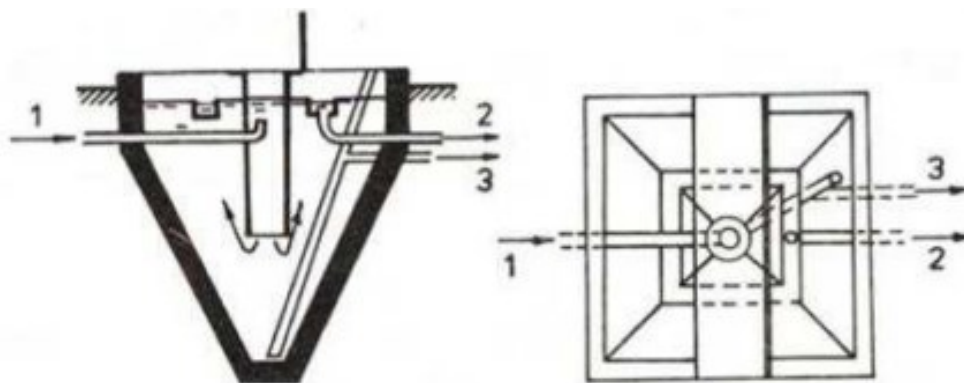
Obrázek 4: Schéma horizontální sedimentační nádrže (Turic, Jakub, Veselý Jaroslav, 2016, s.33)

1: přítok, 2: odtok, 3: kal, 4: mostový shrabovač, 5: ponořená stěna se žlabem na plovoucí látce, 6: příčný řez

## 1.8 Usazovací nádrže

Průtočné usazovací nádrže se většinou používají na separaci tuhé fáze od kapaliny. Nádrže s přerušovaným provozem se nazývají dekantační. Mezi základní typy průtočných nádrží se řadí pravoúhlé s horizontálním průtokem, kruhové s horizontálním průtokem (radiální) a vertikálně protékané usazovací nádrže.

Jsou známy 2 typy proudění kapaliny v usazovacích nádržích, a to laminární a turbulentní. U laminárního proudění se kapalina pohybuje v tenkých rovnoběžných vrstvách. U turbulentního proudění se kapalina nepohybuje ve vrstvách, ale víří se a vykonává složité pohyby.



Obrázek 5: Schéma čtvercové vertikální sedimentační nádrže (Turic, Jakub, Veselý Jaroslav, 2016, s.34)

1: přítok, 2: odtok, 3: kal

## 1.9 Zahušťovací nádrže

Zahušťovací nádrže slouží k odvodňování získaného kalu z usazovacích nádrží před jeho dalším zpracováním. Tyto nádrže se dělí na dekantační a průtočné. Suspenze se dekantačních nádržích po napuštění nechává v klidu. Dojde tak k usazování a pak k zahušťování suspenze. V zahušťovací průtočné nádrži se rozeznávají 3 pracovní zóny. Jsou to zóna relativně čisté kapaliny, přechodná zóna a zóna zahušťovací (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.44, 45).

## 1.10 Čistící procesy ve vodním prostředí

Čistící procesy probíhající ve vodním prostředí se využívají hlavně u biologických nádrží a akvakultur. Tyto procesy se dělí na anaerobní a aerobní, a to podle obsahu kyslíku v prostředí, ve kterém probíhají. Anaerobní pochody probíhají v prostředí bez kyslíku. Anaerobní procesy převládají v akumulacích, vyhnívacích a sedimentačních nádržích, ale i aerobních biologických nádržích u vtoku odpadní vody, v zimě pod ledem a při nárazovém přetížení odpadními vodami. U anaerobních procesů lze pozorovat pachové závady, které mohou obtěžovat okolí.

Nejdůležitější mikrobiální, převážně anaerobní samočistící procesy jsou:

- převod močoviny na amonné sloučeniny
- štěpení celulózy a sacharidů
- rozklad bílkovin na jednoduché štěpné produkty
- redukce síranů na sirovodík, dusičnanů na dusitany, amoniaku na dusík
- štěpení mastných kyselin při značné tvorbě metanu

Přirozený čistící proces a odbourání organické hmoty v aerobních biologických nádržích probíhá v několika fázích, které v podstatě jsou sedimentace usaditelných látek, biologická nebo chemická flokulace, oxidace nebo redukce a postupná mineralizace organické hmoty. Bakterie usazené v kalu, ale i částečně řasy se podílejí na biologické flokulaci, kterou lze zvýšit úpravou pH (vápenným mlékem a přidáním vhodných flokulantů). Za významné producenty kyslíku se dají označit řasy ve vegetačním období při fotosyntéze. Dalším zdrojem kyslíku jsou i odpadní vody a kyslík obsažený a rozpuštěný v anorganických či organických látkách. Množství kyslíku, které je produkováno v procesu fotosyntézy, závisí na intenzitě sluneční radiace, teplotě, druhu řas, složení odpadní vody a parametrech biologické nádrže (Šálek, 1995, s.16, 17).

## 1.11 Půdní (zemní) filtry

Půdní filtry se používají k dočištění odpadních vod za septiky. Dají se využít pro čištění odpadních vod jednotlivých domů, skupiny domů, osad, rekreačních a sportovních zařízení, hotelů. Plocha zemního filtru  $S_F$  se vypočítá ze vztahu:

$$S_F = n \cdot q \cdot k / h \quad (\text{Šálek, 1995, s.29})$$

kde  $n$  je počet připojených obyvatel,  $q$  je specifická spotřeba vody ( $\text{m}^3/\text{osoba}/\text{den}$ ),  $k$  je součinitel charakterizující místní podmínky ( $k = 1,0$  až  $1,6$ ),  $h$  je denní nápuštná výška (m).

Zatížení půdního filtru závisí na složení odpadní vody, předchozím předčištění, složení, druhu a výšce náplně filtru a požadovaném účinku.

## 1.12 Filtrační prostředí

Filtrační prostředí patří k nejdůležitějším součástem půdních filtrů. To rozhoduje o výsledném čistícím účinku, konstrukčním uspořádání, životnosti půdního filtru a technologii provozu. Filtrační materiál se dá rozdělit podle fyzikálních a chemických vlastností do následujících skupin:

- umělé materiály se sorpčními vlastnostmi
- minerální filtrační materiál charakteru drobného šterku a písku
- organické materiály přesně definovaných vlastností, přirozené a umělé
- minerální materiál s upravenými sorpčními vlastnostmi (obohacený o sloučeniny železa, vápníku) (Šálek, 1995, s.29).

## 1.13 Fyzikální způsoby čištění (filtrace, flotace, adsorpce)

### 1.13.1 Filtrace

Používá se při čištění odpadních vod tehdy, jestliže je požadována nízká koncentrace nerozpuštěných látek v odtoku. Filtrace se také používá jako předčištění před procesy, u kterých by mohla přítomnost nerozpuštěných látek v čištěné vodě vadit (úprava vody ionexy, membránové separační procesy, adsorpce). Nebo se využívá pro dočištění odtoku z biologických čistíren. Pro zachycení zbylých vloček po koagulaci se rovněž používá filtrace.

Rozlišují se dvě technologické varianty filtrace při čištění odpadních vod:

- filtrace koncentrovaných suspenzí přes filtrační přepážku
- filtrace suspenzí s malou koncentrací vrstvou zrnitého materiálu

### 1.13.2 Filtrace vrstvou zrnitého materiálu

Pokud prochází voda s nerozpuštěnými látkami vrstvou zrnitého materiálu určitých vlastností, ulpívají na povrchu zrněk nerozpuštěné látky. Kombinace cezení, sedimentace, adsorpce a působení elektrostatických sil je mechanismem zachycení nerozpuštěných látek. Jako náplň filtrů se využívají křemičité písky o různé velikosti zrn (1-4 mm). Upravovaná voda se dovádí na frakci s největším průměrem zrn. Filtry, které mají vyšší kalovou kapacitu, obsahují dva druhy filtračních materiálů. Horní vrstva je z jemně drceného antracitu a dolní vrstva je z křemičitého písku.

Ve filtrační vrstvě existují různé tlakové poměry a díky nim se dělí filtry na beztlaké a tlakové. Za normálního atmosférického tlaku pracují beztlaké filtry (nazývané též otevřené rychlofiltry), výška vodního sloupce filtrované vody udává hnací sílu filtrace. Tyto filtry mají

sice poměrně malou rychlost filtrace, ale lze je realizovat s velkou filtrační plochou a tím lze přefiltrovat velké objemy vody. Nejčastěji se tyto filtry využívají jako koncový stupeň úpravy vody v městských nebo průmyslových vodárnách. Při úpravě a čištění průmyslových vod se využívají spíše uzavřené tlakové filtry.

Filtraci je možné spojit s adsorpcí, při které se používají výplně s aktivním granulovaným uhlím. Ropné látky se dají zachytit filtrací přes koks, keramzit a perlit. Látky, jejichž specifická hmotnost je menší než specifická hmotnost vody, lze použít jako filtrační materiál. Částice z pěněného polystyrenu se mohou také používat jako filtrační materiál. Mezi výhody této varianty filtrace patří lehkost náplně i celého zařízení, snadnost praní filtru a možnost využívat filtr v širokém rozmezí jeho zatížení (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.136, 137, 138).

### **1.13.3 Filtrace přes filtrační přepážku**

Tato metoda se hlavně využívá pro odvodňování koncentrovaných suspenzí a kalů. Jak už název filtrace napovídá, k oddělení kapaliny od pevných látek dochází na filtrační přepážce. Látky, které se nerozpustí, se zachytávají na přepážce a tvoří filtrační koláč. Za optimálních podmínek je filtrační koláč porézní a díky tomu může dále probíhat filtrace dalšího objemu suspenze. Mechanismus zachycení je podobný jako u filtrace přes zrnitou vrstvu a účinnost zachycení odstraňovaných látek se postupně zvyšuje.

Pokud probíhá filtrační cyklus, dochází ke zvyšování vrstvy filtračního koláče a tím vzrůstá i její filtrační odpor. Filtrace se zastaví, pokud filtrační odpor překročí hnací sílu. Vzniklý filtrační koláč se proto musí odstraňovat. Existují 2 způsoby odstraňování filtračního koláče, a to kontinuální odstraňování (u zařízení, která pracují nepřetržitě) a periodické odstraňování (u diskontinuálních zařízení). Filtrace přes filtrační přepážku má mnoho výhod, hlavní výhodou je získání nerozpuštěné látky s vysokým obsahem sušiny, tyto látky se mohou dále využívat nebo likvidovat. Filtrace přes filtrační přepážku se dá technicky realizovat jako vakuová filtrace, kalolis nebo pásové síto.

Vakuové filtry se dají popsat jako otáčivé bubny. Jejich povrch pokrývá filtrační plachetka. Když se ponoří buben do suspenze, filtrát se dostává dovnitř bubnu a dále je vývěvou odváděn. Filtrační koláč se tvoří na filtrační plachetce, který se dále suší prosáváním vzduchem, nebo se promývá vodou. V další části vakuového filtru se koláč odfukuje a odstraňuje škrabkou.

V rámovém kalolisu se nacházejí rámy a desky. Filtrační plachetky jsou přetažené přes horní okraje rámu. Přes tyto filtrační plachetky probíhá filtrace. Suspenze, kterou je třeba

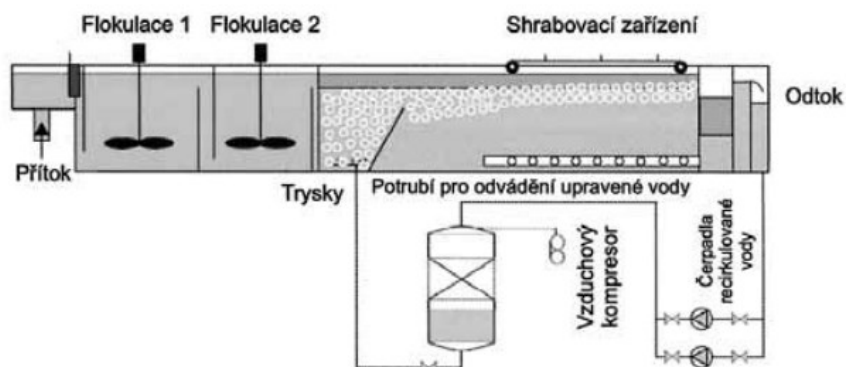
přefiltrovat, se dostává pod tlakem kanálem v ose kalolisu dovnitř komor, které jsou uvnitř rámu. Filtrát dále steče do sběrných kanálů. Protože mají kalolisy mnoho výhod, využívají se často pro filtrování průmyslových suspenzí. Hlavní výhodou je to, že je možné zpracovávat všechny druhy suspenzí. Dokáže se získat filtrační koláč s nejvyšší sušinou díky tlakovému rozdílu až 1,2 MPa. Malou nevýhodou je to, že práce kalolisu je diskontinuální, což se musí řešit buď uskladněním kalu, nebo použitím více kalolisů v paralelním uspořádání.

U pásového filtru 2 plachetky unášejí odvodňovanou suspenzi, z té se dostává volná voda. Dále dochází pod tlakem k odvodňování suspenze pomocí lisování mezi válci. Na konec se odvodněný kal odstraňuje a odvádí. Pásové filtry se využívají nejčastěji pro odvodňování kalů na městských čistírnách odpadních vod (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.138, 139).

### 1.13.4 Flotace

Flotace se řadí k separačním procesům, které se používají k oddělování tuhé fáze od kapalné. Nerozpuštěné látky se spojují s mikrobublínkami plynů, a tak vznikají flotační komplexy. Jejich specifická hmotnost je menší než specifická hmotnost kapaliny. Díky menší specifické hmotnosti stoupají flotační komplexy ke hladině, ze které je lze snadno odstranit. Pomocí flotace se odstraňuje barva při recyklaci papíru.

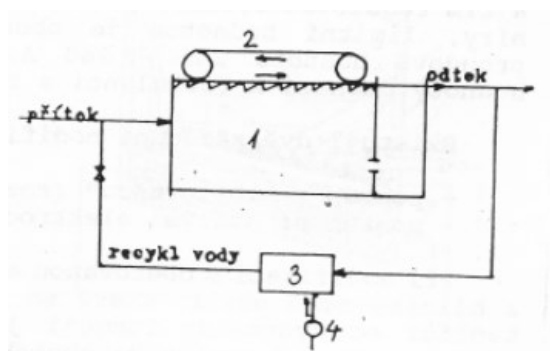
Flotace je metoda, která se využívá pro odstranění nerozpuštěných látek, jejichž specifická hmotnost se blíží specifické hmotnosti vody. U těchto látek nelze použít pro odstranění sedimentaci. Ta totiž probíhá pomalu nebo neprobíhá vůbec. Látky, které se dají odstraňovat flotací, se vyskytují v papírenských vodách, v textilním průmyslu (prádelny a barvírny), v potravinářském průmyslu (tuky) a v průmyslu zpracování ropy.



Obrázek 6: Schéma klasického uspořádání zařízení flotace (Litschmann, Patrik, Renata Biela, 2018, s.12)

Jemnobublinná aerace je proces, při kterém se do systému dodává vzduch potřebný pro flotaci ve formě jemných bublinek. U tohoto procesu se jedná o tzv. mechanickou flotaci. Bublínky vzduchu, které vzniknou tímto způsobem jsou poměrně velké (o průměru až 1 mm),

a proto nemají flotační komplexy příliš velkou stabilitu. Aby se zvětšila stabilita komplexů, přidávají se pěnotvorné látky (tenzidy) a sběrné látky. Další možností, jak zvětšit stabilitu flotačních komplexů, je tříštění bublinek ultrazvukem. Kromě mechanické flotace existují ještě jiné druhy, které jsou založeny na tom, že bublinky plynu vznikají přímo v odpadní vodě změnou podmínek systému. Mezi tyto druhy patří vakuová flotace, tlaková flotace, biologická flotace, chemická flotace a elektroflotace. Vakuová flotace je založena na snížení tlaku ve flotační jednotce pod 0,1 MPa. Expanze tlakové vody, nasycené vzduchem za vyššího tlaku, než je tlak atmosférický je klíčová pro tlakovou flotaci. U biologické flotace se tvoří dusík biologickou denitrifikací. Přídavek chemikálií, které se ve vodě rozkládají za vývinu plynu, se využívá u chemické flotace. U elektroflotace dochází k elektrolyze vody za vzniku vodíku a kyslíku. Z výše uvedených postupů se využívá pro čištění průmyslových odpadních vod hlavně tlaková flotace a elektroflotace. Elektroflotaci se bude věnovat další kapitola (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.140, 141)



1: flotační nádrž, 2: stírací zařízení, 3: tlakové sycení vody, 4: kompresor

Obrázek 7: Schéma zařízení pro tlakovou flotaci (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.141)

### 1.13.5 Elektroflotace

Bublinky plynu (v tomto případě vodíku a kyslíku) potřebné pro flotaci u této metody vznikají elektrolyzou čištěné vody. Tyto bublinky jsou velmi jemné a když se vhodně umístí elektrody, tak se bublinky dostanou do celého objemu reaktoru a ani není nutné směs míchat. Tvar použitých elektrod ovlivňuje velikost bublinek. Nejlepší tvar katody pro flotaci je tvar svíčky. Účinnost flotace závisí na velikosti a množství bublinek. Byly popsány 2 základní modifikace elektroflotace. První modifikací je postup s „obětovanou“ (rozpouštěnou) anodou a druhá modifikace je postup se stálými elektrodami z inertního materiálu. U první modifikace se využívají elektrody z hliníku nebo oceli. Tyto elektrody se během elektrolyzy rozpouštějí a hydroxidy, které se tvoří, působí jako koagulační činidlo.

Flotační jednotka se skládá ze 3 oddílů, v jejichž spodní části se nacházejí elektrody. V první sekci se elektroda tvořená hliníkovými deskami rozpouští, a tak vzniká  $Al(OH)_3$ , který

působí koagulačně. Ve druhé sekci se vyskytuje anoda z grafitové desky, nad kterou je umístěna mřížková katoda. Díky tomuto uspořádání se mohou tvořit velmi jemné bublinky plynu. Ve třetí sekci se nacházejí vertikálně umístěné grafitové anody a nad nimi je opět mřížková katoda. Díky vertikálnímu uložení elektrod dochází k dlouhému styku odpadní vody s povrchem elektrod. Velkým nedostatkem elektroflotace je to, že dochází ke vzniku třaskavé směsi vodíku s kyslíkem.

V současné době dochází k modernizaci i v oblasti elektroflotace. U moderních typů se vyskytují stálé nerozpustné elektrody. Do odpadní vody se samostatně dává koagulační činidlo nebo polymerní organický flokulant podle stupně znečištění. Katoda se používá z nerezové oceli a anoda z titanu, někdy kvůli snížení přepětí se potahuje ušlechtilým kovem např. paladiem. Aby došlo ke zvýšení bezpečnosti, je katodový a anodový prostor oddělen diafragmami (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.142, 143).

### **1.13.6 Adsorpce**

Adsorpce probíhá tak, že se při ní odstraňují látky z roztoku díky tomu, že se váží na povrch adsorbentu. Pokud se přidá k roztoku nějaké látky tuhá fáze (adsorbent), začne koncentrace látky v kapalině klesat, protože dochází k adsorpci na povrch přidané tuhé fáze. Čím je k dispozici větší povrch, tím výraznější je pokles. Nejlepší adsorbenty jsou látky s velkým měrným povrchem např. aktivní uhlí.

Za nějaký čas dojde v roztoku k rovnováze – pokles koncentrace látky v roztoku se zastaví. Koncentrace rozpuštěné látky z počáteční hodnoty klesne na rovnovážnou hodnotu. Velikost rovnovážné hodnoty závisí na poměru mezi množstvím látky, které se odstraňuje adsorpcí a na množství přidaného adsorbentu. Čím více je adsorbentu, tím nižší je rovnovážná hodnota koncentrace.

Při adsorpci existují 3 druhy sil, které se uplatňují mezi látkou a povrchem adsorpčního činidla. Podle povahy sil se rozlišují 3 základní typy adsorpce: fyzikální adsorpce, chemisorpce a iontová adsorpce. U fyzikální adsorpce se vyskytují poměrně slabé, mezimolekulární Van der Waalovy síly. Několik vrstev adsorbované látky se může vázat podle prostorových množství v pórech adsorbentu. Dochází tak k vícevrstvé sorpci. Vazebné síly v tomto typu adsorpce jsou velmi slabé, a proto může dojít k uvolnění zachycené látky zpět do roztoku (= desorpci). Když roste teplota roztoku, klesá rychlost adsorpce. U chemisorpce se objevuje chemická reakce a sdílení elektronů adsorbentu a adsorbátu. U adsorbentu se může chemisorpce vyskytovat jen na určitých, chemicky reaktivních místech. Protože vzniká



chemická vazba, může se tvořit jen jedna vrstva zachycených látek na povrchu adsorbentu (= monomolekulární adsorpce). Ta bývá zpravidla nevratná. Rychlost chemisorpce s rostoucí teplotou roste, ale je pomalejší než fyzikální adsorpce. Při výměně iontů se objevuje třetí typ adsorpce – iontová adsorpce. U ní se uplatňuje elektrická přitažlivost mezi adsorbentem a adsorbátem.

Aktivní uhlí se považuje za nejkvalitnější adsorbent s nejvyšší adsorpční mohutností, a má tak univerzální použití při úpravě vody, ale i při čištění odpadních vod. Aktivní uhlí se využívá ve 2 formách – jako granulované, nebo práškovité. Jako sorbent se používají také vločky hydratovaných oxidů železa a hliníku (při čiření vody), anorganické sorbenty na bázi hlinitokřemičitanů, např. Experlit, Vapex hydrofobizovaný (zachycení ropných látek), čerstvě vysrážený  $\text{CaCO}_3$ , gely oxidu křemičitého, bentonitové hlinky. Když se dočišťují některé druhy odpadních vod adsorpcí, využívají se i další látky, jako antracit, koks, polokoks, aktivované hnědé uhlí, rašelina, popílký a škvára. Výhodou těchto látek je jejich nízká cena, proto se po spotřebě neregenerují, ale spalují.

Hlavní faktory, které ovlivňují adsorpci, jsou vlastnosti adsorbentu a polarita adsorbované látky a rozpouštědla. Když probíhá adsorpce, adsorbovaná látka soutěží s rozpouštědlem o obsazení adsorpčních center. Tady platí pravidlo o vzájemné afinitě látek podobné polarity. Např. aktivní uhlí je nepolární sorbent, a proto na něm nejlépe probíhá adsorpce nepolárních nebo málo polárních látek. Přednostně se sorbují látky s větší molekulovou hmotností. Poměr mezi velikostí mikropórů a sorbované molekuly může být omezujícím faktorem. Schopnost adsorpce velkých makromolekulárních látek může klesat z prostorových důvodů. U sloučenin, které jsou schopny disociace, se uplatňuje i vliv pH. Adsorpce klesá s rostoucí disociací. Optimální pH pro adsorpci organických kyselin se udává jako  $\text{pK}-3$  a pro organické báze jako  $\text{pK}+3$ . Když jsou kyselé i zásadité části disociovány do stejného stupně a molekula má proto nulový náboj, je dosaženo maximální adsorpce u amfolytů. Vliv teploty na adsorpci je nepatrný, ale obecně platí, že adsorpce klesá, pokud se zvyšuje teplota.

Když dojde k vyčerpání sorbentu, musí se poté obnovit jeho adsorpční schopnosti. To se provádí regenerací. To, jak se provádí regenerace, závisí na druhu sorbentu a charakteru zachycených látek. Pokud se ve vodárnách využívají sorpční filtry s aktivním uhlím, regenerují se proplachováním hydroxidem nebo uhličitanem sodným a pak se musí propařit vodní parou o teplotě 105-110 °C při tlaku 0,1 MPa. U biologické regenerace se aktivní uhlí provzdušňuje ve směsi s aktivovaným kalem 1-2 dny. Neionogenní polymerní sorbenty se regenerují

organickými rozpouštědly (ethanol, methanol, aceton, benzen) (Dohányos, Koller, Strnadová, 2007, s.156-161).

### **1.14 Biologické čištění odpadních vod**

Biologické čistírenské procesy se dělí na oxickou (kyslíkatou), anoxickou (bezokyslíkatou) a anaerobní oblast. V oxické oblasti probíhají oxidace organických látek a nitrifikace a konečným akceptorem elektronů je rozpuštěný kyslík. V anoxické oblasti se nevyskytuje rozpuštěný kyslík a probíhá v ní denitrifikace. V této oblasti je konečným akceptorem elektronů dusitanový a dusičnanový dusík. V anaerobní oblasti je vlastní organická látka konečným akceptorem elektronů a probíhají v ní desulfurace, depolymerace polyfosfátů a methanogeneze (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.163).

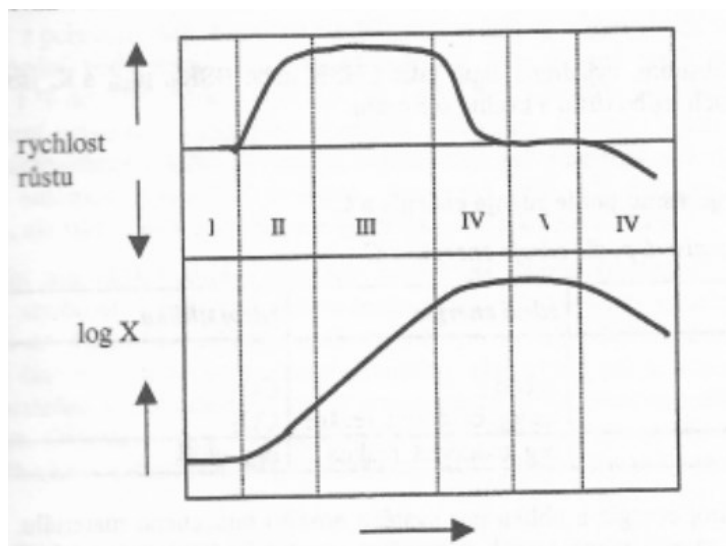
### **1.15 Aerobní biologické pochody**

Aerobní mikroorganismy pomocí svých enzymů rozkládají organické látky oxidačními procesy. Při těchto procesech používají k oxidaci molekulární kyslík. Na konci této složité reakce jsou  $\text{CO}_2$  a  $\text{H}_2\text{O}$  a pokud substrát obsahuje dusík, vzniká zpravidla amoniak. Aby mohly mikroorganismy syntetizovat svoji buněčnou hmotu, potřebují k tomu biogenní prvky, které mohou získávat z vnějšího prostředí. Z makrobiogenních prvků bývá při čištění průmyslových odpadních vod málo N a P.

Pro biologické čištění odpadních vod v aerobních podmínkách je nutné dodržení všech výše uvedených podmínek. Organická hmota, která je použita jako substrát, bývá přítomna v odpadní vodě, stejně jako biogenní prvky. Pokud nějaké biogenní prvky chybí, musí být deficit dotován. Nejdůležitější však pro aerobní proces je přítomnost kyslíku. Způsoby aerobního čištění odpadních vod se dělí na přirozené, které simulují přírodní podmínky, a na umělé, které probíhají v reaktorech. Mezi umělé způsoby čištění patří procesy s biomasou ve vznosu a procesy s biomasou přisedlou (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.163).

## 1.16 Růst a množení mikroorganismů

Jako zásobní látky se syntetizují nejčastěji polysacharidy a lipidy. Tato syntéza se projeví zvětšováním hmotnosti biomasy a zvyšováním počtu mikroorganismů. Růstová křivka má celkem 6 různých fází:



Obrázek 8: Růstová křivka (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003, s.165)

- I. **Lagová fáze:** rychlost růstu je nulová, fyzikální a chemické složení prostředí, vhodnost složky média pro mikroorganismy a druh mikroorganismů ovlivňují trvání této fáze
- II. **Fáze zrychleného růstu:** zvyšuje se postupně rychlost růstu a na konci této fáze dosahuje maxima, faktory, které ovlivňují trvání této fáze, jsou přibližně stejné jako u lagové fáze
- III. **Exponenciální fáze růstu:** rychlost růstu je v této fázi maximální, a to až do té doby, kdy klesne koncentrace substrátu na nějakou limitující hodnotu
- IV. **Fáze zpomaleného růstu:** průběžně klesá rychlost růstu a na konci této fáze klesne na nulu
- V. **Stacionární fáze:** rychlost růstu se rovná nule, z roztoku je vyčerpán substrát, a proto se zastavil růst mikroorganismů
- VI. **Fáze poklesu:** mikroorganismy odumírají, protože mají nedostatek potravy, také se pozvolna rozkládají, klesá jejich počet i hmotnost (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.165)

## 1.17 Rozdělení mikroorganismů podle zdroje energie a uhlíku

Aby mohly organismy syntetizovat nový buněčný materiál, musí mít zdroj energie a uhlíku. Nutné jsou také anorganické prvky jako N, P, S, K, Ca a Mg. CO<sub>2</sub> (pro autotrofní organismy) a organická hmota (pro heterotrofní organismy) jsou základními zdroji uhlíku. Další členění organismů podle nároků na kyslík je na aerobní (s kyslíkem), anaerobní (bez kyslíku) a fakultativní organismy (s kyslíkem i bez kyslíku).

U růstu mikroorganismů a příjmu energie závisí také na enzymech. Působí jako organické katalyzátory a jsou produkovány živými buňkami. Úkolem enzymů je urychlovat chemické reakce. Strukturně mohou být enzymy proteiny nebo proteiny kombinované s anorganickými nebo organickými molekulami s malou molekulární hmotou. Existují extracelulární a intracelulární enzymy. Extracelulární enzymy upravují látku, která neprochází stěnou buňky, na formu, která se může transportovat dovnitř buňky. Intracelulární enzymy katalyzují syntézu uvnitř buňky (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.166).

## 1.18 Technologické varianty biologického čištění

Biologické čištění odpadních vod vychází z principu přeměny organického znečištění a dalších biogenních prvků na flokulující usaditelnou biomasu a anorganickou hmotu. Biomasa a anorganická hmota se usazují v dosazovacích nádržích. Předřazeným procesem biologického čištění odpadních vod bývá primární sedimentace, protože je nejefektivnějším způsobem zachycení usaditelných látek. Biologické čištění je ovšem založeno na odstraňování organických látek ve formě koloidů nebo v rozpuštěné formě. Aktivační systémy, stabilizační nádrže a biofilmové reaktory jsou nejčastěji používanými technologickými variantami biologického čištění odpadních vod (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.166).

## 1.19 Aktivace

Principem biologického čištění je vytvoření aktivovaného kalu v provzdušňované aktivační nádrži. Aktivovaný kal tvoří shluk mikroorganismů, většinou bakterií. Jsou agregované tzv. bioflokulací. Shlukování bakteriálních jedinců probíhá kvůli zbytnění jejich buněčné blány. Ke zbytnění dochází kvůli tvorbě extracelulárních polymerů, které jsou složeny převážně z polysacharidů, částečně také z bílkovin a dalších organických látek. Pokud se provzdušňovaná odpadní voda obsahující aerobní bakterie, dojde k bioflokulaci. Hmotnostní podíl uvedených polymerů ve směsné kultuře se pohybuje od cca 1 % do 6 %, záleží na stáří kalu, které se pohybuje od 1 do 5 dnů. Pokud se dál zvyšuje stáří kalu, hmotnostní podíl se již nemění. Jako organické flokulanty v tomto procesu působí extracelulární polymery. Pomocí těchto

polymerů se bakterie shlukují do vloček aktivovaného kalu. Aktivovaný kal je vlastně směsná bakteriální kultura, která dále obsahuje i jiné organismy (houby, plísňe, prvoky, kvasinky). Také může obsahovat z vody adsorbované suspendované a koloidní látky.

Základní uspořádání aktivačního procesu se skládá z aerované nádrže (reaktoru) a dosazovací nádrže. V aerované nádrži dochází k procesu čištění odpadní vody a současně se produkuje aktivovaný kal. Dále se směs odpadní vody a aktivovaného kalu dostává do dosazovací nádrže, kde se obě složky oddělují sedimentací. Odpadní vyčištěná voda odtéká z biologické čistírny odpadních vod, ale zahuštěný aktivovaný kal se vrací do aktivační nádrže. V ní musí být udržována dostatečná koncentrace aktivovaného kalu, protože je nositelem čistícího procesu (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.167).

## 1.20 Biologické zkrápěné filtry

Kultivace biomasy ve formě nárostů tzv. biofilmu je charakteristická pro biofilmové reaktory. Biofilmové reaktory se dělí podle typu nosiče a podle způsobu jeho kontaktu s odpadní vodou či se vzduchem.

## 1.21 Biologické stabilizační nádrže

Stabilizační nádrže se řadí k tzv. zemním nádržím, někdy bývají označovány jako biologické rybníky. Označení biologické rybníky se ovšem doporučuje využívat jenom pro takové stabilizační nádrže, ve kterých jsou alespoň část roku chovány ryby. Ve stabilizačních nádržích dochází k biologickému čištění odpadní vody analogickým způsobem.

Dělení stabilizačních nádrží podle funkce:

- pro biologické čištění odpadních vod
- pro dočišťování odpadních vod po biologickém čištění
- kombinované = jak pro biologické čištění odpadních vod, tak i dočišťování odpadních vod

Podle účasti molekulárního kyslíku v čistícím procesu se stabilizační nádrže rozdělují na nádrže aerobní a anaerobní. Vedle nich existují i nádrže fakultativní. V nich po určitou dobu probíhají procesy anaerobní a poté i procesy aerobní. Oba tyto procesy se mohou dít i současně, na dně v sedimentech procesy anaerobní a v horních procesy aerobní. Pro čištění koncentrovanějších odpadních vod se využívají anaerobní stabilizační nádrže. Tvoří první stupeň systému čištění odpadních vod (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.167).

## 1.22 Anaerobní biologické pochody

Na rozkladu organických látek za anaerobních podmínek se podílí několik mikrobiálních skupin. Jejich metabolické pochody na sebe navazují. Produkty reakce metabolismu jedné skupiny se stávají substrátem pro další skupinu.

První reakcí, která má za úkol rozkládat biopolymery, je hydrolýza (účast  $H_2O$ ). Fermentační stupeň rozkladu se pojmenovává jako acidogeneze. Důležitou složkou v procesu methanizace je kyselina octová. Acetogeneze se skládá z procesů, které vedou k produkci kyseliny octové metabolismem fakultativně aerobních bakterií. Již v průběhu acidogeneze může docházet ke vzniku této kyseliny. Dále může vznikat při anaerobním rozkladu z organických kyselin, které mají větší počet atomů uhlíku, než má kyselina octová a také z alkoholů. Vedle kyseliny reakcemi vzniká i vodík.

## 1.23 Reaktory pro anaerobní čištění

Výkonnost anaerobního reaktoru závisí na:

- styku biomasy se substrátem odpadní vody
- množství biomasy v reaktoru
- složení odpadní vody
- aktivitě biomasy (Hlavínek, Mičín, Prax, 2003. s.168)

## 2 Barviva

Látka, kterou můžeme nazývat barvivem, je sama výrazně zbarvená a může se různým způsobem vázat na jiné látky. Lidské oko může vidět barvu předmětu díky propouštění nebo odrážení určitého podílu světla z celkového spektra bílého světla. Fialová, modrá, zelená, žlutá, oranžová a červená část společně tvoří viditelnou oblast (Zahradník, Miloš. 1986, s.16).

### 2.1 Názvosloví barviv

Z komerčních a praktických důvodů nejsou názvy barviv založeny na chemickém názvosloví. V historii byly názvy barviv krátké a pojmenovávaly se podle odstínu nějakých květů (např. mauvein – toto označení pochází z anglického pojmenování pro sléz). Dále se barviva začala pojmenovávat podle zeměpisného původu, nebo podle významných osobností (nilská modř, Bismarckova hněď apod.) (Zahradník, Miloš. 1986, s.31).

Tabulka 2: Oblast absorbovaného světla a komplementární barva pro daný rozsah vlnových délek (Zahradník M., 1986, s.16)

Vlnová délka (nm)	Oblast absorbovaného světla	Komplementární barva
do 380	Ultrafialová	-
380 až 450	Fialová	Žlutozelená
450 až 485	Modrá	Žlutá
485 až 565	Zelená	Purpurová
565 až 585	Žlutá	Modrá
585 až 610	Oranžová	Modrozelená
610 až 780	Červená	azurová
nad 780	Infračervená	-

## 2.2 Barvení textilních materiálů

Barviva našla uplatnění snad ve všech odvětvích průmyslu, ale nejvíce se používají v textilním průmyslu. Dochází k vyvinutí nových principů barvení vláken a zvyšuje se využití různých pomocných látek, které se musí při procesu barvení spotřebovat. A protože je výzkum nových vláken stále na vrcholu, musí se tomu přizpůsobovat i vývoj typů barviv.

Důležité parametry pro barvení jsou chemická a fyzikální struktura vlákna, ale i struktura barviva.

Přírodní a syntetická vlákna se odlišují podle toho, jak se chovají ve vodě. Viskózoová a přírodní vlákna jsou hydrofilní. Díky tomu do sebe nasávají hodně vody, a proto je proces barvení snadný. Naopak syntetická vlákna a acetátové hedvábí jsou hydrofobní. K procesu jejich barvení dochází obtížněji (Zahradník, Miloš. 1986, s.35).

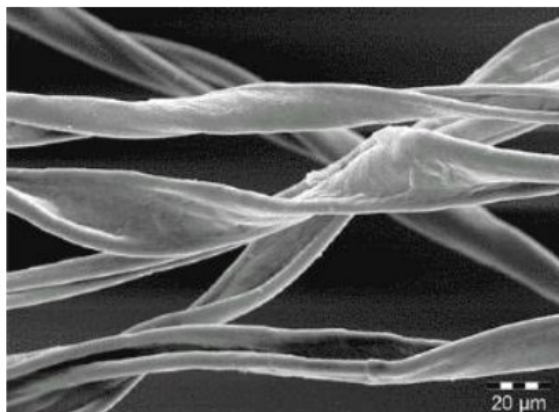
## 2.3 Přehled nejdůležitějších přírodních a syntetických vláken

### 2.3.1 Celulózová vlákna

Vlákna z celulózy můžeme dělit na přírodní (rostlinného původu) a syntetická vlákna, která jsou na bázi celulózy. Přírodní vlákna se vyrábějí ze semen (kapoku, akonu, kokosu a bavlny), z listů (konopí, ramie, juty a lnu), nebo z lodyh. Významné jsou z přírodních vláken pouze len, konopí, juta a bavlna, ostatní vlákna se využívají jenom minimálně. Do syntetických vláken na bázi celulózy patří vlákna z regenerované celulózy (viskózové hedvábí, měďnaté hedvábí a polynosická neboli modifikovaná vlákna) a vlákna z esterů celulózy (acetátové hedvábí).

Bavlna se řadí k nejrozšířenějším textilním materiálům. Je známa již ve středověku na území Egypta, východní Indie a Japonska. Bavlna je složená z celulózy, a tak je nestálá v kyselinách, a naopak v alkáliích je stálá. U celulózy je problém při barvení barvivy rozpustnými ve vodě, protože se tyto barviva lehce vypírají. V dřívějších dobách se proto používalo moření. Nyní se barví bavlna barvivy přímými, barvivy ustalovanými diazotací a kopulací (azogenová barviva), barvivy dodatečně ustalovanými měďnatými solemi (saturnová barviva), také barvivy sirnými a barvivy ftalogenovými (ftalostanová barviva) (Zahradník, Miloš. 1986, s.36).

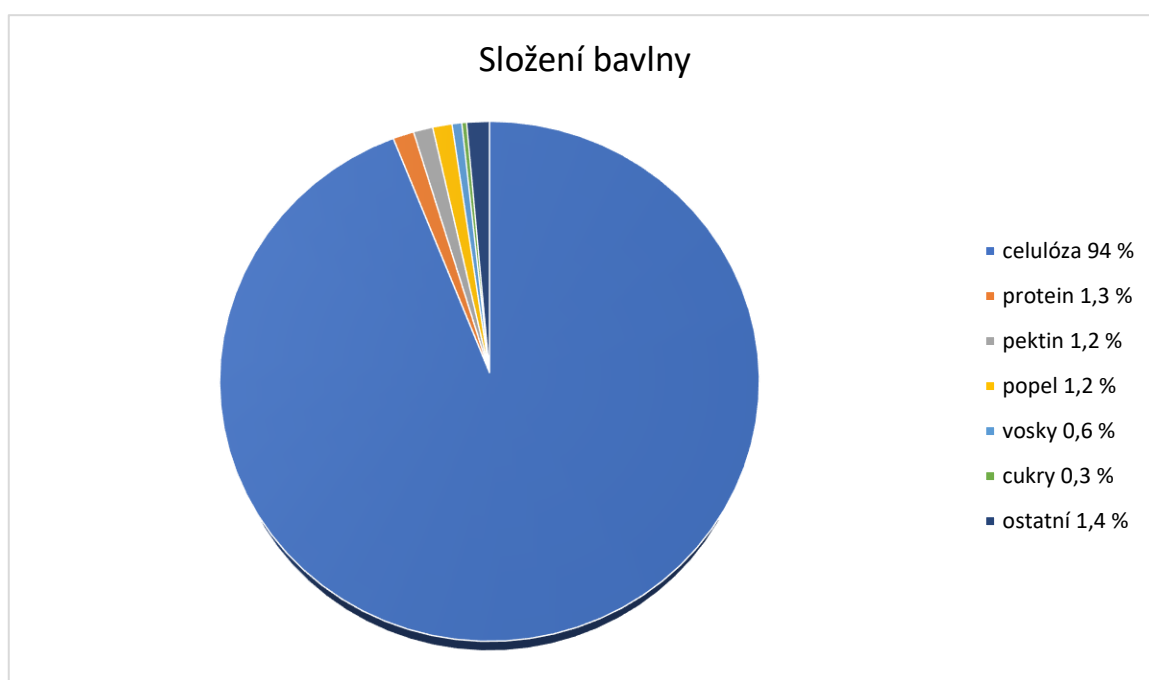
Na podélné řezu můžeme u bavlny vidět charakteristický zakroucený vzhled, díky němuž je bavlna snadno rozpoznatelná (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.15).



Obrázek 9: Podélný průřez bavlny (Hlobilová, Kristýna. 2009, s.15)



Chemické složení bavlny (viz graf č.1) se liší v závislosti na druhu nebo na půdních podmínkách. Bavlina také obsahuje malé množství minerálních látek (například chloridy, fosforečnany, uhličitany, draslík, hořčík a vápník) jako všechny rostlinné tkáně. Také se v ní vyskytuje malé množství přírodních bílkovin a tuky. Bavlina, která je syrová, obsahuje 0,5 % voskovité hmoty. Tato voskovitá hmota má za úkol chránit povrch vlákna. Pokud bavlněná vlákna zahřejeme nad 110 °C, mění svoji barvu na žlutou. Na poškození vláken nemá vliv sluneční záření, ale při dlouhodobém působení slunečních paprsků může docházet k postupné ztrátě pevnosti. Pro zlepšení vlastností materiálu se bavlna často mísí s jinými vlákny, jako jsou například polyester a viskóza. Protože má bavlna nízkou tepelnou vodivost, je vhodná pro oblečení na všechna roční období (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.15, 16).



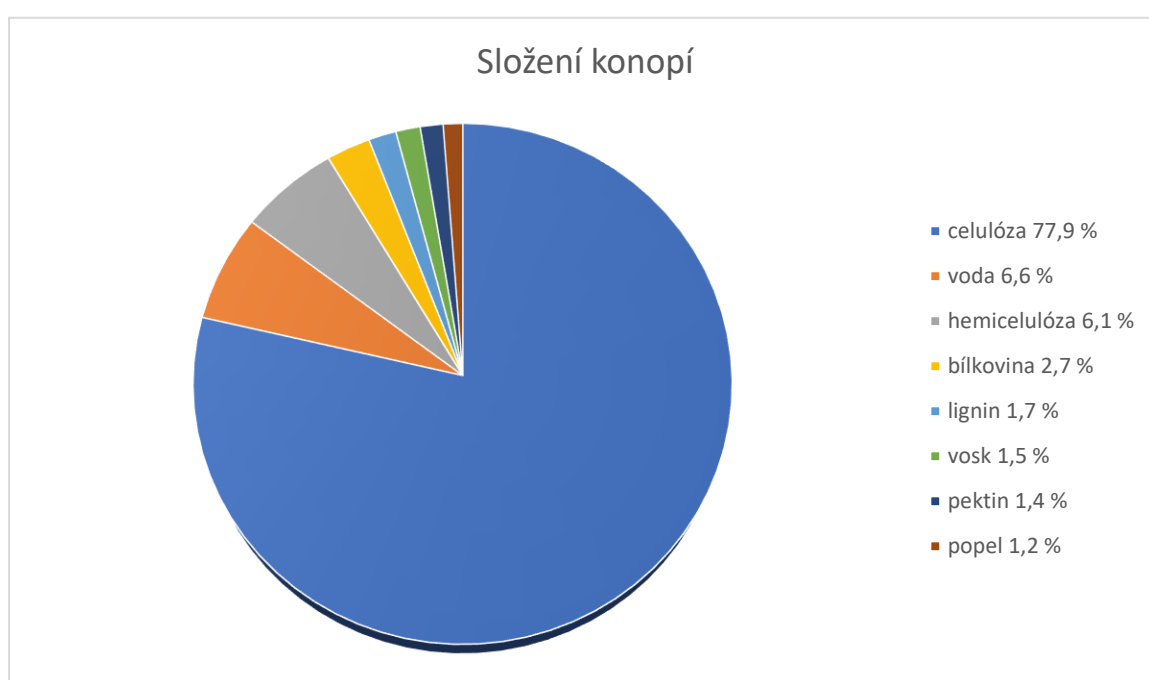
Graf 1: Složení bavlny (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.15)

Len se získává z rostliny, která se latinsky nazývá *Linum usitatissimum*. Výška této rostliny se pohybuje od 90 do 130 cm. Buněčná tkáň, vosky a pektiny obklopují lněná vlákna. Obsah celulózy ve lněných vláknech je okolo 60 %. Dále tyto vlákna obsahují lignin, hemicelulózu, vosky, pektiny a bílkoviny. Lněné vlákno je velmi pevné i za mokra (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.16).

Len byl v Evropě využíván dříve než bavlna. Obarvuje se barvivy přímými, metalokomplexními a sirnými (Zahradník, Miloš. 1986, s.36).

Konopí je vytvářeno rostlinou z řádu *Cannabis sativa*. V kmenu rostliny se nachází lýkové vlákno – konopí. Detailní složení konopí můžeme vidět v grafu č.2. Vlákna mají délku okolo 15 mm, nevýhodou ovšem je, že nejsou příliš roztažná a tažná. Protože konopí obsahuje také lignin, vyznačuje se drsnějším povrchem než například bavlna. Konopná vlákna se nejvíce využívají v oděvním průmyslu. Dalšími vlastnostmi konopí jsou dobrá savost a odolnost vůči UV záření (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.16).

Konopí se barví barvivy saturnovými, přímými, sирnými a naftoly. Juta se začala používat jako textilní materiál v 19. století. Ta se barví pomocí přímých barviv a naftolů (Zahradník, Miloš. 1986, s.36).



Graf 2: Složení konopí (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.16)

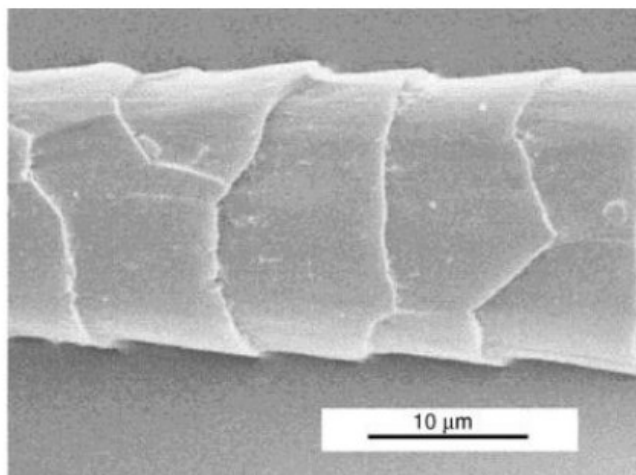
### 2.3.2 Vlákna živočišného původu

Vlákna živočišného původu můžeme dělit na vlákna přírodní (pravé hedvábí, vlna, zvířecí srst, např. velbloudí a králičí srst) a na vlákna regenerovaná (např. kaseinová). V hedvábí se nachází fibroin a ve vlně a zvířecí srsti keratin. Hedvábí a vlna se řadí k nejdůležitějším vláknům živočišného původu. Chemicky se skládají z polyamidových řetězců, které se nacházejí v aminokarboxylových kyselinách. Dále jsou příčně pospojované disulfidickými a jinými vazbami. Tyto vazby způsobují to, že jsou vlákna elastická. Díky aminoskupinám a karboxylovým skupinám můžeme barvit hedvábí a vlnu jak kyselými, tak i bazickými barvivy (Zahradník, Miloš. 1986, s.37).

### 2.3.2.1 Vlna

Složkou vlny je  $\alpha$ -keratin. Tento biologický polymer má  $\alpha$  helikální konformaci, protože obsahuje větší podíl síry. Vlněná vlákna se skládají přibližně z 170 druhů různých proteinů.

Struktura vlny má dvě části – vnější vrstvu kutikuly a hlavní tělo kortexu. U zevnějšku vlákna můžeme pozorovat malé nahodilé šupinky (viz obrázek č.10). Šířka těchto šupinek je 30-50  $\mu\text{m}$  a délka je 16  $\mu\text{m}$  (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.18).



Obrázek 10: Podélný průřez vlákna vlny (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.18)

Vlna se nejčastěji získává z ovčí, ty jsou stříhány dvakrát ročně. Získané surové vlně říkáme rouno. To je ovšem často kontaminované nečistotami, které se musí odstranit během čištění vlny. Vlna může mít různou jemnost a délku.

Vlna se vyznačuje elasticností a pružností. Díky těmto vlastnostem se dokáže rychle vracet do původního stavu a je odolná proti oděru (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.18).

Vlna se dělí podle svého původu (např. vlna jihoafrická, australská a jihoamerická). Na barvení vlny se využívají barviva kyselá, alizarinová chromová, metalokomplexní a reaktivní (Zahradník, Miloš. 1986, s.38).

### 2.3.2.2 Přírodní hedvábí

Přírodní hedvábí produkují housenky různých druhů bourců. K nejznámějším a také nejvýznamnějším druhům hedvábí patří hedvábí Bource morušového. K barvení hedvábí se používají barviva kyselá, substantivní, metalokomplexní a reaktivní (Zahradník, Miloš. 1986, s.38).

V pravém hedvábí se vyskytují dvě proteinové skupiny, a to fibroin a sericin. Vlákno má podélný průřez tvaru trojúhelníku. Pravé hedvábí se vyznačuje svojí pevností a vydrží tepelné namáhání až do 200 °C. Vlákna pravého hedvábí jsou biologicky rozložitelná (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.19).

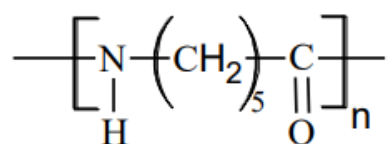
Kaseinová vlákna se připravují rozpouštěním kaseinu v hydroxidu sodném a spřádáním v kyselé lázni. Kasein se získává z odstředěného mléka. Kaseinová vlákna se vyskytují nejčastěji ve směsi s vlnou. Jako vlna se také barví (Zahradník, Miloš. 1986, s.38).

### 2.3.3 Syntetická vlákna

#### 2.3.3.1 Polyamid

Polyamidová vlákna jsou podobná chemickým složením vlně nebo hedvábí. Rozlišujeme 3 typy polyamidových vláken podle druhu základního monomeru: nylon, kaprolaktam a polyamid 11. Nylon je polykondenzační produkt hexamethyldiaminu a kyseliny adipové.

U polyamidových vláken se na rozdíl od vlny nevyskytují volné aminoskupiny a karboxyskupiny. Jednotlivé řetězce u polyamidových vláken nejsou příčně propojeny disulfidickými řetězci. Proto mají tyto vlákna menší schopnost vytvářet iontovou vazbu. To má vliv na zhoršení procesu barvení v porovnání s vlnou. Polyamid můžeme barvit barvivy kyselými, disperzními, substantivními, reaktivními a metalokomplexními (Zahradník, Miloš. 1986, s.38, 39, 40).



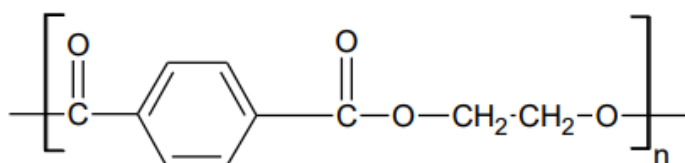
Obrázek 11: Strukturní vzorec polyamidu 6 (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.21)

#### 2.3.3.2 Polyesterová vlákna

Polykondenzací kyseliny tereftalové s dioly se vytváří polyesterová vlákna. K nejvýznamnějším zástupcům se řadí polyethylenglykoltereftalát, který je známý pod komerčním názvem Tesil.

Vyrábí se i mnoho modifikovaných polyesterů, které mají jiné technologické i užité vlastnosti než čisté polyesterové vlákno. Pro pláštěvé a košilové výrobky se využívají směsi

polyesteru s bavlnou, lnem a viskózou. Barvení probíhá pomocí disperzních barviv při teplotě 130 °C (za tlaku) či přenašečů (Zahradník, Miloš. 1986, s.40, 41).

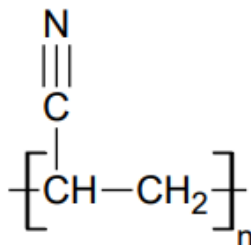


Obrázek 12: Strukturální vzorec polyethyltereftalátu (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.22)

### 2.3.3.3 Polyakrylonitrilová vlákna

Akrylonitril se polymeruje, a tak vznikají polyakrylonitrilová vlákna. Tyto vlákna jsou mimořádně stálá, ale vyznačují se jednou nevýhodou. Tato nevýhoda je žmolkování (tzv. pilling). Aby se odstranily některé vlastnosti, které jsou nežádoucí u polyakrylonitrilových vláken, využívají se polyakrylonitrilové kopolymery. Tyto kopolymery se i lépe barví na rozdíl od čistých polyakrylonitrilových polymerů.

Pro barvení polyakrylonitrilových vláken se využívají disperzní, kationaktivní, anionaktivní a kypová barviva, dále také pigmenty a indigosoly (Zahradník, Miloš. 1986, s.41, 42).



Obrázek 13: Strukturální vzorec polyakrylonitrilu (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.23)

### 2.3.3.4 Polyolefinová vlákna

Do této skupiny řadíme polyethylen a polypropylen. Barvení polyethylenových a polypropylenových vláken se provádí buď ve hmotě, nebo povrchově. Tyto vlákna jsou vysoce hydrofobní, proto je povrchové barvení velmi obtížné. Z toho důvodu se provádí modifikace polyolefinů pomocí solí kovů a zavádění reaktivních skupin do vláken.

Když se modifikují polyolefiny pomocí solí kovů, tak se během spřádání připojuje do vláknů kovový ion. Především se jedná o nikl a hliník. Tento kovový ion stabilizuje vlákna a také pomáhá při barvení vlákna metalokomplexními barvivy.

U zavádění reaktivních skupin do vláken se využívají reaktivní zbytky chloridu fosforitého, maleinanhydridu nebo methakrylátu. Na tyto zbytky se potom navazují barviva, která jsou afinitní k uvedeným reaktivním zbytkům.

Modifikovaná vlákna můžeme barvit pomocí kyselých, metalokomplexních a disperzních barviv (Zahradník, Miloš. 1986, s.42, 43).

#### 2.3.3.5 Polyurethanová vlákna

Polyadici diolů na diisokyanáty dochází ke vzniku polyurethanů. Polyurethanové elastomery můžeme znát pod názvem Spandex. Vykazují dvakrát až třikrát větší pevnost než pryžová vlákna, také jsou vysoce tažné (560 až 800 %). Spandex je stálý na světle, velmi lehký, odolný vůči potu a chemickým čisticím prostředkům. Velká výhoda Spandexu je jeho snadná barvitelnost.

Pro barvení Spandexu se využívají kyselá, metalokomplexní, disperzní, chromová a reaktivní barviva (Zahradník, Miloš. 1986, s.43).

#### 2.3.3.6 Polyvinylchloridová vlákna

U polyvinylchloridových vláken docházelo k vývoji řady modifikovaných typů. Jejich využití je hlavně v technické oblasti a omezeně se používají na některé druhy prádla.

Barvení polyvinylchloridových vláken se provádí pomocí metalokomplexních, disperzních a kypových barviv a také pomocí indigosolů a naftolů (Zahradník, Miloš. 1986, s.44).

### 2.3.4 Vazba barviva s vláknem

Barvivo se na vlákno může vázat různými způsoby. Jeden z nejstarších způsobů je barvení pomocí fixujících látek. Ten spočívá v tom, že se nerozpustný pigment „přilepí“ na vlákno. Využívají se pigmenty organické, kterými dokážeme dosáhnout široké palety pastelových odstínů. Syntetické pryskyřice vytvrzované za tepla používáme jako fixující látky. Toto barvení má velkou stálost na světle. Horší je ovšem stálost v otěru a praní, protože se fixující činidlo poškozují dlouhodobým otíráním a praním. A tak pigmentové vybarvení může měnit svůj vzhled. Lze využívat při tomto postupu barvení barviva s libovolnou afinitou k vláknem.

Další variantou, jak barvit pigmenty, je barvení syntetických vláken ve hmotě. U tohoto postupu se pigment, který je jemně dispergovaný, promíchá v surovině již před spřádáním. Tudíž je barvivo rovnoměrně rozmístěno ve vlákne a dále se fixuje. Stálost tohoto barviva je velká. Tento způsob barvení se využívá k barvení syntetických vláken, viskózy a acetátového hedvábí. Barviva, která se dají pro toto barvení využít, jsou například saze, tepelně stabilní azová, anthrachinonová a indigoidní (Zahradník, Miloš. 1986, s.45).

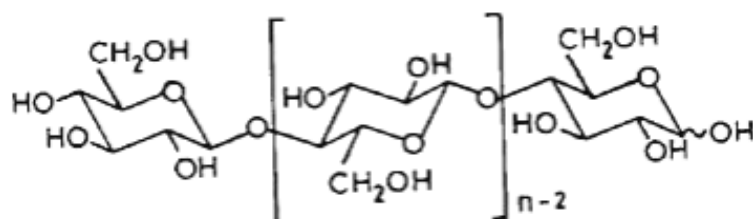
Barvení vlny a hedvábí probíhá poněkud jinak, protože se jedná o vlákna živočišného původu. Tyto vlákna jsou tvořena bílkovinnými látkami, které mají amfoterní vlastnosti, což znamená, že se mohou slučovat s látkami zásaditého i kyselého charakteru. Vlna obsahuje převahu skupin zásadité povahy, a proto se pro barvení vlny využívají hlavně kyselá barviva. Vybarvení nastává díky tvorbě iontové vazby, která se utváří chemickou reakcí sulfonových nebo karboxylových skupin barviva a aminoskupin polypeptidických řetězců bílkovin ve struktuře vlny. Hedvábí lze barvit jak bazickými, tak i kyselými barvivy, protože u hedvábí převládá kyselý charakter bílkovinné substance (Zahradník, Miloš. 1986, s.49).

U barviv reaktivních můžeme pozorovat nejpevnější vazbu mezi barvivem a vláknem. Tato vazba se nazývá chemická (kovalentní). Chemická vazba se nedá lehce hydrolyzovat, a proto vykazují takto vybarvené textilie velkou stálost za mokra. Reaktivní barviva se využívají při barvení bavlny, ale i vláken živočišného původu (Zahradník, Miloš. 1986, s.49).

### 3 Celulóza

Celulóza svojí strukturou je polysacharid, u něhož je  $\beta$ -glukopyranosa spojená do polymeru pomocí 1,4 - glykosidických vazeb.

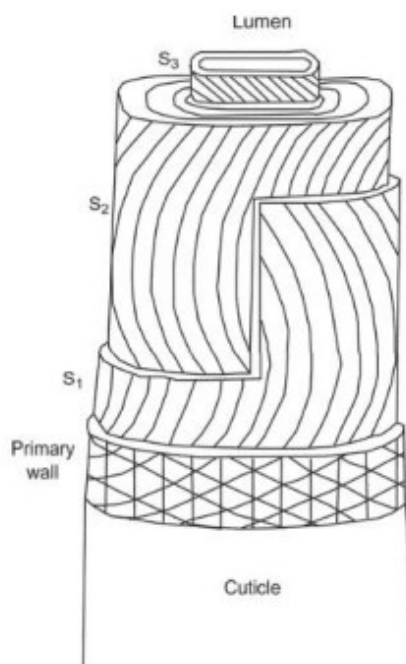
Celulóza se skládá ze základní strukturní jednotky disacharidu cellobiózy (Neradová, Ilona. 2006, s.11).



Obrázek 14: Vzorec celulózy (Štibralová, Jitka. 2008, s.10)

Složení celulózy je 49,39 % kyslíku, 44,44 % uhlíku a 6,17 % vodíku. Sumární vzorec vypadá takto:  $(C_6H_{10}O_5)_n$ .

V molekule celulózy se nacházejí hydroxylové skupiny a díky nim tedy může celulóza tvořit například i estery. Pokud se hydroxylové skupiny přiblíží do určité vzdálenosti, vznikají mezi nimi vodíkové můstky (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.14).



Obrázek 15: Schéma celulóзовého vlákna (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.14)

Kutikula, která tvoří svrchní vrstvu vlákna, plní funkci ochranného obalu. Pod kutikulou můžeme najít vrstvu fibril celulózy, která má šířku 200 nm. Tyto fibrily se stáčí podél vlákna. Vrstva S2 obsahuje fibrily, tyto fibrily se také stáčí podél osy vlákna. Vrstva S3 má stejné složení jako vrstva S2. U každé vrstvy můžeme vidět specifický úhel stočení fibril (viz obrázek č.15).

Celulóza se dokáže rozpouštět jen v několika rozpouštědlech a její reakce jsou heterogenní (Hlobilová, Kristýna. 2019, s.14).

Když se hydrolyticky štěpí celulóza vznikají různé štěpné produkty. Jsou to cellopentosa, cellotetrosa, cellotriosa, cellobiosa a glukóza. V přírodě můžeme najít celulózu vždy v přítomnosti doprovodných látek jako je pektocelulóza, lignocelulóza a glukóza.



Pojmy, které se s celulórou v praxi využívají, jsou uvedeny v následující tabulce (Neradová, Ilona. 2006, s.11).

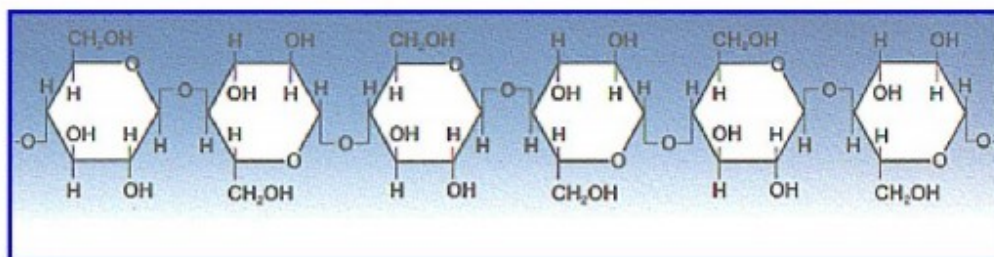
Tabulka 3: Pojmy a základní údaje o celulóze (Neradová, Ilona. 2006, s.11)

<b>Název</b>	Celulóza
<b>Vzorec</b>	$(C_6H_{10}O_5)_n$
<b>Triviální název</b>	Celulóza, buničina
<b>Skupenství (při 20 °C)</b>	Pevné
<b>Nativní celulóza</b>	Je získaná z přírodních zdrojů.
<b>Regenerovaná celulóza</b>	Celulóza vysrážená z nějakého roztoku.
<b>Hydrocelulóza</b>	Hydrolyticky degradovaná celulóza.
<b>Oxycelulóza</b>	Produkt oxidace celulózy.

### 3.1 Chemické složení celulózy

Celulózu můžeme řadit k látkám, které jsou málo reaktivní. Tato malá reaktivnost je způsobena chemickým složením celulózy. Molekuly glukózy se mohou spojovat do dlouhých řetězců a vytvářet tak polysacharid celulózy. Volné -OH skupiny poskytují několik příležitostí k vytvoření vazeb vodíkovým můstkem mezi sousedícími molekulami celulózy.

Celulózu můžeme z chemického hlediska považovat za polyalkohol s jednou primární a dvěma sekundárními -OH skupinami. Tyto alkoholické skupiny ovlivňují fyzikální, fyzikálně chemické a chemické vlastnosti celulózy (Neradová, Ilona. 2006, s.12).



Obrázek 16: Řetězec celulózy (Neradová, Ilona. 2006, s.12)

## 4 Konkrétní příklady využití celulóзовých sorbentů na odstraňování barviv

Následující část této bakalářské práce bude obsahovat konkrétní příklady využití přírodních sorbentů při odstraňování organických barviv z odpadních vod.

Budeme se zabývat například využitím smrku ztepilého, břízy bělokoré, lnu setého a řepky olejky jako sorbentů. Dále využitím ligninu k odstraňování barviva brilantní červené a také ligninu, který je modifikovaný hliníkem a manganem. Podíváme se také na použití celulóзовých částic jako nový typ absorbentu pro čištění odpadních vod.

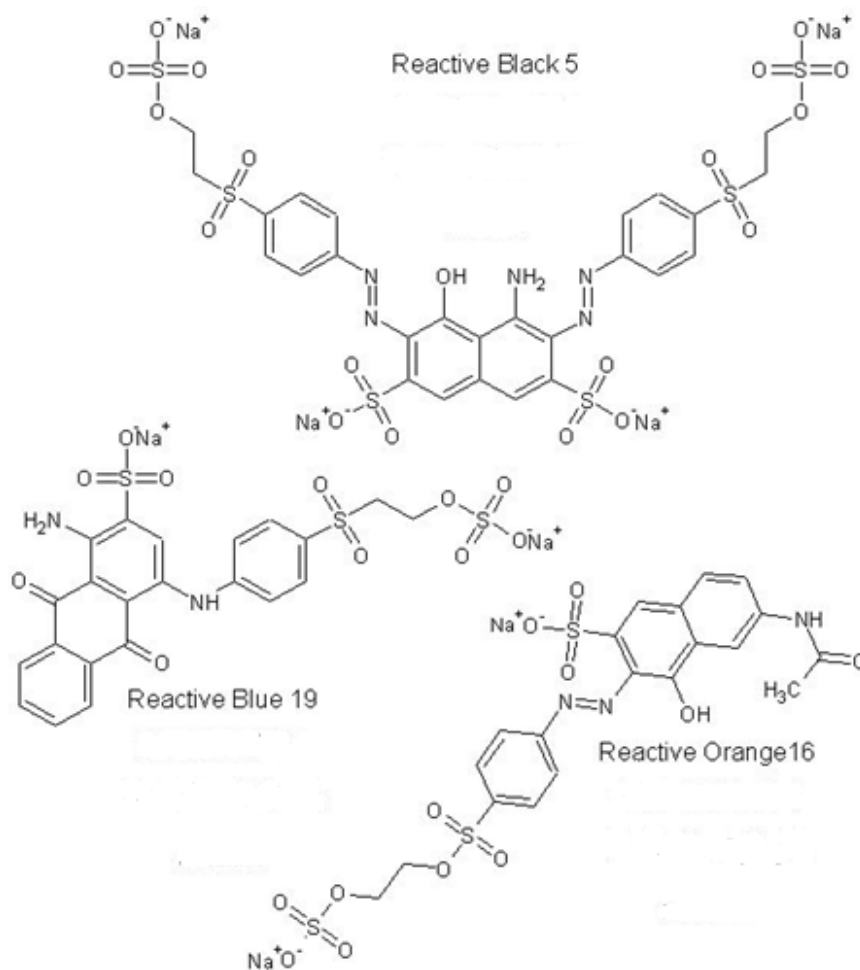
### 4.1 Využití smrku ztepilého, břízy bělokoré, lnu setého a řepky olejky pro odstraňování reaktivních vinylsulfonových barviv z odpadních vod

V dnešní době dochází k masivnímu používání široké škály farmaceutických a kosmetických přípravků. Tyto přípravky obsahují kromě účinných látek bohužel i různá barviva, pigmenty nebo látky biocidní. Biocidní látky dokážou zajistit dlouhodobou stabilitu produktu.

V tomto článku se budeme zajímat konkrétně o 3 reaktivní barviva: Reactive Black 5, Reactive Blue 19 a Reactive Orange 16, jejichž strukturu můžeme vidět na obrázku č.17.

Tato barviva mají vynikající brilantní odstíny a jsou velmi stálé. Využívají se na barvení bavlny i papíru. Také se používají v tiskařských tonerech. Do těchto barviv se přidávají biocidy na bázi methylothiazolonu, 1,2-benzisothiazolonu nebo nanočástice koloidního stříbra.

Pokud výše uvedená barviva a jejich meziproducty proniknou do odpadních vod, jsou velmi těžce biologicky rozložitelné. I v nepatrných koncentracích mohou negativně ovlivňovat vodní organismy. Proto se v dnešní době hledají nové postupy pro záchyt a likvidaci těchto polutantů z vodního prostředí. Zajímavé a efektivní je odstraňování reaktivních barviv z odpadních vod využitím lignocelulóзовých materiálů. Touto problematikou se budeme dále zabývat v tomto článku (Filipi, Michaela. 2018, s.1, 2).



Obrázek 17: Chemické struktury reaktivních barviv Reactive Black 5, Reactive Blue 19 a Reactive Orange 16 (Filipi, Michaela. 2018, s.2)

#### 4.1.1 Lignocelulózové materiály

Lignocelulóza se vyskytuje ve všech dřevinách a tvoří jejich hlavní stavební složku. Také se ale nachází v nedřevnatých částech rostlin, mezi které řadíme listy či stonky. Lignocelulóza patří mezi obnovitelné organické zdroje. Materiály z lignocelulózy zahrnují zemědělský a lesnický odpad (například kukuřičná a obilná sláma, dřevní štěpka, piliny, zbytky stonků řepky a lnu). Protože tyto materiály nemají potravinářské ani průmyslové využití, jejich cena se pohybuje velmi nízko, což umožňuje jejich alternativní použití jako přírodní sorbenty biologicky těžce rozložitelných polutantů.

Z chemického hlediska se fytohmota skládá z biopolymerů, u nichž převládá zastoupení celulózy, hemicelulózy a ligninu. Zastoupení těchto biopolymerů se může odlišovat podle druhů rostlin, tak i podle jejich zeměpisného původu. Celulóza je nejrozšířenější biopolymer na planetě. Její roční produkce se pohybuje okolo  $1,5 \times 10^9$  tun. I hemicelulóza je polysacharid.

Kratší řetězce hemicelulózy se skládají z glukózy, ale také z manózy, galaktózy, xylózy, arabiozy a uronových kyselin. Díky nižší molekulové hmotnosti, rozmanitosti struktury a kratším řetězcům je hemicelulóza rozpustná v kyselinách i alkáliích. Složení ligninu je různorodé. Například lignin z trav má odlišnou strukturu než lignin listnatých stromů (Filipi, Michaela. 2018, s.3).

#### 4.1.2 Reaktivní barviva

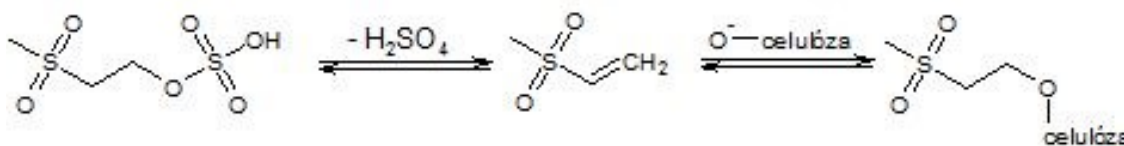
Ve struktuře molekuly reaktivního barviva se nacházejí vždy čtyři na sebe navazující konstituční jednotky, které mají odlišnou funkci. První z nich je solubilizující skupina, která zajišťuje to, aby se barvivo dobře rozpouštělo ve vodném prostředí. Sulfonové ( $-\text{SO}_3\text{H}$ ) a karboxylové ( $-\text{COOH}$ ) funkční skupiny dobře splňují tuto roli. Chromoforová část navazuje na solubilizující skupinu. Chromoforová část je vlastně konjugovaná planární část molekuly, kterou tvoří  $\pi$  a  $n$  elektrony. Tato část molekuly určuje, jakou část UV-VIS spektra bude molekula absorbovat. Podle toho ji bude naše oko v podobě doplňkové barvy vnímat. Pomocí můstku dochází k oddělení chromoforu od reaktivní skupiny. Reaktivní skupina dále reaguje s barveným materiálem a vytváří se pevná kovalentní vazba. V současné době se nejvíce využívají dva typy reaktivních barviv. Jsou to barviva chlortriazinová a vinylsulfonová (Filipi, Michaela. 2018, s.4).

Proces barvení začíná nejprve sorpcí barviva na materiál. Ve vodě dojde k disociaci, celulóza i barvivo dostávají záporný náboj, a protože oba mají stejný náboj, navzájem se odpuzují. To ovšem nastává problém, který se obvykle vyřeší, pokud se přidá neutrální elektrolyt. Nejčastěji se využívá chlorid sodný nebo síran sodný. Těchto elektrolytů se přidává množství až 80 g na 1 litr barvicí lázně. Tak dojde k poklesu odpudivých sil a díky tomu se začne barvivo sorbovat na vlákna. Přidávání výše zmíněných elektrolytů má za následek vysoce zasolené odpadní vody z barvírenských provozů.

Po nasorbování barviva na vlákna dochází k chemické reakci. Po přidání alkálie se aktivuje celulóza. Dále se celulóza mění na nukleofilní činidlo a disociují se OH skupiny.

Barviva Reactive Orange 16, Reactive Black 5 a Reactive Blue 19 se řadí mezi vinylsulfonová barviva, která mají skvělé stálosti za mokra. Poskytují jasné, stálé odstíny a mají vynikající afinitu k vybarvovaným celulózovým vláknům. Vazba barviva na celulózové vlákno probíhá obecně bazicky katalyzovaným eliminačně adičním mechanismem. Při této reakci se nejdříve z 2-sulfáto-ethylensulfonylové skupiny –  $\text{SO}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-O-SO}_3\text{H}$  eliminačně odštěpí sulfonová skupina, při tom vznikne vysoce reaktivní vinylový meziprodukt. Ten je poté

adičně atakován nukleofilem v podobě  $\text{O}^-$  celulózy. Celulóza byla předem aktivovaná báží. Souhrn těchto reakcí můžeme vidět na obrázku č.18 (Filipi, Michaela. 2018, s.4).



Obrázek 18: Eliminačně adiční mechanismus vinylsulfonových reaktivních barviv s celulóзовým vybarvovaným substrátem (Filipi, Michaela. 2018, s.4)

Další problém je, že ani současná reaktivní barviva nejde na celulózová vlákna fixovat kvantitativně. Dochází tak k znečišťování odpadních vod kvůli hydrolyze barviva. Do odpadních vod se také dostávají soli a biocidní přípravky, které se používají ke stabilizaci barvicí lázně (Filipi, Michaela. 2018, s.4).

#### 4.1.3 Experiment

Roztoky barviv, které byly potřeba pro experiment, byly připraveny o různých koncentracích. Byla využívána UV-VIS spektroskopie pro stanovení aktuální koncentrace reaktivního barviva před a po jeho sorbování na vybraný lignocelulózový materiál.

Štěpky a stonky byly namlety a tříděny na třídících sítích o velikosti ok 5 a 3,5 mm.

Navážený a pomletý lignocelulózový materiál byl smíchaný s 250 ml destilované vody, poté k této směsi bylo přidáno 10 ml roztoku barviva s počáteční koncentrací 0,01 mol/l, nebo 0,007 mol/l při testování barviva Reactive Orange 16. Směs se promíchala a bylo změřeno pH. To se potom upravilo na hodnotu 12 – 12,5 pomocí 50 % roztoku NaOH.

Byly prováděny dvě série experimentů, které se lišily teplotou sorpce reaktivního barviva na lignocelulózový materiál. Použité teploty byly 25 °C a 90 °C pro dvouhodinovou alkalizaci. Po této alkalizaci byla směs okyselena 16 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$  na hodnotu pH 1 – 1,2 a zfiltrována (Filipi, Michaela. 2018, s.5).

Dále bylo z přefiltrovaného roztoku napipetováno 10 ml do odměrné baňky, provedlo se ředění a byla změřena absorbance. Z absorbance se následně vypočítala koncentrace barviva ve filtrátu a na úplný konec byla vypočítána i sorpční kapacita barviva podle následujícího vztahu:

$$q = \frac{V * Mh * (c_0 - c_{eq})}{m_s}$$

Obrázek 19: Rovnice výpočtu sorpční kapacity (Filipi, Michaela. 2018, s.6)

Vysvětlivky veličin vyskytující se v rovnici výše:

$c_0$  – počáteční koncentrace roztoku (mol/l),  $c_{eq}$  – rovnovážná koncentrace (mol/l),

$V$  – objem měřeného roztoku (l),  $Mh$  – molární hmotnost barviva (g/mol) (Filipi, Michaela. 2018, s.6).

#### 4.1.4 Výsledky

Bylo provedeno celkem pro každou kombinaci lignocelulózového materiálu a dané reaktivní barvivo 8 experimentů při 25 °C a 8 experimentů při teplotě 90 °C.

Výsledky jsou přehledně uvedeny v tabulce č.4. V této tabulce můžeme vidět průměrnou sorpční kapacitu s odpovídající směrodatnou odchylkou pro danou kombinaci sorpčního materiálu a barviva při dané teplotě (Filipi, Michaela. 2018, s.6).

Tabulka 4: Sorpční kapacita různých zdrojů lignocelulózového sorbentu vyjádřená v mg zachyceného reaktivního vinylsulfonového barviva na 1 g sorbentu při teplotě 25 °C a 90 °C (Filipi, Michaela. 2018, s.6)

Zdroj lignocelulózy	Reactive Black 5	Reactive Blue 19	Reactive Orange 16
<b>Sorpce při teplotě 25 °C</b>			
Smrk ztepilý	25,57 ± 0,64	14,41 ± 0,56	16,56 ± 0,12
Bříza bělokorá	25,83 ± 0,51	15,59 ± 1,01	16,58 ± 0,13
Len setý	26,00 ± 1,59	17,48 ± 0,38	17,01 ± 0,28
Řepka olejka	26,96 ± 0,64	17,86 ± 0,57	16,83 ± 0,20
<b>Sorpce při teplotě 90 °C</b>			
Smrk ztepilý	23,42 ± 1,17	15,54 ± 0,51	15,73 ± 0,25
Bříza bělokorá	25,18 ± 1,83	15,28 ± 1,04	15,48 ± 0,24
Len setý	26,75 ± 0,72	16,43 ± 0,92	16,47 ± 0,68
Řepka olejka	26,87 ± 1,62	16,79 ± 0,14	17,59 ± 0,42

#### **4.1.5 Závěrečné shrnutí**

Výsledky experimentů ukazují, že obě adsorpce jak při 25 °C, tak i při 90 °C, jsou pro danou kombinaci lignocelulózového materiálu a reaktivního barviva srovnatelné. V praxi to tedy říká to, že lze využívat sorpční technologie v širokém rozmezí teplot. Dá se jednak ušetřit energie, která je potřebná pro ohřev odpadní vody, a na druhou stranu se dají čistit se stejnou efektivitou i procesní a odpadní vody s vyšší teplotou. Další výhodou je nízká cena sorpčního lignocelulózového materiálu.

Z výsledků vyplynulo, že používání stonků lnu setého a řepky olejky bylo vhodnější než pilin ze dřevin. V těchto stoncích se nacházely doprovodné látky, především třísloviny, které ovlivňovaly reaktivnost a následné vyhodnocení. Na první pohled vypadá, že účinnost všech čtyřech lignocelulózových sorbentů byla skoro o 1/3 vyšší u barviva Reactive Black 5, avšak musíme zohlednit vyšší molekulovou hmotnost Reactive Black 5. Pokud tuto podmínku vezmeme v potaz, jsou sorpční schopnosti testovaných sorpčních materiálů prakticky stejné (Filipi, Michaela. 2018, s.7, 8).

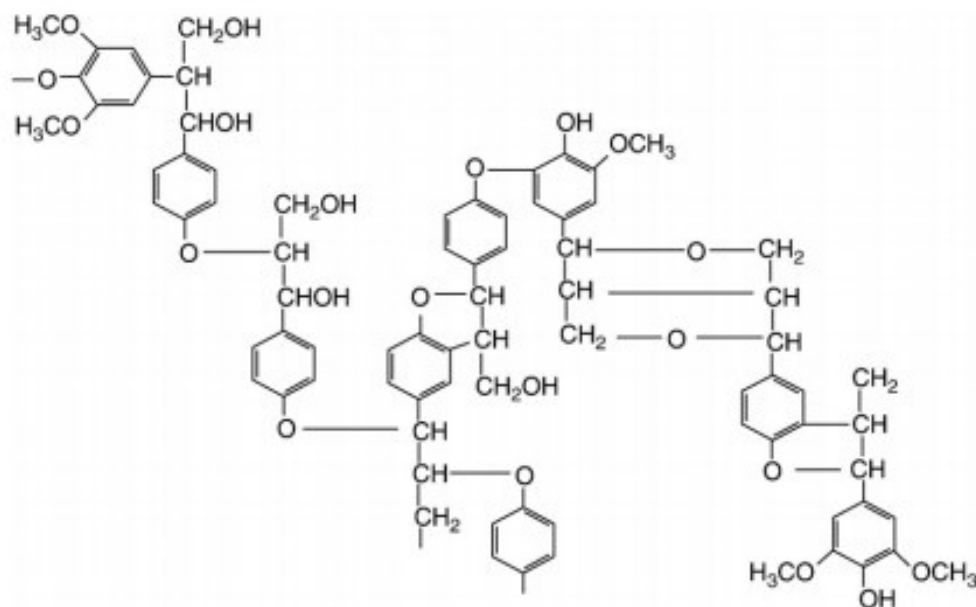
## **4.2 Odstranění reaktivního barviva Brilliant Red HE-3B z vodných roztoků pomocí průmyslového ligninu**

Lignin je jedním z hlavních meziproductů průmyslu, který zpracovává buničinu. Potenciálem ligninu pro odstraňování barviva Brilliant Red HE-3B z vodných roztoků se budeme zabývat v tomto článku. Zkoumáno to bude z pohledu koncentrace barviva a teploty roztoku.

Barviva se řadí mezi nebezpečné látky, které jsou vypouštěny do odpadních vod z různých odvětví průmyslu. Velké množství barviv se dostává do odpadních vod také během barvicích procesů. Přítomnost těchto znečišťujících látek je nežádoucí a nebezpečná. Mohou způsobovat alergie, kožní nemoci a podráždění kůže.

Adsorpce je jednou z metod, které se využívají při čištění odpadních vod. Je to metoda velmi účinná, jednoduchá a její náklady na provedení jsou nízké. V dnešní době se vyvíjejí různé metody, které využívají nové materiály se sorpčním potenciálem. Četné studie ukázaly, že je možné jako sorbenty využívat různé zemědělské a průmyslové meziproducty. Speciální pozornost je věnována lignocelulózovým materiálům z důvodu jejich základních vlastností. Mezi tyto vlastnosti patří nízká cena, snadná dostupnost, vysoká pórovitost a hydrofilní charakter (Suteu, 2010, s.84).

Velké množství ligninu není nijak dále využito, což je problém z hlediska životního prostředí. Pokud by se dokázal dále využívat, bylo by to výhodné, jak ze strany životního prostředí, tak i v problematice čištění odpadních vod. Lignin je aromatický, trojrozměrný polymer, který můžeme vidět na obrázku č.20.



Obrázek 20: Chemická struktura části makromolekuly ligninu (Suteu, 2010, s.86)

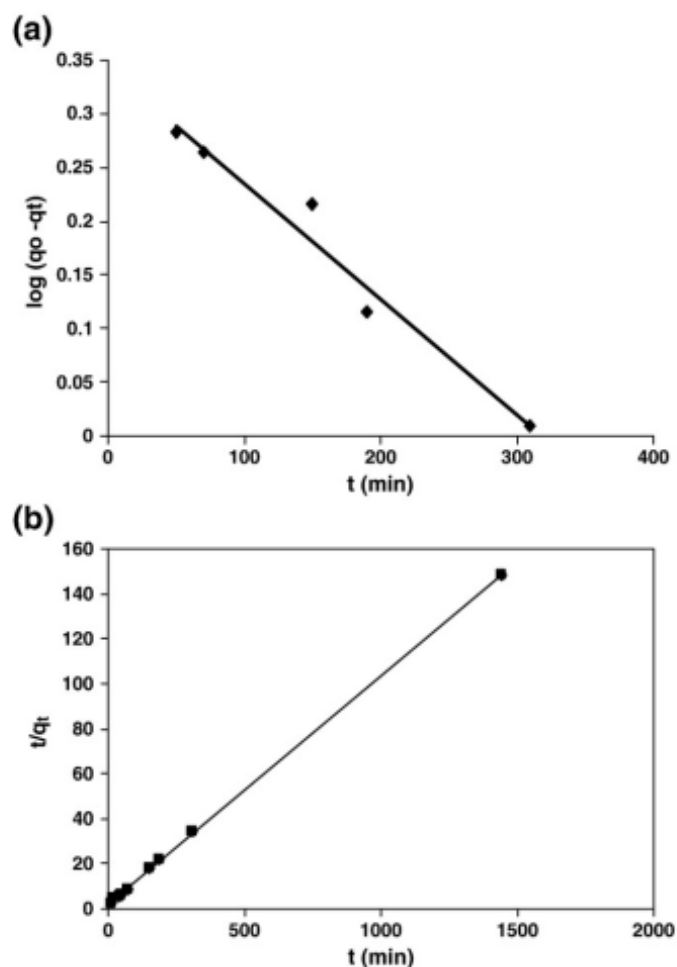
#### 4.2.1 Shrnutí

Na základě výsledků této studie je patrné, že lignin může být považován za potenciální adsorbent na odstraňování barviva Brilliant Red HE-3B z vodných roztoků při pH = 1,5. Tohoto pH bylo docíleno přidáním kyseliny chlorovodíkové.

Rovnovážná sorpční data byla analyzována pomocí následujících izotermických modelů: Freundlich, Langmuir, Dubinin-Radushkevich a Tempkin.

Kinetické studie ukazují dobrou shodu experimentálních dat s reakcí pseudo-druhého řádu. Korelační koeficienty u této reakce se blíží k číslu 0,9998. Grafy pro použitelnost reakcí pseudo-prvního a pseudo-druhého řádu můžeme vidět níže (Suteu, 2010, s.88, 89).





Graf 3: Použitelnost (a) reakce pseudo-prvního řádu, (b) pseudo-druhého řádu při sorpci reaktivního barviva Brilliant Red HE-3B na lignin při pH = 1,5; 14 g ligninu/l; 150 mg/l (Suteu, 2010, s.90)

### 4.3 Adsorpce barviva Procion Blue MX-R z vodných roztoků pomocí ligninu chemicky modifikovaného hliníkem a manganem

Makromolekula CML (zkratka CML znamená karboxy-methylovaný lignin) se získává při čištění a karboxy-methylaci ligninu, který je generovaný kyselou hydrolyzou cukrové třtiny během výroby bioetanolu. CML navázaný na  $Al^{3+}$  (CML-Al) a na  $Mn^{2+}$  (CML-Mn) mají potenciál pro čištění odpadních vod od textilních barviv. V této studii se konkrétně zkoumá barvivo Procion Blue MX-R a jeho odstraňování z vodných roztoků.

Problematika znečištění odpadních vod kvůli textilnímu průmyslu je dosti složitá. Do odpadních vod se dostává velké množství reaktivních barviv, které může být nebezpečné nejen pro lidi, ale také například pro vodní organismy žijící v mořích či oceánech. Tyto znečišťující

látky mohou mít dokonce karcinogenní nebo mutagenní účinky. Kvůli přísným opatřením jsou firmy, které vypouštějí ze svých závodů odpadní vody, povinny provádět důkladné čištění. Tato povinnost vedla firmy k hledání co nejjednodušších, nejlevnějších a nejvíce ekonomicky přijatelných řešení (Adebayo, 2014, s.43, 44).

Jednou z nejhojnějších přírodních látek na Zemi je lignin. Je výhodné z mnoho hledisek tuto látku recyklovat a zmírňovat tak zatížení životního prostředí. Předchozí studie ukazují, že funguje pro čištění odpadních vod i spojení Fe a ligninu. V této studii se ovšem podíváme na spojení ligninu s Mn a Al.

Procion Blue MX-R je komerčně významné antrachinonové barvivo, které se převážně využívá na barvení bavlny. Jedná se o velmi toxické barvivo, a proto je nezbytné řádně čistit odpadní vody, které jsou tímto barvivem zasaženy (Adebayo, 2014, s. 44).

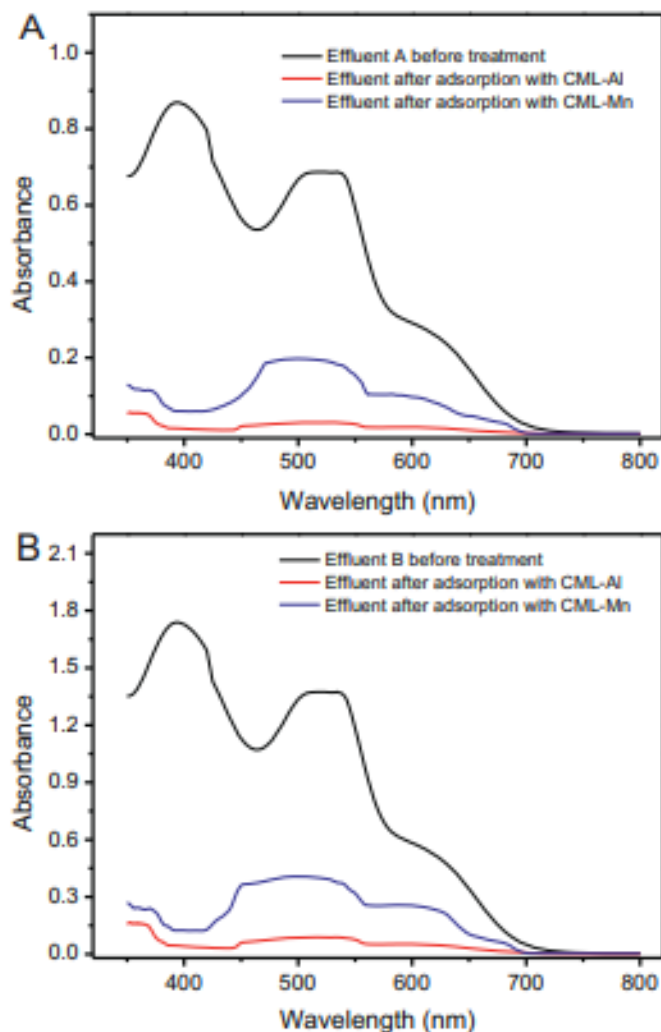
#### **4.3.1 Závěrečné shrnutí**

V této studii byly zkoumány následující izotermické modely: Langmuir, Freundlich a Liu. Nejlepším izotermickým modelem pro experimentální data byl nakonec model Liu. Nejlépe totiž popisuje ustanovení rovnováhy adsorpce barviva na CML-Al a CML-Mn v teplotním rozmezí 25 °C až 50 °C.

Maximální množství barviva adsorbovaného na CML-Al a CML-Mn při 25 °C bylo 73,52 mg/g a 55,16 mg/g. Účinnější tedy z tohoto pohledu bylo CML-Al. Vyšší sorpční účinnost CML-Al je připisována lepším texturním vlastnostem CML-Al (větší povrchová plocha a vyšší celkový objem póru).

Adsorbenty je možné znovu regenerovat po použití pomocí směsi acetonu a 0,050 mol/l NaOH v poměru 1:1.

Na grafech, které můžeme vidět níže, jsou vyobrazeny UV-VIS spektra odpadních vod před a po úpravě s CML-Al a CML-Mn (Adebayo, 2014, s. 49).



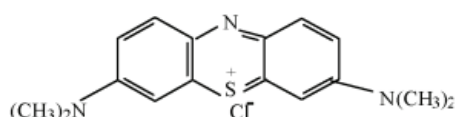
Graf 4: UV-VIS spektra odpadních vod před a po úpravě pomocí CML-Al a CML-Mn. (A) Odpadní voda A, (B) Odpadní voda B (Adebayo, 2014, s.49)

#### 4.4 Využití celulóзовých částic jako adsorbent na čištění roztoků od barviv

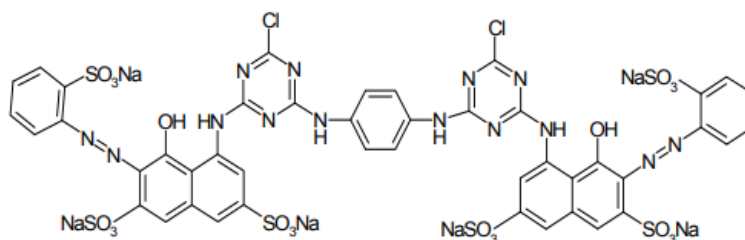
V této studii se budeme zabývat strukturálními a adsorpčními vlastnostmi celulóзовých částic Cellets 200 a 350, u kterých je možnost využít je jako adsorbenty reaktivního barviva Brilliant Red HE-3B a kationtového barviva Methylene Blue z vodných roztoků. Sleduje se efekt adsorpce v závislosti na velikosti částic (200-500  $\mu\text{m}$ ), počáteční pH roztoku (1-11), dávce adsorbentu, koncentraci barviva, teplotě (2-45  $^{\circ}\text{C}$ ) a času kontaktu (30 min-24 hodin). Bylo pozorováno, že optimální hodnoty experimentálních parametrů a maximální množství barviva adsorbovaného na celulóзовé částice závisí na typu barviva (Suteu, 2015, s.525).

Odstraňování textilních barviv z odpadních vod je velice důležité a zabývá se tím spousta různých specialistů. Přítomnost barviv v povrchových vodách vede k omezení růstu vodní fauny i flóry. Proces adsorpce je jednou z úspěšně aplikovaných metod na čištění barviv z odpadních vod. Pro adsorpční proces mohou být využito velké množství různých adsorbentů. Jako jsou například syntetická pryskyřice, celulóza, aktivní uhlí, popel, konopná vlákna, piliny nebo rašelina.

Celulózové částice jsou univerzálním produktem celulózového typu, které kombinují rozdílné vlastnosti. Těmito vlastnostmi jsou perfektní sférickost, nízká drobivost, malá rozpustnost a netečnost. K této studii byla použita barviva Methylene Blue a Brilliant Red HE-3B, jejichž vzorce můžeme vidět níže (Suteu, 2015, s.526).



(a)



(b)

Obrázek 21: (a) Struktura Methylene Blue; (b) Struktura Brilliant Red HE-3B (Suteu, 2015, s.526)

#### 4.4.1 Závěrečné shrnutí

Výsledky ukazují, že adsorpce závisí na struktuře barviva (molekulové hmotnosti) a typu celulózové částice. Navíc se adsorpční kapacita zvyšuje se zvýšením koncentrace barviva, dávce adsorbentu a času kontaktu, a naopak se adsorpční kapacita snižuje se zvýšením teploty. Počáteční pH roztoku je důležitý faktor a výběr optimálního rozmezí závisí na typu barviva, jestli se jedná o barvivo kationtové či aniontové.

Výsledky studie dokazují, že celulózové částice jsou považovány za nový a cenný adsorbent pro čištění vodných roztoků od barviv s poměrně nízkou molekulovou hmotností (Suteu, 2015, s.531).

## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo čtenáře seznámit s problematikou čištění odpadních vod od organických barviv s použitím adsorbentů na bázi celulózy. Nejdříve jsou uvedeny obecné způsoby, kterými se provádí čištění odpadních vod. Zahrnuje to procesy jako jsou filtrace, flotace či adsorpce. Více se věnuji i různým typům filtrů a biologickému čištění odpadních vod anaerobním i aerobním způsobem.

Dále si můžeme vidět druhy barviv, které se využívají k barvení vláken. Uvádím i přírodní a syntetická vlákna a jejich využití k výrobě oděvů, látek apod.

Ukazuje se, že adsorbenty na bázi celulózy nebo lignocelulózové materiály jsou vhodné jako adsorbenty při procesu čištění odpadních vod. Jsou jak cenově dostupné, tak i velmi účinné. Zabývám se konkrétně využitím modifikovaného a nemodifikovaného ligninu na čištění odpadních vod od znečištění, které způsobují různá organická barviva. Tyto barviva mohou být nebezpečná jak pro vodní organismy, tak i pro lidi. Jsou velmi toxická, v některých případech až karcinogenní. Což je velkým problémem, který lze podle studií vyřešit právě využitím adsorbentů na bázi celulózy. Na čištění odpadních vod se dají využít i celulózové částice, které mají skvělou schopnost na svůj povrch vázat barviva, a tak pomáhat při čištění odpadních vod, které předtím byly znečištěny velkým množstvím organických barviv.

Domnívám se, že adsorbenty na bázi celulózy jsou skvělou alternativou pro čištění odpadních vod a že budou v budoucnosti hojně využívány.

## 6 Seznam zdrojů

1. Bindzar, Jan et al. *Základy úpravy a čištění vod*. Praha: KANAG – TISK, s.r.o., 251 s. ISBN 978-80-7080-729-3. 2009
2. Dohányos, Michal, Jan Koller a Nina Strnadová. *Čištění odpadních vod*. Praha: KANAG – TISK, s.r.o., 177 s. ISBN 978-80-7080-619-7, 2007
3. Šálek, Jan. *Přírodní způsoby čištění odpadních vod*. Brno: PC – DIR spol. s.r.o., 115 s. ISBN 80-214-0712-3, 1995
4. Hlavínek, Petr, Jan Mičín, Petr Prax. *Stokování a čištění odpadních vod*. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, s.r.o., 283 s. ISBN 80-214-2535-0, 2003
5. BARTOŠ, Pavel, Jan BRANDEJS. *Systémy shrabování dna čistírenských nádrží*. 2009
6. Turic, Jakub, Jaroslav Veselý. *Separátory, sedimentační nádrže včetně funkce retenční nádrže Jeneweinova*. 2016
7. Litschmann, Patrik, Renata Biela. *Využití flotace v úpravách vody*. 2018
8. Zahradník, Miloš. *Barviva používaná v technické praxi*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
9. Neradová, Ilona, Jakub Wiener, Jana Hobzová. *Reaktivní barviva v aplikaci na bavlnu*. 2006
10. Štibralová, Jitka, Jiří Kryštůfek, Jakub Wiener. *Průběh desorpce přímých barviv z celulózových vláken*. 2008
11. Hlobilová, Kristýna, Michal Černý, Jan Honziček. *Metody identifikace textilních materiálů se zaměřením na metodu FTIR-ATR*. 2019
12. FILIPI, Michaela a Libor DUŠEK. *Využití smrku ztepilého, břízy bělokoré, lnu setého a řepky olejky pro odstraňování reaktivních vinylsulfonových barviv z odpadních vod*. 2018
13. SUTEU, Daniela, Teodor MALUTAN a Doina BILBA. Removal of reactive dye Brilliant Red HE-3B from aqueous solutions by industrial lignin: Equilibrium and kinetics modeling. *Desalination* [online]. 2010, **255**(1-3), 84-90 [cit. 2021-6-8]. ISSN 00119164. Dostupné z: doi:10.1016/j.desal.2010.01.010
14. ADEBAYO, Matthew A., Lizie D.T. PROLA, Eder C. LIMA, et al., 2014. Adsorption of Procion Blue MX-R dye from aqueous solutions by lignin chemically modified with aluminium and manganese. *Journal of Hazardous Materials* [online]. **268**, 43-50 [cit. 2021-6-9]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2014.01.005

15. SUTEU, Daniela, Gabriela BILIUTA, Lacramioara RUSU, Sergiu COSERI a Gabriela NACU. Cellulose cellets as new type of adsorbent for the removal of dyes from aqueous media. *Environmental Engineering and Management Journal* [online]. 2015, **14**, 525-532 [cit. 2021-6-9]. Dostupné z: <http://omicron.ch.tuiasi.ro/EEMJ/>