



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ OBCÍ

INSTITUTE OF MUNICIPAL WATER MANAGEMENT

VYUŽITÍ ALTERNATIVNÍCH KOAGULANTŮ
PŘI ÚPRAVĚ VODY

THE USE OF ALTERNATIVE COAGULANTS IN WATER TREATMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lucie Hofmanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ KUČERA, Ph.D.

BRNO 2017




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	B3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
PRACOVNÍŠTĚ	Ústav vodního hospodářství obcí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

STUDENT	Lucie Hofmanová
NÁZEV	Využití alternativních koagulantů při úpravě vody
VEDOUCÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	30. 11. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016


.....
doc. Ing. Ladislav Tuhovčák, CSc.
Vedoucí ústavu




.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] PIVOKONSKÝ, Martin. Tvorba suspenze při úpravě vody: teorie a praxe. Líbeznice: Medim, 2011, 218 s. ISBN 9788087140185.
- [2] PITTEK, Pavel. Hydrochemie. 3. přeprac. vyd. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999, 568 s. ISBN 8070803401.
- [3] KRIŠ, Jozef, Oskár ČERMÁK a Ivona ŠKULTÉTYOVÁ. Vodárenstvo 1: Zásobovanie vodou. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2006. ISBN 80-227-2426-2.
- [4] TUHOVČÁK, Ladislav, Pavel ADLER, Tomáš KUČERA a Jaroslav RACLAVSKÝ. Vodárenství: Studijní opora pro studijní programy s kombinovanou formou studia [online]. Brno: VUT v Brně, 2006 [cit. 2012-03-26].
- [5] Water quality and treatment: a handbook of community water supplies. 4th ed. New York: McGraw-Hill, c1990. ISBN 00-700-1540-6.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Předmětem bakalářské práce bude porovnání účinnosti různých koagulantů při odstraňování zákalu z vody. Cílem je ověřit možnosti alternativních koagulantů (chitosan, rostlinné částice) a porovnat jejich účinnost s tradičními koagulanty. Účinnost koagulantů bude zjišťována při provádění série laboratorních sklenicových zkoušek.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá využitím alternativních koagulantů při úpravě vody. První, teoretická část, ve svém úvodu zmiňuje typy úprav pro jednotlivé kategorie surové vody, související zákony a vyhlášky. Dále popisuje princip, mechanismy koagulace a faktory ovlivňující tento proces. Rozebírá také postup sklenicové optimalizační zkoušky, která byla prováděna v rámci experimentální části bakalářské práce. Jedna z kapitol je pak věnována polymerům a kovovým koagulantům na bázi hliníku a železa běžně používaným při úpravě vody. Zahrnuje detailnější popis polymerů přírodního původu moringa olejodárné a chitosanu. Tato dvě koagulační činidla a síran hlinitý byly použity v druhé experimentální části práce. Bylo provedeno několik sérií laboratorních sklenicových zkoušek za účelem zjištění efektivity vybraných koagulantů při odstranění zákalu z vody. Na závěr je provedeno srovnání a vyhodnocení výsledků koagulačních pokusů, součástí jsou i fotografie pořízené v průběhu sklenicové optimalizační zkoušky.

KLÍČOVÁ SLOVA

sklenicová optimalizační zkouška, zákal, síran hlinitý, chitosan, moringa olejodárná

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the use of alternative coagulants in water treatment. The first theoretical part mentions types of water treatment for the individual categories of raw water, related laws and ordinances. After that thesis describes the principle, mechanisms of coagulation and factors influencing the process. It analyses the jar test procedure performed within the experimental part of the bachelor's thesis. One chapter deals with polymers and metal coagulants based on aluminium and iron commonly used in water treatment. The chapter includes more detailed description of natural polymers moringa oleifera and chitosan. These two coagulating agents and aluminium sulfate were used in the second experimental part of the bachelor's thesis. Several sets of the jar test were performed in order to investigate the efficiency of chosen coagulants on the removal of turbidity from water. The thesis concludes with a comparison and evaluation of the results. Photos taken during the jar test can also be found at the end of the bachelor's thesis.

KEYWORDS

jar test, turbidity, aluminium sulfate, chitosan, moringa oleifera

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Lucie Hofmanová *Využití alternativních koagulantů při úpravě vody*. Brno, 2017. 57 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 5. 2017

Lucie Hofmanová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Kučerovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc, poskytnuté podklady a rady při jejím zpracování.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	11
2.1	Závislost úpravy a použitelnosti vody na jejím složení	11
2.2	Disperzní soustavy	12
3	KOAGULACE	13
3.1	Stabilita koloidů	13
3.2	Destabilizace koloidních disperzí	15
3.2.1	Adsorpce a nábojová neutralizace	15
3.2.2	Potlačení elektrické dvojrstvy	15
3.2.3	Zachycování částic nečistot ve sraženině	15
3.2.4	Destabilizace polymery	15
3.3	Faktory ovlivňující destabilizaci	16
3.3.1	pH	16
3.3.2	Kyselinová neutralizační kapacita vody (KNK).....	16
3.3.3	Obsah iontů.....	17
3.3.4	Teplota	17
3.4	Rychlost procesu koagulace	17
3.5	Látky odstranitelné koagulací	17
3.6	Volba dávky koagulantu	17
3.7	Sklenicová optimalizační zkouška	18
3.7.1	Laboratorní vybavení.....	20
3.7.2	Pracovní postup	20
3.8	Fáze koagulace	21
3.8.1	1. fáze – perikinetická.....	21
3.8.2	2. fáze – ortokinetická	22
4	KOAGULANTY	23
4.1	Hydrolyzující činidla	23
4.1.1	Síran hlinitý	23
4.1.2	Hlinitan sodný.....	23
4.1.3	Polyaluminium chlorid	23
4.1.4	Síran železnatý.....	23
4.1.5	Síran železitý	24
4.1.6	Chlorid železitý.....	24

4.2 Polymery	25
4.2.1 Pomocné koagulanty.....	31
5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE	32
5.1 Testovaná voda.....	32
5.2 Použitá činidla	33
5.2.1 Hydroxid vápenatý p.a.....	33
5.2.2 Kyselina sírová	33
5.2.3 Síran hlinitý (tekutý).....	33
5.2.4 Semena rostliny moringa olejodárná	33
5.2.5 Kyselina octová 99%	34
5.2.6 Chitosan (deacetylovaný chitin, Poly(D-glucosamin)) [31].....	34
5.3 Použité vybavení.....	34
5.3.1 Míchací kolona [32].....	34
5.3.2 Turbidimetr [33]	35
5.3.3 Multifunkční měřicí přístroj pro pH/Redox (ORP), vodivost/TDS a koncentraci kyslíku [34].....	35
5.3.4 Mikropipeta Eppendorf Research® PLUS [35]	36
5.3.5 Multi – THERMOMETER	36
5.3.6 Analytická váha SARTORIUS BASIC BA 110 S [36].....	36
5.4 Měřené veličiny	37
5.4.1 Zákal	37
5.4.2 pH	37
5.4.3 Teplota	38
5.5 Průběh pokusů	38
5.5.1 Síran hlinitý	38
5.5.2 Moringa olejodárná.....	41
5.5.3 Chitosan	44
5.6 Porovnání.....	46
6 ZÁVĚR.....	47
7 POUŽITÁ LITERATURA.....	49
SEZNAM TABULEK	53
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	54
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	55
SUMMARY.....	57

1 ÚVOD

Voda, chemická sloučenina vodíku a kyslíku, tvoří spolu se vzduchem základní podmínky pro existenci života na Zemi. Před použitím této kapaliny pro potřebu člověka je nutné ji upravit. Pokud má surová voda sloužit pro pitné účely, je nezbytné pozměnit její vlastnosti tak, aby byly splněny určité hygienické limity a požadavky dané vyhláškou (viz dále). Upravitelnost surové vody a druh znečišťujících látek se liší v závislosti na tom, odkud vodu odebíráme.

Vody jímány z nekontaminovaných podzemních zdrojů neobsahují oproti povrchovým vodám organické znečištění. Příčinou nízkých nebo nulových koncentrací organických látek v podzemních vodách je jejich filtrace půdním prostředím. Obecně platí, že podzemní vody jsou jako zdroj pitné vody vhodnější (jsou chráněny před znečištěním), obvykle mívají vyhovující kvalitu a často je lze použít buď přímo bez úpravy, nebo s minimální úpravou jako vodu pitnou. [1,2]

Povrchové vody obsahují větší koncentrace organických látek než vody podzemní, přičemž hlavní složkou tohoto znečištění jsou huminové látky (organické sloučeniny vznikající humifikačním procesem v půdě). Běžnou technologií úpravy povrchové vody na pitnou je proces číření, při němž dochází chemickými procesy k převádění především koloidních a jemně suspendovaných látek do separovatelné suspenze. Tvorba suspenze při chemické úpravě vody zahrnuje dva základní procesy. Prvním krokem je destabilizace znečišťujících příměsí (koagulace) přidávkem vhodného činidla. Následuje agregace destabilizovaných koloidních částic v separovatelné agregáty (vločky), které je dosaženo mícháním suspenze. Tento krok se označuje jako flokulace. Vzniklé agregáty je pak možné z vody odstranit, např. filtrace nebo sedimentací. Proces oddělení dispergovaných částic se nazývá číření. [1,2,3]

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující účinnost úpravy vody je destabilizace znečišťujících příměsí. Ta závisí na řadě chemických a fyzikálně chemických faktorů, mezi něž patří především složení a vlastnosti znečišťujících příměsí, chemismus vody, typ a dávka destabilizačního činidla atd. Následný proces agregace je ovlivněn hydrodynamickými podmínkami, při kterých k tvorbě suspenze dochází. Jedná se především o velikost gradientu rychlosti, dobu míchání, povahu a rozložení sil v míchaném objemu vody. [4]

Běžně používanými koagulanty na úpravách vody jsou chlorid železitý, síran hlinitý, hlinitan sodný, síran železitý a síran železnatý. V současnosti se začíná aplikovat biopolymerní koagulant chitosan, který je díky svým vlastnostem šetrnější k životnímu prostředí a představuje vhodnou náhradu tradičních koagulantů.

V rozvojových zemích s omezenými možnostmi a přístupem k pitné vodě je vkládána naděje do semen stromu moringa olejodárná. Dokáží redukovat zákal a snížit počet bakterií i při použití pro čištění velmi zakalené povrchové vody.

První část této práce je teoretická a zaměřuje se na proces koagulace, souvislosti s tímto dějem a látky používané při úpravě vody. Druhá, experimentální část, se zabývá porovnáním účinnosti vybraných koagulantů při odstraňování zákalu z vody, která byla zjišťována prováděním série laboratorních sklenicových zkoušek.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 ZÁVISLOST ÚPRAVY A POUŽITELNOSTI VODY NA JEJÍM SLOŽENÍ

Surová voda odebírána z povrchových nebo podzemních vodních zdrojů pro účely úpravy na vodu pitnou musí splňovat určité požadavky dané vyhláškou Ministerstva zemědělství č. 428/2001 Sb., kterou se provádí zákon č. 274/2001 Sb., o vodovodech a kanalizacích pro veřejnou potřebu v platném znění. Po provedení rozboru vody se zařadí zdroj podle limitních hodnot ukazatelů kvality do jedné ze tří kategorií: A1, A2, A3. Mezi ukazatele kvality řadíme například barvu vody, teplotu, hodnotu pH, obsah vybraných prvků a látek, hodnotu BSK₅ a další. Pro jednotlivé kategorie jsou pak předepsány typy úprav vody, které by měly být použity pro daný zdroj. [5]

Tab. 2.1 Typy úprav pro jednotlivé kategorie surové vody [5]

Pro kategorii	Typy úprav
A1	Úprava surové vody s koncovou dezinfekcí pro odstranění sloučenin a prvků, které mohou mít vliv na její další použití, a to zvláště snížení agresivity vůči materiálům rozvodného systému včetně domovních instalací (chemické nebo mechanické odkyselení), dále odstranění pachu a plynných složek provzdušňováním. Prostá filtrace pro odstranění nerozpuštěných látek a zvýšení jakosti.
A2	Surová voda vyžaduje jednodušší úpravu, např. koagulační filtrace, jednostupňové odželezňování, odmanganování nebo infiltraci, pomalou biologickou filtrace, úpravu v horninovém prostředí, a to vše s koncovou dezinfekcí. Pro zlepšení vlastností je vhodná stabilizace vody.
A3	Úprava surové vody vyžaduje dvou či víceúrovňovou úpravu čiřením, oxidací, odželezňováním a odmanganováním s koncovou dezinfekcí, popř. jejich kombinací. Mezi další vhodné procesy se řadí např. využívání ozónu, aktivního uhlí, pomocných flokulantů, flotace. Ekonomicky náročnější postupy technicky zdůvodněné (např. sorpce na speciálních materiálech, iontová výměna, membránové postupy) se použijí mimořádně.
Vyšší koncentrace než jsou uvedeny pro kategorii A3	Podle § 13 odst. 2 zákona lze vodu této jakosti výjimečně odebírat pro výrobu pitné vody s udělením výjimky příslušným krajským úřadem. Pro úpravu na vodu pitnou se musí použít technologicky náročné postupy spočívající v kombinaci typů úprav uvedených pro kategorii A3, přičemž je nutné zajistit stabilní kvalitu vyráběné pitné vody podle vyhlášky č. 252/2004 Sb. Přednostním řešením v těchto případech je však eliminace příčin znečištění anebo vyhledání nového zdroje vody.

Zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů definuje pitnou vodu jako zdravotně nezávadnou vodu, jejíž nezávadnost je dána hygienickými limity mikrobiologických, biologických, fyzikálních a chemických ukazatelů. Hygienické požadavky na pitnou a teplou vodu a četnost a rozsah kontroly pitné vody se stanoví vyhláškou ministerstva zdravotnictví č. 252/2004 Sb. (novela č. 293/2006 Sb.). [5]

2.2 DISPERZNÍ SOUSTAVY

V surové vodě určené k úpravě pro vodu pitnou nacházíme řadu látek různého charakteru. Ty se ve vodě vyskytují v podobě částic různé velikosti, přičemž rozeznáváme látky rozpuštěné, koloidní a suspendované. Podle charakteru a velikosti částic potom volíme vhodný způsob úpravy surové vody.

Disperzní soustavy se skládají z alespoň dvou druhů hmoty, přičemž jeden druh – disperzní podíl – je rozptýlen ve spojitě fázi – disperzním prostředí.

Disperzní soustavy dělíme podle velikosti částic na:

- a) hrubé disperze (suspenze, emulze, pěny) s průměrem částic nad 1 μm (hrubě dispergované částice)
- b) koloidní disperze (koloidy) s průměrem částic přibližně 1nm–1 μm (koloidní částice)
 - hydrofobní – postrádají schopnost molekulární integrace s vodou (tvorba vodíkové vazby), je tvořeno zřetelné fázové rozhraní mezi disperzním prostředím a dispergovanými částicemi, stabilita je podmíněna elektrickou dvojrivrstvou na povrchu částic; mezi hydrofobní koloidy řadíme např. jílové částice, hydroxidy kovů, rozptýlené mikroorganismy aj.
 - hydrofilní – rozptýlené částice mají afinitu k molekulám vody – tvoří silnou vodíkovou vazbu, vznikají přitažlivé síly mezi nabitými částicemi a molekulami vody, není vytvářeno zřetelné fázové rozhraní; mezi hydrofilní koloidy patří huminové látky, proteiny, polysacharidy, organické flokulanty, dále micelární koloidy jako soli mastných kyselin či saponáty
- c) analytické disperze (pravé roztoky) s průměrem částic do 1nm (rozpuštěné částice)

Mechanickými úpravárenskými procesy, jako jsou usazování, mechanická filtrace, odstředování a další, lze z vody odstranit jemné a hrubé suspendované látky (velikost částic od 1 μm).

Koloidně dispergované organické i anorganické ve vodě rozpuštěné nečistoty způsobující zákal a barvu vody je nutné převést do formy, kterou lze odstranit běžnými způsoby separace za použití chemických metod. Jednou z nich je i srážení neboli koagulace. [2,6]

3 KOAGULACE

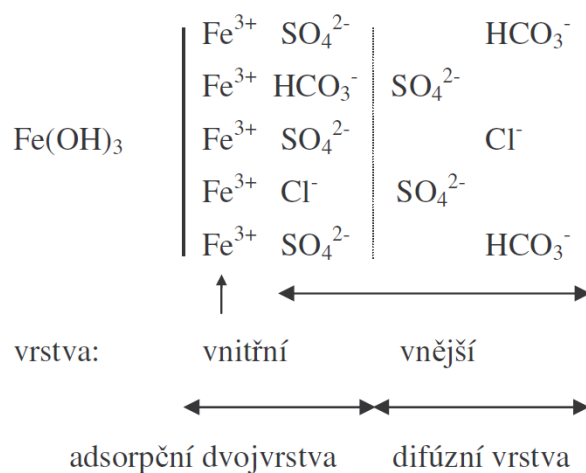
Cílem koagulace je odstranění organických makromolekulárních látek z vody. Proces spočívá v reakci určitých chemikálií dávkovaných do vody (koagulanty, popř. polymerní flokulanty) s látkami ve vodě obsaženými.¹ Po nadávkování koagulantu dojde k hydrolyze, při které vznikají produkty koloidního charakteru. Za určitých podmínek dochází ke shlukování (agregaci) těchto produktů s částicemi ve vodě za vzniku hrubé disperze. Agregáty lze poté z vody odstranit běžnými úpravárenskými procesy (usazování, filtrace). [3]

3.1 STABILITA KOLOIDŮ

Stabilitu koloidů zajišťují síly na rozhraní pevné a kapalně fáze. Základní příčinou stability koloidu je tzv. elektrická dvojrstva, jež tvoří dohromady dvě opačně nabitě vrstvy. K popisu jejího uspořádání bývá užíváno Sternova modelu, podle kterého jsou k nabitému povrchu koloidní částice přitahovány elektrostatickými silami ionty opačného znaménka.

V průběhu čiření dochází k dávkování koagulantu, například síranu železitého. Hydrolyzou vznikne hydroxid železitý $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Koloidní částice této látky se v kapalině pohybují neuspořádaným pohybem, nedochází ke spojování do větších odstranitelných celků. Na jejich povrchu jsou však adsorbovány kladné železité ionty Fe^{3+} , částice tak dostávají kladný náboj a vzájemně se odpuzují. Vrstva protiiontů těsně přiléhající k povrchu se nazývá Sternova vrstva. Ta tvoří společně s nabitým povrchem částice kompaktní vnitřní vrstvu.

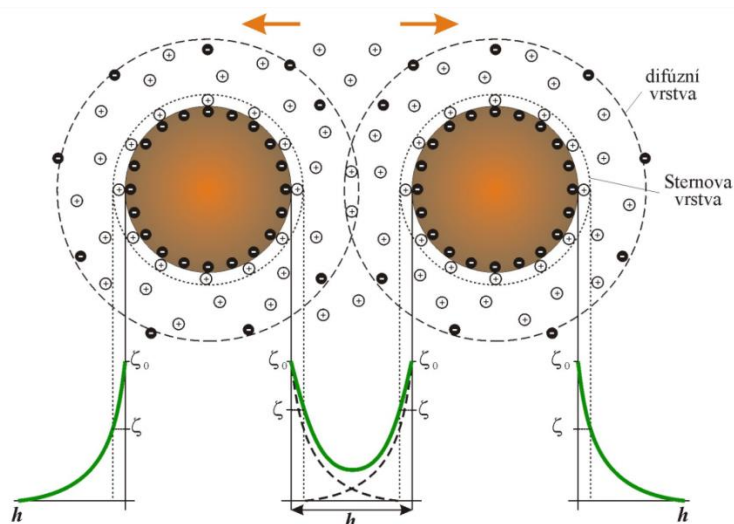
V blízkosti koloidní částice dochází k akumulaci opačně nabitých iontů (v tomto případě aniontů), ty tvoří vrstvu difúzní. Příčinou přitahování těchto iontů jsou elektrostatické interakce mezi koloidem a opačně nabitými ionty. Platí, že čím větší mají anionty náboj, tím silněji jsou přitahovány. Složení vnější vrstvy ovšem závisí i na koncentraci jednotlivých aniontů v roztoku. Distribuce aniontů je zároveň ovlivněna jejich tepelným (Brownovým) pohybem.



Obr. 3.1 Elektrická dvojrstva [3]

¹ Kromě přidavku koagulantu lze proces srážení vyvolat i podstatným zvýšením teploty vody, působením UV záření, ultrazvukem atd. [6]

Ionty uvnitř Sternovy vrstvy se pohybují spolu s koloidní částicí, zatímco ionty, které jsou součástí vnější difúzní vrstvy, se mohou pohybovat nezávisle na jejím pohybu. Mezi Sternovou a difúzní vrstvou se nachází pohybové rozhraní a vykazuje tzv. elektrokinetický potenciál (ζ -potenciál), což je potenciálový rozdíl vzniklý z důvodu neúplné kompenzace nábojů iontů vnitřní vrstvy opačně nabitými náboji iontů vnější vrstvy. Působení potenciálu zamezuje přiblížení částic do takové vzdálenosti, kde se již mohou uplatnit adhezní síly. [3,4,7]



Obr. 3.2 Interakce částic stabilizovaných elektrickou dvojvrstvou [4]

Hodnota ζ -potenciálu se obvykle pohybuje v rozmezí od 50 až do 100 mV. Při hodnotách větších než cca 30 mV je disperze stabilní – částicím je bráněno shlukovat se. Při poklesu pod tuto hodnotu (kritický potenciál) dochází ke koagulaci. Čím nižší je hodnota ζ -potenciálu, tím rychleji proces probíhá.

Tab. 3.1 Vztah stability a potenciálu [8]

ζ -potenciál [mV]	Stabilita
± 60 až ± 40	velmi stabilní
± 40 až ± 20	středně stabilní
± 20 až ± 10	labilní
± 10 až 0	velmi labilní

Pokud dojde k přiblížení stabilizovaných koloidních částic na určitou vzdálenost (h na Obr. 3.2) obě vrstvy se propojí a vzájemně si vymění protiionty. Tato výměna způsobuje nárůst termodynamického potenciálu (Gibbsovy energie), mezi částicemi vznikají odpudivé síly, jež zabraňují agregaci částic do větších celků.

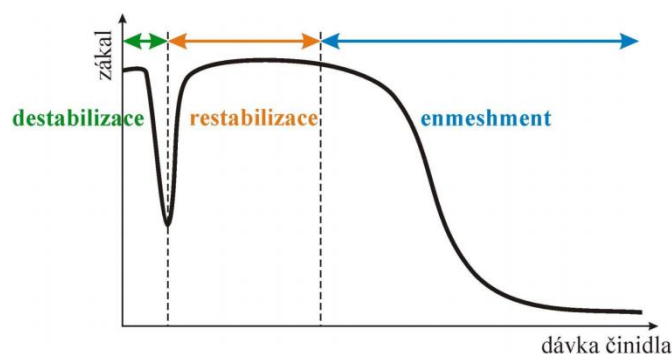
V důsledku Brownova molekulárního pohybu (tepelný, nekoordinovaný pohyb různými směry) dochází k přibližování částic koloidní disperze. V roztoku sice působí přitažlivé van der Waalsovy síly, jsou ale vyrovnávány odpudivou silou vytvářenou ζ -potenciály. Obě síly se sčítají a jejich výslednice určuje, zda dojde ke shlukování částic či nikoliv. Pokud má dojít k destabilizaci, musí přitažlivé síly převážit nad odpudivými – je tedy nutné snížit ζ -potenciál částic. Toho dosáhneme přidáním iontů opačného náboje, než mají částice v surové vodě – přidáním koagulantu. [2,4]

3.2 DESTABILIZACE KOLOIDNÍCH DISPERZÍ

Destabilizace je vyvolána snížením elektrické odpudivosti mezi částicemi a náboji. Lze jí dosáhnout více způsoby.

3.2.1 Adsorpce a nábojová neutralizace

Při běžném pH má většina koloidních částic v surové vodě záporný náboj. Přitahuje tedy kladně nabitě produkty hydrolyzy hlinitých nebo železitých solí $\text{Al}(\text{OH})_3$, příp. $\text{Fe}(\text{OH})_3$, dochází k tzv. specifické adsorpci. Koloidní částice postupně přicházejí o svůj náboj, snižuje se energetická bariéra zamezující přiblížení částic a jejich agregaci do větších celků a dochází k destabilizaci. Pokud ovšem zvýšíme dávku koagulačního činidla, dojde k další adsorpci a koloidní částice mohou získat kladný náboj. Tím dojde opět ke zvýšení energetické bariéry, nastává elektrické odpuzování. Tento děj lze nazvat restabilizací. [4]



Obr. 3.3 Mechanismus destabilizace adsorpcí a nábojovou neutralizací v závislosti na dávce činidla [4]

3.2.2 Potlačení elektrické dvojvrstvy

Tato destabilizace spočívá v potlačení difúzní části elektrické dvojvrstvy obklopující hydrofobní koloidy. Abychom potlačili elektrickou dvojvrstvu, musíme zvýšit iontovou sílu roztoku přidávkem indiferentního elektrolytu. To je takový elektrolyt, který se neadsorbuje na částice, např. roztok NaCl . Po přidání do koloidní disperze se náboj na povrchu koloidu nemění, dochází však ke zvýšení hustoty nábojů difúzní vrstvy a tím k jejímu stlačení. Při dostatečně velké iontové síle elektrolytu lze potlačit elektrickou dvojvrstvu (a tím i energetickou bariéru) úplně. Tento způsob destabilizace vede k nežádoucímu zasolování vody, a proto se v technologii úpravy vody prakticky nepoužívá. [3,4]

3.2.3 Zachycování částic nečistot ve sraženině

Při použití vysokých dávek hydrolyzujícího činidla – větších než rozpustnost hydroxidů hliníku nebo železa – dochází k zachycování suspendovaných koloidních částic ve sraženině. Tento děj se uvádí pod názvem „enmeshment“ nebo také „sweep coagulation“. Rychlost reakce roste s koncentrací koloidních částic ve vodě. Nevýhodou této metody je produkce velkého množství kalu. [4]

3.2.4 Destabilizace polymery

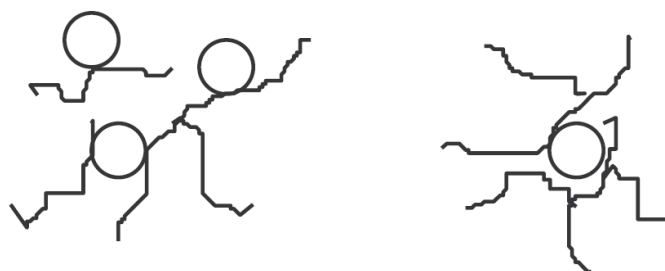
Při této destabilizaci je důležité, aby došlo k adsorpci polymeru na koloidní částici (s pomocí např. elektrostatických, van der Waalsových nebo hydrofobních sil). Pokud mají koloid a polymer opačný náboj a polymer se v roztoku vyskytuje v nízkých koncentracích, dochází k jeho adsorpci pouze na část povrchu opačně nabitě koloidní částice. Toto místo povrchu s adsorbovaným polymerem se nazývá „patch“ a získává opačný náboj než zbytek

koloidu v případě, že nábojová hustota polymeru je větší než nábojová hustota koloidu. Patch potom přitahuje opačně nabitě částice neobsahující adsorbovaný polymer a dochází ke spojování ve větší celky. [4]

V případě neiontových polymerů může probíhat destabilizace prostřednictvím tvorby polymerních můstků mezi koloidními částicemi (polymer bridging). [4]

Tvorba polymerních můstků

Polymery, jejichž molekuly jsou tvořeny dlouhými řetězci, mají vláknitou, popř. síťovitou strukturu. Tyto látky používané k destabilizaci koloidní disperze musí obsahovat určité chemické skupiny, které umožňují interakce s povrchem koloidních částic. Polymery rozpustné v disperzním prostředí se adsorbují na povrch koloidních částic. V případě malého množství adsorbovaného polymeru se jeho řetězce mohou připojit k více koloidním částicím – dojde tak k jejich spojení pomocí polymerních můstků (polymer bridging). Tento jev umožňuje také agregaci částic, které se jinak odpuzují. Podmínkou však je dostatečně velký volný povrch koloidních částic (místo pro navázání řetězců) a takový rozměr polymerních můstků, aby překonaly vzdálenost, v níž působí odpuzivé síly mezi částicemi. Pakliže je optimální množství polymeru naopak překročeno, dojde k tzv. sférické stabilizaci, kdy je bráněno přiblížení částic (nedojde k agregaci). Polymerní můstky představují pevnější spojení částic ve srovnání s agregáty vytvořenými za pomoci snížení elektrických odpuzivých sil. [3,4]



Obr. 3.4 Vlevo tvorba polymerních můstků, vpravo stabilizační efekt při přebytku polymeru [3]

3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ DESTABILIZACI

3.3.1 pH

Hodnota pH je jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících proces destabilizace. Ovlivňuje mimo jiné povrchový náboj (velikost, znaménko) a strukturu znečišťujících příměsí. Optimální hodnota pH pro destabilizaci částic se různí dle jejich složení a vlastností. Například pro srážení $\text{Al}(\text{OH})_3$ je za optimální pH považováno pH v rozmezí 6,0 až 7,4. Dobře sedimentující vločky $\text{Fe}(\text{OH})_3$ vznikají při $\text{pH} > 5$. Obecně platí, že látky kyselého charakteru se odstraňují lépe při nižším pH a látky zásadité při pH vyšším. V případě nevyhovujícího pH disperze po přidání koagulantu je nutno provést jeho úpravu přidávkem kyseliny nebo hydroxidu. [3,4,6]

3.3.2 Kyselinová neutralizační kapacita vody (KNK)

Při hydrolyze, která probíhá po přidání destabilizačního činidla, se uvolňuje kyselina a dochází k poklesu pH a hodnot KNK. Pokud jsou hodnoty pH a KNK upravované vody vysoké, je potřeba velkých dávek destabilizačního činidla pro dosažení optimální hodnoty pH pro destabilizaci. Při nízkých hodnotách pH a KNK vody optimální hodnoty pH prakticky nelze dosáhnout. pH surové vody je proto někdy nutno předupravit. [4]

3.3.3 Obsah iontů

Z kationtů umožňují Ca^{2+} a Mg^{2+} ionty při hodnotách $\text{pH} > 7$ snížení dávky destabilizačního činidla. Vliv aniontů je pak podstatně větší. Přítomnost vyšších koncentrací iontů Cl^- , HClO_3^- , SO_4^- , CO_3^{2-} , PO_4^{3-} ve vodě snižuje velikost optimální dávky činidla. Tento vliv je přímo úměrný velikosti oxidačního čísla aniontů. [4]

3.3.4 Teplota

S klesající teplotou roste viskozita vody a optimální reakční pH se snižuje. Dále platí, že čím vyšší teplotu má surová voda, tím rychleji proběhne hydrolyza po nadávkování destabilizačního činidla. [4]

3.4 RYCHLOST PROCESU KOAGULACE

Koagulace vyvolaná vzájemnými srážkami destabilizovaných molekul nebo částic probíhá s určitou rychlostí. Ta je závislá na frekvenci, s jakou částice přicházejí do kontaktu – počtu srážek, které se uskuteční za časovou jednotku. Toto je ovlivněno především vlastnostmi vody (viskozita, teplota, proudění) a gravitací působící na částice.

Rychlost koagulace je ovlivněna také agregátní stabilitou. Ne každá srážka mezi částicemi musí nutně vést k jejich spojení. Agregátní stabilita vyjadřuje poměr mezi srážkami, které vedou ke spojení částic a celkovým počtem srážek. Je ovlivněna vlastnostmi povrchu částic, jejich reaktivitou a také chemickými vlastnostmi vodního prostředí. [9]

3.5 LÁTKY ODSTRANITELNÉ KOAGULACÍ

Koagulací lze odstranit suspendované a koloidní látky, snížit barvu nebo počet bakterií. Z rozpuštěných látek se při koagulaci zachytí např. ionty těžkých kovů či organické vysokomolekulární látky adsorbované na agregátech. Nedojde však k odstranění nízkomolekulárních organických sloučenin, alkalických kovů, kovů alkalických zemin (Na, K, Ca, Mg) ani aniontů HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} a NO_3^- . [3]

3.6 VOLBA DÁVKY KOAGULANTU

Dávka koagulantu závisí na míře znečištění surové vody, přičemž je požadováno použití co nejnižšího množství destabilizačního činidla tak, abychom dosáhli požadovaného vyčištění vody. Při volbě optimálního množství koagulantu lze vycházet z barvy vody, zákalu, kyselinové neutralizační kapacity $\text{KNK}_{4,5}$ nebo CHSK_{Mn} (CHSK_{Cr}). Při výpočtu dle $\text{KNK}_{4,5}$ lze použít vztah [6]:

$$D = 100 \cdot m, \quad (3.1)$$

kde D ... dávka koagulantu v $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$,

m ... $\text{KNK}_{4,5}$ v $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$,

100 ... koeficient pro přepočítání látkových a hmotnostních koncentrací.

Dávka železité nebo hlinité soli [3]:

$$\text{a) } D = (0,3 \text{ až } 0,4) \cdot \text{CHSK}_{\text{Cr}} [\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1} \text{ Fe}^{3+} \text{ nebo Al}^{3+}], \text{ kde } \text{CHSK}_{\text{Cr}} \text{ v } \text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \quad (3.2)$$

$$\text{b) } D = (2,5 \text{ až } 3,0) \cdot \sqrt{B} [\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1} \text{ Fe}^{3+} \text{ nebo Al}^{3+}], \text{ kde } B \text{ je barva v } \text{mg} \cdot \text{l}^{-1} \text{ Pt} \quad (3.3)$$

V praxi je však stanovení dávky koagulantu takovými výpočty značně nespolehlivé a mnohdy neodpovídá ideální dávce, která vede k požadované kvalitě upravené vody.

Optimalizace podmínek destabilizace se provádí pomocí experimentálních metod a zařízení. Nejstarším a nejobvyklejším způsobem je stanovení přesné dávky, které se provede pomocí laboratorního koagulačního pokusu (sklenicová zkouška), při němž se do surové vody aplikují odstupňované dávky koagulantu. Optimální dávka je pak nejmenší z těch, po jejichž nadávkování má výsledná upravená voda požadovanou kvalitu. V praxi se při úpravě povrchové vody dávky koagulantů pohybují v rozmezí 0,05 až 0,5 mmol·l⁻¹ Al nebo 0,05 až 1,0 mmol·l⁻¹ Fe. [3,9]

Na některých úpravách vody u nás se koagulační pokusy sloužící pro zjištění optimálního množství agregačního činidla a hodnoty pH neprovádějí. Tato skutečnost může vést k provozním problémům a ekonomickým ztrátám. Technologické linky se u jednotlivých úprav vody vzájemně liší, a proto je v praxi nutné určit ideální metodiku procesu pro každou konkrétní úpravu individuálně. Klíčovou roli zde hraje kvalifikovaný technolog, který by měl být na základě svých zkušeností schopen optimálního řízení technologické linky úpravny vody. [9]

3.7 SKLENICOVÁ OPTIMALIZAČNÍ ZKOUŠKA

Za účelem zjištění, při jaké dávce koagulantu a za jakých podmínek (pH, dávka pomocného agregačního činidla, intenzita a doba rychlého a pomalého míchání, vhodný časový okamžik přidávání jednotlivých činidel atd.) lze dosáhnout požadované kvality upravené vody, se provádí sklenicová optimalizační zkouška. Je to v podstatě laboratorní napodobení skutečného procesu koagulace a flokulace na úpravě vody. Do několika identických sklenic opatřených pádlovými míchadly (otáčeny stejnou rychlostí) se nalije stejné množství testované surové vody. Spustí se rychlé míchání a do sklenic jsou přidávána různá množství koagulačních činidel, popř. i alkalizační činidla pro úpravu pH. Po krátkém intervalu rychlého míchání následuje snížení otáček pádlových míchadel, čímž dojde k flokulaci. Výsledný obsah sklenic s vytvořenými usazenými vločkami je přefiltrován a výsledky se vyhodnotí.

Sklenicová optimalizační zkouška je důležitá, protože není možné předpovědět optimální množství dávek činidel pouze podle kvality surové vody. Je jednoduchým testem, jehož výsledky umožňují kontrolu chodu úpravny vody a optimalizaci její účinnosti. [10]

První postup tohoto pokusu byl navržen Wilfredem F. Langelierem. V roce 1920 v Sacramentu, hlavním městě Kalifornie (USA), sestavil aparát složený z šesti jednolitrových skleněných nádob, přičemž obsah každé byl míchán pádly s motorovým pohonem. Pro první zkoušku byla použita voda z řeky Sacramento. Pokus umožňoval sledovat změny tvorby vloček při různých dávkách nebo druzích koagulantů, srovnávat výsledky za použití odlišných rychlostí míchání, délek jednotlivých fází míchání atd. [11]

V různých modifikacích se používá sklenicová zkouška dodnes. Umožňuje optimalizovat hodnotu reakčního pH upravované vody, provozní dávku destabilizačního činidla (popř. i dávku činidla pro předúpravu vody), dávku pomocného agregačního činidla, dále pak intenzitu a dobu rychlého a pomalého míchání disperze, sekvenci přidávání jednotlivých činidel atd. [4]

Nutností při sklenicové optimalizační zkoušce je simulace podmínek používaných na konkrétní úpravě. Důraz je kladen na respektování způsobu úpravy vody v provozu, na dodržení skutečných podmínek míchání disperze na úpravě. Gradienty rychlosti používané na úpravě musí být transformovány na hodnoty odpovídající míchadlům používaným při sklenicové zkoušce. Samozřejmě musí dojít k dávkování stejných koagulantů ve stejném pořadí a daných intervalech jako na úpravě vody. Důležitá je i shodná teplota zkoušené vody a vody přitékající na úpravu. [4]

Pro odhad optimální dávky se nejčastěji používá vzorec, jenž předpokládá destabilizaci koloidních částic pouze nábojovou neutralizací:

$$D_{SH18} = 100 \cdot KNK_{4,5} , \quad (3.4)$$

kde: D_{SH18} ... dávka destabilizačního činidla $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ v $mg \cdot l^{-1}$,
 $KNK_{4,5}$... kyselinová neutralizační kapacita do pH 4,5 v $mmol \cdot l^{-1}$,
 100 ... koeficient pro přepočet látkových a hmotnostních koncentrací
 pro $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$.

Ve skutečnosti se však na destabilizaci podílí více faktorů, které mají větší vliv než zmíněná nábojová neutralizace. Vzorec nelze prakticky použít pro běžné případy povrchových vod u nás. [4]

Další vzorec pro odhad optimální dávky destabilizačního činidla vychází z obsahu organických látek v surové vodě [4]:

$$D_{SH18} = A \cdot CHSK_{Mn} , \quad (3.5)$$

kde: D ... dávka destabilizačního činidla,
 A ... empirický koeficient v rozmezí 4 až 20 (nejčastěji 8),
 $CHSK_{Mn}$... chemická spotřeba kyslíku manganistanem.

Tento vztah je opět použitelný jen v určitých případech (neměnná zjištělá hodnota parametru A , oxidovatelnost organických látek v surové vodě manganistanem). [4]

K přepočítání na dávku jiného koagulantu lze použít vztah [4]:

$$D_x = D_{SH18} \cdot k_x , \quad (3.6)$$

kde: k_x ... přepočítávací koeficient pro jednotlivá destabilizační činidla (viz tab. 3.2).

Tab. 3.2 Hodnoty k_x pro jednotlivá destabilizační činidla (Polášek a Mutl, 1995) [4]

Činidlo	k_x
$Al_2(SO_4)_3$	0,513
$AlCl_3$	0,200
$AlCl_3 \cdot 6H_2O$	0,362
$FeCl_3$	0,242
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	0,406
$Fe_2(SO_4)_3$	0,600
$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	0,843

Řídit se vzorcí není vždy vhodné. Výhodnější je při určování jednotlivých dávek destabilizačního činidla pro sklenicovou optimalizační zkoušku vycházet buď z rozmezí dávek obvykle používaných pro danou úpravnu vody, nebo stupňovat dávky v jednotlivých sklenicích postupně od nuly. [4]

3.7.1 Laboratorní vybavení

1. Vícemístná míchací kolona (běžně šestimístné, ideálně osmi nebo desetimístné)
Toto zařízení musí být uzpůsobeno pro umístění nádob o objemu 1 až 2 litrů a vybaveno míchadly pro každou nádobu, počítadlem otáček, nastavitelným časovým spínačem, ovladačem rychlosti pro nastavení intenzity míchání. Pozice pro umístění jednotlivých nádob by měly být na podstavě vyznačeny.
2. Reakční nádoby (kádinky, sklenice)
Všechny nádoby musí být identické, optimální jsou dvoulitrové sklenice s průměrem cca 10 cm a výškou cca 30 cm.
3. Roztoky činidel (destabilizační činidlo, pomocná agregační činidla, činidla pro předúpravu pH)
Roztoky by měly být připraveny z chemikálií používaných na úpravě čerstvě před dávkováním.
4. Doplnkové vybavení
Kromě výše uvedených pomůcek je potřeba laboratorní odstředivka s výkyvným rotorem, poloměrem otáčení 90 mm a nastavitelnými otáčkami minimálně do 4000 rpm. Objem květ by měl být alespoň 100 ml. Dále je potřebné běžné laboratorní nádobí, jako jsou odměrné válce, pipety, skleněné tyčinky atd. [4]

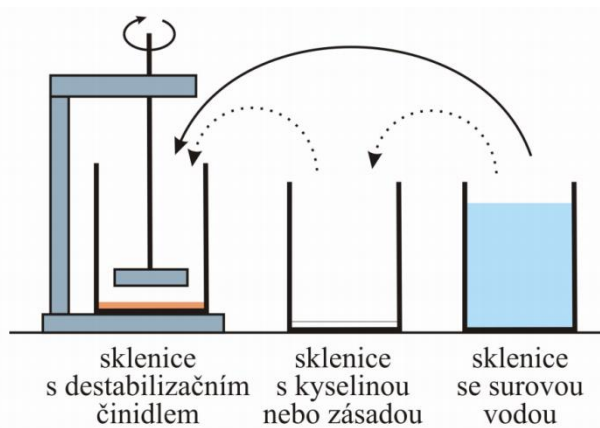
3.7.2 Pracovní postup

Existuje mnoho modifikací této zkoušky, níže je popsán postup při stanovení optimální dávky destabilizačního činidla:

1. Jednotlivé prázdné sklenice, ve kterých bude obsah míchán, očíslováme a postavíme na značky v míchací koloně.
2. Do nádob nadávkuje destabilizační činidlo (odstupňované předem zvolené nebo vypočítané množství).
3. Jinou sadu nádob naplníme stejnými objemy surové vody a umístíme v blízkosti sklenic v míchací koloně.
4. Připravíme očíslované vzorkovací lahvičky dle rozsahu prováděných stanovení (lze stanovit např. zbytkové koncentrace činidel Al nebo Fe, DOC, TOC, $CHSK_{Mn}$, $KNK_{4,5}$, stanovení testů agregace atd.).
5. Před rychlým agregačním mícháním nastavíme otáčky míchadel dle požadovaného gradientu (G_{RAM}) a také čas této první fáze (t_{RAM}).
6. Co nejrychleji přelijeme připravenou vodu do sklenic s nadávkovaným činidlem (vliv časové prodlevy).
7. Za účelem zjištění skutečných koncentrací destabilizačních činidel v reakčních nádobách odebereme z každé vzorek do lahvičky.
8. Uvedeme do chodu rychlé míchání.
9. Po ukončení první fáze ihned odebereme z každé sklenice vzorek pro následné stanovení koncentrace sledovaných parametrů a pro jejich měření po odstředění.
10. Nastavíme otáčky míchadel (G_{PAM}) a čas míchání (t_{PAM}) pro pomalé agregační míchání a proces spustíme.
11. Neprodleně po zastavení míchadel odebereme další vzorek z každé nádoby pro určení počáteční koncentrace sledovaných parametrů (C_0) a pro jejich stanovení po odstředění ($C_{F(0)}$). Od této chvíle (čas t_0) začneme měřit čas sedimentace.
12. Po 5 minutách (čas t_5) odebereme vzorky pro stanovení (C_5).
13. Po 60 minutách sedimentace (čas t_{60}) opět odebereme vzorky, které tentokrát slouží pro určení zbytkové koncentrace destabilizačního činidla (Fe/Al), parametrů charakterizujících kvalitu upravené vody po sedimentaci jako $CHSK_{Mn}$, TOC, zákal, pH,

KNK_{4,5}, počet mikroorganismů atd. (C_{60}) a také pro koncentrace sledovaných parametrů po odstředění ($C_{F(60)}$). [4]

Pokud bychom chtěli kromě dávky činidla optimalizovat také dávku činidla pro úpravu reakčního pH, následoval by další set sklenicových zkoušek. Při tomto postupu se pracuje se třemi řadami reakčních nádob (viz obr. 3.5). Mezi sklenice umístěné v koloně a sklenice s vodou se umístí další s odstupňovanými dávkami činidla pro úpravu pH. Do sklenic v koloně je tentokrát dávkováno nyní již zjištěné optimální množství destabilizačního činidla. Výsledky je vhodné sepsovat do připravené tabulky. [4]



Obr. 3.5 Uspořádání sklenicové optimalizační zkoušky [4]

3.8 FÁZE KOAGULACE

Proces koagulace probíhá ve dvou fázích, přičemž výsledným produktem je dobře odstranitelná (separovatelná) suspenze. Vlastnosti tvořených agregátů, jako jsou velikost, objem a tvar, vnitřní struktura, kompaktnost, hustota, jsou ovlivněny především intenzitou míchání (gradientem rychlosti), dále pak dobou míchání suspenze. [4]

3.8.1 1. fáze – perikinetická

Po nadávkování chemikálie dochází k reakci s koloidními látkami, snižuje se ζ -potenciál částic obsažených v upravované vodě. Částice v suspenzi se pohybují neuspořádaným pohybem (Brownův), který je způsoben tepelnou energií systému. Dochází k jejich srážení a spojování v drobné částice – mikrovločky a jemné vločky.

Průběhem agregace se zabýval Smoluchowski (1916, 1917), který vyjádřil kinetiku tohoto procesu (rychlost změn v počtu agregátů v systému) rovnicí [3]:

$$N = \frac{N_0}{1 + k \cdot T \cdot N_0 \cdot t}, \quad (3.7)$$

kde: N ... počet částic v době t ,

N_0 ... počet částic v čase 0,

T ... termodynamická teplota [K],

k ... konstanta závislá na viskozitě prostředí a poloměru částic [-].

Celý tento proces je prováděn formou rychlého míchání upravované vody ihned po nadávkování chemikálie. Míchání by mělo probíhat ideálně několik sekund až desítky sekund. Délka této fáze by neměla přesahovat 300 sekund. Cílem rychlého míchání je

homogenizace nadávkované chemikálie v objemu upravované vody. Vložená energie usnadní sblížení koloidních částic a chemikálie a pomáhá reakci těchto dvou komponentů. Vzniklé drobné vločky jsou však nesnadno separovatelné, proto je potřeba aplikovat druhou fázi koagulace.

Mezi zařízení zprostředkávající rychlé míchání řadíme clony, proudové mísiče, satorové mísiče, prstencový vodní skok, vertikální a horizontální štěrby. [2]

3.8.2 2. fáze – ortokinetická

Při této fázi vznikají z mikroskopických a malých vloček vločky větší (lépe separovatelné), u kterých se již neuplatňuje Brownův pohyb. Spojování částic do větších celků způsobují především gravitační síly a pohyb kapaliny. Velikost agregátů se pohybuje v rozmezí od 0,1 mm až do několika mm, případně i desítek milimetrů. Tato fáze je též nazývána flokulací (vločkováním). Užívá se při ní pomalé míchání, které trvá v rozmezí několika minut až několika desítek minut (cca 10–30 minut). Doba tohoto míchání se zkracuje s rostoucí teplotou vody. Při překročení ideální doby trvání pomalého míchání může dojít k destabilizaci suspenze nebo její sedimentaci ve flokulační nádrži. Důležitým parametrem u druhé části procesu koagulace je střední gradient rychlosti G . Jeho překročení by způsobilo rozbíjení již vzniklých vloček. Střední gradient rychlosti lze vypočítat podle vztahu (Camp a Stein, 1943) [2]:

$$G = \sqrt{\frac{P}{V \cdot \mu}}, \quad (3.8)$$

kde: G ... střední gradient rychlosti [s^{-1}],

P ... výkon míchadla [$J \cdot s^{-1}$],

μ ... dynamická viskozita [$Pa \cdot s$],

V ... objem vločkovací nádrže [m^3].

Hodnota G se u pomalého míchání pohybuje v rozmezí 20 až 75 s^{-1} . Optimum pro železitá srážedla bývá $G < 65 s^{-1}$, pro hlinitá $G < 25 s^{-1}$. U rychlého míchání je gradient rychlosti roven 100 až 1000 s^{-1} . [2,3]

Mezi zařízení zprostředkávající pomalé míchání řadíme žlaby a nádrže s horizontálním nebo vertikálním průtokem, děrované stěny, vertikální vířivé kuželové mísiče, pádlová míchadla nebo hyperboloidní míchací systémy. [2]

4 KOAGULANTY

Běžnými činidly používanými při úpravě vody jsou hydrolyzující soli kovů (Al a Fe) a polymery. Slouží k destabilizaci znečišťujících příměsí (k potlačení odpuzivých sil působících mezi částicemi) nebo se používají jako pomocná agregační činidla ke zvýšení účinnosti agregace. [4]

Volba druhu koagulantu závisí na složení upravované vody, pH, teplotě vody, oxidačně-redukčním potenciálu, množství suspendovaných látek ve vodě atd. O volbě optimálního destabilizačního činidla musí rozhodnout vždy alespoň laboratorní pokusy, lepší variantou je však odzkoušení pokusy poloprovozními. [2]

4.1 HYDROLYZUJÍCÍ ČINIDLA

V praxi jsou jako koagulační činidla nejčastěji používány hydrolyzující soli železa a hliníku. Koagulanty disociující trivalentní kationty (Al^{3+} , Fe^{3+}) se používají k destabilizaci koloidních částic tvořících barvu a zákal vody. Hliníkové koagulanty jsou účinnější při úpravě huminových vod. Jsou však citlivější na nízkou teplotu vody, kdy se snižující teplotou dochází ke snižování jejich účinků. Železité koagulanty bývají upřednostňovány při úpravě vod s větším obsahem suspendovaných látek. [12]

4.1.1 Síran hlinitý

Síran hlinitý $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ je na světě nejvíce používaným koagulačním prostředkem. Dodává se jako granulovaný nebo v blocích, deskách. Také se expeduje jako 20% roztok. Obsahuje cca 4 % volné H_2SO_4 , proto jeho skladování vyžaduje zvláštní opatření. Podlaha a stěny skladovacích nádrží se musí chránit speciálními nátěry a materiály, např. PVC, sklem, popřípadě se natírou kyselinovzdorným nátěrem. Skladovací výška má být menší než 2,5 m. Optimální rozsah pH pro použití síranu hlinitého je v rozmezí 5,5 až 7,8, dávky se pohybují v rozmezí $10\text{--}150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. [2,3,7]

4.1.2 Hlinitan sodný

Hlinitan sodný NaAlO_2 se většinou používá společně se síranem hlinitým např. při úpravě vysoce zakalených vod. Jeho hydrolyzou vzniká stejná chemická sloučenina, jako při hydrolyze hlinité soli ($\text{Al}(\text{OH})_3$), má však jiný náboj – záporný. Tím je vyvolána flokulace při nadávkování do vody v kombinaci s dávkou hlinité soli. [3]

4.1.3 Polyaluminium chlorid

Poyaluminium chlorid (PAC) je částečně hydrolyzovaný chlorid hlinitý AlCl_3 s malým množstvím síranu hlinitého. Při použití dochází k lepšímu vázání hliníku ve srovnání s železítými či hlinitými koagulanty, tím pádem je obsah zbytkového Al nižší. Ve srovnání se síranem hlinitým stačí použití menšího množství Al k dosažení stejných výsledků koagulace (přitom dochází k produkci menšího množství kalu). Další předností je snazší tvorba vloček i při nižších teplotách. Obvyklé dávky jsou $14\text{--}40 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. [2,13]

4.1.4 Síran železnatý

Síran železnatý $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ je dodáván v práškové formě. Vzniká jako odpad při výrobě titanové běloby nebo v tavírnách kovů. Používá se při vysokých hodnotách pH nad 8,5. Dávky se pohybují v rozmezí $5\text{--}150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. [2, 14]

4.1.5 Síran železitý

Síran železitý $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ je nejčastěji používaná sůl železa. Dodává se pod obchodním názvem Prefloc jako 40% roztok. Opět platí nutnost skladování v nádobách z kyselinovzdorného materiálu, jako jsou plasty, skelný laminát, obaly z epoxidových pryskyřic nebo ocelové zásobníky vevnitř opatřené ochranným povlakem. Používá se při nízkých hodnotách pH 4,5 až 5,6 a při odstraňování barvotvorných látek z vody. Dávky se pohybují v rozmezí $10\text{--}250 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. [2,14]

4.1.6 Chlorid železitý

Chlorid železitý $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dodávaný jako 40% roztok, je nejúčinnějším koagulačním činidlem. Má však silné korozivní účinky a její použití je méně obvyklé. Dávky se pohybují v rozmezí $5\text{--}150 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$. [2,14]

Mezi další používané koagulanty patří:

- chlorid železitý bezvodý FeCl_3 ,
- chlorsíran železitý FeClSO_4 ,
- chlorid hlinitý AlCl_3 a další.

Dávkování koagulantů je závislé na jejich skupenství (roztok nebo tuhý stav).

Hydrolyza destabilizačních činidel probíhá mechanismem vratných reakcí a je závislá na iontové síle, teplotě, pH vody a na koncentraci použitého destabilizačního činidla. Hydrolyza solí hliníku či železa probíhá rychleji při vysoké hodnotě pH. Závislost vlastní hydrolytické reakce na teplotě je mnohem větší než tato závislost reakce zpětné. Nízká teplota vody znamená téměř shodnou rychlost hydrolyzy a zpětné reakce, zatímco vyšší teplota způsobuje mnohem větší rychlost hydrolyzy oproti zpětné reakci.

Při hydrolyze dochází k tvorbě mononukleárních a polynukleárních hydroxopolymerů a postupně dochází ke vzniku hydroxokomplexů A^{III} . Nakonec dojde k vysrážení hydratovaného oxidu hlinitého $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$, který je také označován jako amorfni hydroxid hlinitý $\text{Al}(\text{OH})_3$. [4]

Po nadávkování solí hliníku dojde ke vzniku příslušného hydroxidu podle rovnice [2]:



Při hydrolyze se uvolní vodíkové ionty, ty jsou neutralizovány ionty HCO_3^- obsaženými ve vodě podle rovnice [2]:



Rozklad hydrogenuhlíkatých iontů způsobuje snížení hodnoty pH a kyselinové neutralizační kapacity ($\text{KNK}_{4,5}$), čímž dojde ke zpomalení nebo úplnému zastavení hydrolytických reakcí. Čím větší dávku koagulantu použijeme, tím více vodíkových iontů vznikne a tím větší koncentrace hydrogenuhlíkatých iontů bude potřeba k jejich neutralizaci. Udržení pH v požadovaných mezích dosáhneme pomocí dávkování alkalizačního činidla, např. hydroxidu vápenatého $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dodávaného jako tzv. vápenný hydrát. Dalším

názvem pro tuto látku je tzv. vápenná voda, čímž rozumíme nasycený roztok Ca(OH)_2 . Jako tzv. vápenné mléko označujeme 1% suspenzi Ca(OH)_2 . [3,4]

Neutralizaci H^+ iontů hydroxidem vápenatým lze popsat rovnicí [2]:



Hydroxid vápenatý navíc váže i oxid uhličitý vzniklý při neutralizaci H^+ iontů hydrogenuhličitanu [2]:



Pokud použijeme pro regulaci hodnot pH hydroxid vápenatý, dojde po průběhu chemických reakcí ke zvýšení koncentrace Ca ve vodě (tvrdost). Tomuto lze zabránit dávkováním buď uhličitanu sodného Na_2CO_3 , hydroxidu sodného NaOH nebo hydrogenuhličitanu sodného NaHCO_3 místo Ca(OH)_2 . [2]

Nevýhodou klasických koagulantů, především hlinitých, je tvorba sekundárních (vedlejších) produktů, které mohou zapříčínovat zdravotní problémy člověka a škodit životnímu prostředí. Vysoké koncentrace hliníku ve vodě mají dopady na lidské zdraví, mohou mít karcinogenní účinky. Výzkumy ukazují souvislost jeho dlouhodobého užívání v nadměrných koncentracích s Alzheimerovu chorobou. Limitní hodnota hliníku pro pitnou vodu je $0,2 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. [15]

4.2 POLYMERY

Tyto přírodní nebo syntetické ve vodě rozpustné makromolekulární látky se využívají především jako destabilizační nebo pomocná agregační činidla (flokulanty). Skládají se z pravidelně se opakujících stavebních jednotek spojených kovalentní vazbou. Určitým druhem polymerů jsou polyelektrolyty. Obsahují ionizovatelné funkční skupiny rozprostřené podél hlavního řetězce. Při disociaci těchto skupin získává molekula polymeru kladný nebo záporný náboj a vzniká kationtový, aniontový nebo neiontový polyelektrolyt. [4]

Podle původu dělíme polymery na:

- anorganické – aktivovaná kyselina křemičitá (aniontový polyelektrolyt)
- přírodní – škrob, dextrin, alginát sodný, deriváty celulózy atd.
- syntetické organické polymery – kopolymery akrylamidu a kyseliny akrylové (aniontové), polyetylenimin (kationtový), polyetylenoxid (neiontový)

Užitím polymerů dosáhneme urychlení sedimentace vloček (vznik vloček s pevnější, tužší strukturou),lepší se filtrovatelnost vyloučených suspenzí. Dále polymerní flokulanty snižují obsah organických látek, zákalu i zbytkového koagulantu a tím zlepšují kvalitu upravené vody. Použití těchto látek umožňuje snížit dávky anorganických koagulantů, přičemž dávkování polymerních flokulantů nezávisí na hodnotě $\text{KNK}_{4,5}$. [6]

Přírodní polymery (polyelektrolyty)

Postupem času se objevuje snaha nahrazovat klasické koagulanty přírodními netoxickými látkami šetrnými k životnímu prostředí. Příčinou je vysoká cena a omezená dostupnost běžně používaných koagulantů (síran hlinitý, síran železitý, syntetické polymery apod.), potřeba vysokých účinných dávek těchto činidel, produkce značného množství kalu a v neposlední řadě škodlivost zbytkových koagulantů, které zůstávají v upravené vodě.

Použití semen některých rostlin představuje levné, praktické a vhodné řešení úpravy vody v rozvojových zemích. Například v Indii se už po staletí pro úpravu povrchové vody používají různé druhy a části některých rostlin: vetiver (*Vetiveria zizanoides*), slupky semen kardamovníku obecného (*Elettaria cardamomum*) nebo listy indického angreštu (*Phyllanthus emblica*). Zralá semena kulčiby (*Strychnos potatorum*) byla v Indii používána k odstranění zákalu z říční vody již před 4000 lety. Semena slouží pro úpravu vody také v mnoha afrických zemích (Súdán, Malawi, Zimbabwe a Zambie). Další rostliny, ze kterých se získávají extrakty, jsou například tamarind indický (*Tamarindus indica*), pískavice řecké seno (*Trigonella foenum*), ibišek súdánský (*Hibiscus sabdariffa*) nebo *Cyamopsis psoraloides* (rostlina, ze které se získává guarová guma). Pro úpravu surové vody o hodnotě zákalu 50–7500 NTU se používá čočka jedlá (*Lens esculenta*). Peruánští námořníci využívali již v 16. století rozdrcená a upražená zrna kukuřice seté (*Zea mays*) jako činidlo způsobující usazování nečistot ve vodě.

Pokud se pro koagulaci použijí semena některé z uvedených rostlin, musí se před přípravou nejprve usušit. Poté se rozdrtí nebo namelou. Vzniklý prášek se smíchá s malým množstvím vody a suspenze se přefiltruje. Výsledný roztok je možné použít jako koagulant bez nutnosti další úpravy. Kromě semen se extrahují látky i z dalších částí rostlin – z kořenů, kůry, listů nebo plodů. Výtažky z listů některých druhů kaktusů jsou též používány k čištění vody. [16]

Semena stromu moringa oleifera (moringa olejodárná)

Strom moringa olejodárná pochází původně ze severní Indie (Himaláje), dnes je rozšířený v tropických oblastech po celém světě. Z důvodu jeho odolnosti proti suchu je nazýván „záračným stromem“. Moringa je známá také pod různými lidovými názvy: horseradish tree (křenový strom), benzolive nebo drumstick tree (paličkový strom). Pěstuje se na indickém subkontinentu, Arabském poloostrově, v Africe (včetně Madagaskaru), v jižní Číně, ale i v jižních státech USA. Na světě je dnes známo asi 14 odrůd moringy olejodárné. Tomuto opadavému stromu svědčí suché středně těžké půdy. Roste velkou rychlostí (až 1 m za rok) a dosahuje výšky až 12 m. Plodem jsou tobolky dlouhé až 45 cm, které v sobě ukrývají trojboká křídlatá semena. Každý strom může produkovat přibližně 15 000–25 000 semen a 400–1000 tobolek za rok. Průměrná hmotnost semene (i se slupkou) je 300 mg. [4,17,18,19,20]



Obr. 4.1 Tobolky moringy olejodárné [21]

Strom moringa olejodárná je popisován jako „víceúčelová“ plodina. V některých oblastech jsou jeho části důležitou součástí stravy místních obyvatel (indický subkontinent, Afrika). Listy obsahují antioxidanty, vitamíny, minerály a aminokyseliny prospěšné pro člověka. Používají se do salátů nebo polévek (stejně tak i květy stromu). Tobolky se tepelně upravují nebo konzervují,

semena ze zralých plodů se praží, kořen se používá jako náhrada za křen. Strom má však mnoho dalších využití. Kořeny, semena i listy nachází využití v tradiční medicíně (léčba anémie, onemocnění dýchacích cest, kůže, úprava krevního tlaku, snížení horečky atd.). Z kůry se získává vlákno pro výrobu rohoží a provazů. Zralá semena obsahují až 40 % oleje, který se po vylisování používá v kuchyni, kosmetice nebo například pro mazání hodinových strojků. Setkat se s tímto produktem můžeme pod názvem „behenový olej“. U nás lze moringu pořídit kromě oleje nebo semen také v podobě tablet jako doplněk stravy nebo ve formě prášku, který se používá jako přísada do polévek, koktejlů, pečiva apod. [18,20]

Semena moringy jsou složena přibližně ze 31 % bílkovin, 18 % sacharidů a 37 % tuků. Prášek z rozdrčených semen obsahuje rozpustné proteiny, které dokážou vyvločkovat zákal obsažený ve vodě. Rozpustnost těchto proteinů se zvyšuje s růstem obsahu solí ve vodě. Při laboratorní přípravě koagulačního činidla se proto v některých případech používá chlorid sodný NaCl. Koagulační účinek extraktu připraveného za použití soli vykazuje větší efektivitu než účinek činidla připraveného pouze s použitím kohoutkové nebo destilované vody. Studie prokazují, že u extraktu moringy olejodárné převažují jako mechanismy odstranění zákalu adsorpce a nábojová neutralizace a tvorba polymerních můstků mezi částicemi. [22,17]

Moringa je používána pro úpravu vody tisíce let (Egypt 2000 př. n. l.), vědecky však koagulační účinky semen tohoto stromu potvrdil až kolem roku 1980 německý vědec Samia Al Azharia Jahn. [23,24]

Postupy přípravy koagulačního činidla ze semen moringy mohou být různé. Polyelektrolyt používaný pro úpravu vody se ale ve většině případů získává tak, že usušená semena stromu se po rozemletí smíchají s vodou. Do vodného roztoku poté přechází proteiny s převažujícím kladným nábojem na povrchu. Při přípravě se obvykle na 1 litr vody dávkuje 10 až 50 gramů rozemletých semen. Suspenze semen s vodou je intenzivně protřepávána tak, aby došlo k rozvinutí molekul. Následuje její filtrace. Dávky koagulačního činidla se pohybují v rozmezí 75-200 mg·l⁻¹ v závislosti na vlastnostech (především zákalu) upravované vody. V případě možnosti chlazení suspenze dosahuje její trvanlivost až jednoho týdne. V opačném případě je nutné připravovat denně suspenzi čerstvou. Účinek extraktu ze semen moringy olejodárné při odstraňování zákalu z vody klesá s prodlužující se dobou uchovávání připraveného koagulačního činidla. Tuto skutečnost zkoumal M. Yarahmadi a kol. [22] Extrakt ze semen byl připraven za použití chloridu sodného (5 g prášku ze semen + 500 ml 1 M roztoku NaCl) a modelová voda byla vytvořena smícháním deionizované vody s kaolínem. Vědci zjistili, že po 15 dnech uchovávání při pokojové teplotě dokáže koagulační činidlo redukovat 83 % zákalu, po 30 dnech 79,4 % a po 60 dnech už jen 73 %. Pro koagulaci lze také použít zbytky semen po vylisování obsaženého oleje, které si uchovávají koagulační vlastnosti po určitý čas i po usušení a rozdrčení na prach. [4,22,23]

Moringa olejodárná je vhodná pro čištění surové vody o malém objemu (desítky litrů). Uvádí se, že jedno semeno stromu (~200 mg) postačuje pro vyčištění 1 litru velmi zakalené vody, vždy je však vhodné určit optimální dávku pomocí sklenicové zkoušky. Koagulační vlastnosti semen tohoto stromu závisí na podnebných podmínkách a složení půdy v místě jeho růstu. Je prokázáno, že množství polyelektrolytu obsaženého v semenech je vyšší v období sucha, proto je vhodná sklizeň v tomto období. Koagulant připravený ze semen moringy olejodárné je účinný především při úpravě surové vody s vysokým zákalem (stovky NTU). Výhodou při použití je nezávislost na pH nebo konduktivitě upravované vody. Nevýhodou je ovšem opětovný růst patogenů v upravené vodě při delší době její akumulace. [4,17]

U polyelektrolytu byla prokázána 80,00–99,50% účinnost odstranění zákalu a 60–70% účinnost odstranění tvrdosti vody. Semena mají antimikrobiální účinky díky obsahu látky benzyl isothiokyanátu. Při úpravě vody dochází k redukci bakteriálního znečištění (koliformní

bakterie, *pseudomonas aeruginosa* apod.) v hodnotách 90,00–99,99 %. Mumuni Adejumo a kol. [24] zkoumali vliv zařazení pomalého pískového filtru za proces čištění vody za pomoci koagulačního činidla připraveného ze semen moringy. Počáteční zákal vody odebrané z jezera Agodi v Nigérii $183,7 \pm 0,6$ NTU byl vyčištěním vody s použitím koagulace a sedimentace zredukován na $8,2 \pm 0,1$ NTU. Filtrací přes třívrstvý pískový filtr bylo dosaženo hodnoty $4,1 \pm 0,2$ NTU. Moringa dokázala zredukovat obsah koliformních bakterií o 98,97 % a *Escherichia coli* o 99,16 %. Filtrace tyto hodnoty ještě zvýšila na 99,94 % a 99,97 %. Moringa olejodárná sice dokáže čistit zakalenou vodu, 100% odstranění virů a bakterií však nezaručuje. Úplné zdravotní nezávadnosti lze dosáhnout převařením upravené vody. [17,22,24]

Použití moringy olejodárné k úpravě vody představuje řešení pro chudé rozvojové země, ve kterých žije okolo 75 % z celkové populace naší planety. Obyvatelé těchto oblastí mají omezený přístup k pitné vodě a jsou nuceni používat k pitným účelům povrchovou vodu znečištěnou patogeny (bakterie, viry). Ročně umírá okolo 2 milionů lidí v důsledku průjmových onemocnění způsobených infekcí vyvolanou požitím kontaminované vody. Nejvíce úmrtí je zaznamenáno u dětí do věku 5 let (WHO, 2006). Kromě průjmu způsobuje nedezinfikovaná voda při požití trachom (zánětlivé onemocnění očí vedoucí ke slepotě), různá parazitární onemocnění jako je ankylostomóza, trichuriáza, schistosomóza, askarióza a mnoho dalších. [24]

Škroby

Tyto přírodní polymery se obvykle používají v předželatinované formě, které je dosaženo pomocí hydroxidu sodného nebo působením tepla. K úpravě vody se používají škrob kukuřičný, bramborový, maniokový, marantový (kurkumový, batátový, tapiokový) a jamový, a to především jako pomocné flokulanty. [4]

Guarové gumy

Jsou to neiontové polyelektrolyty vcelku nezávislé na pH a iontové síle roztoku. Získávají se ze semen rostliny *Cyamopsis tetragonoloba* (čeleď bobovité), která se podobá fazoli. Tato luštěnina se pěstuje především v Asii (Indie, Pákistán). [4]

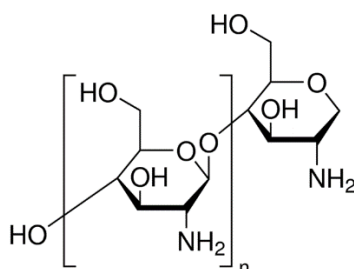
Taniny

Tyto komplexní polysacharidové deriváty taninu (rostlinné polyfenoly) jsou neúčinnější v kyselých podmínkách. Při delším skladování však degradují. Zástupcem skupiny je komerční výrobek Floccotan, amfoterní sloučenina, jejíž aniontová či kationtová povaha se odvíjí od pH. Přípravuje se jako částečně kondenzovaný produkt extraktu taninů z kůry stromu *Acacia colei*. [4]

Alginát sodný

Tento netoxický polysacharidový polymer se získává jako extrakt z určitých druhů hnědých mořských řas nebo chaluž. Alginát sodný tvoří negativně nabitý polyelektrolyt, který se užívá především jako pomocný flokulant, přičemž dávky této látky se pohybují v rozsahu $0,1\text{--}0,6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$. [4]

Chitosan (poly-D-glukosamin)



Obr. 4.2 Chemická struktura chitosanu [30]

Chitosan neboli (1→4)-2amino-2deoxy-β-D-glukan je látka nerozpustná ve vodě a většině organických rozpouštědel. Rozpouští se však v organických a anorganických kyselinách (např. v kys. octové, mravenčí aj.). Tento polysacharid je vyráběn alkalickou deacetylací chitinu, který je obsažen například ve vnějších kostrách korýšů, hmyzu nebo plžů nebo v buněčných stěnách kvasinek a hub rodu *Aspergillus* a *Mucor*. Chitin a chitosan lze vyrábět z odpadních produktů zpracování mořských živočichů. Pro účely úpravy vody je chitosan obvykle připravován v kyselině octové, kde podléhá hydrolýze. Kromě toho lze také použít kyselinu adipovou, mravenčí, jablečnou, propionovou a jantarovou. Chitosan nachází uplatnění ve farmaceutickém, kosmetickém, potravinářském, textilním a papírenském průmyslu. Můžeme se s ním setkat i v podobě potravinového doplňku určeného pro snížení hladiny cholesterolu a snížení hmotnosti. Chitosan na sebe váže tuky a cholesterol, které tím odvádí z těla dříve, než jsou zpracovány. Má schopnost vázat i kovy, například arsen, molybden, kadmium, chrom, olovo a kobalt. [4,25,26,27]

Chitosan je kationtový polyelektrolyt. Využívá se ke snižování zákalu vody, sorpci iontů kovů, ale také k odstranění organického znečištění. Destabilizace probíhá převážně mechanismem nábojové neutralizace. Chitosan je biodegradabilní látka, jeho používání při úpravě vody je tedy šetrnější k životnímu prostředí na rozdíl od používání běžných koagulantů. Anorganické koagulanty jsou sice efektivní, při úpravě eutrofizovaných vod je však nutné použít jejich velké dávky za tvorby značného množství kalu. Kovové koagulanty mají navíc toxický účinek na vodní prostředí. V posledních letech činnost uplatnění chitosanu stoupá. Zkušenosti s touto látkou mají například v Norsku, kde byl vybrán jako koagulant na několika úpravárnách pitné vody, přičemž se zde používá buď samostatně, nebo v kombinaci s kovovými koagulanty. Kromě úpravy povrchové vody na vodu pitnou je účinný i při čištění vod odpadních. [4,25,26,27,28]

Ve srovnání s tradičními koagulanty (flokulanty) má chitosan mnoho předností. Mezi ně řadíme nízké účinné dávky, vysokou účinnost při redukci chemické spotřeby kyslíku CHSK (COD), schopnost odstraňování kovových iontů, tvorbu velkých (objemných) vloček s vyšší usazovací rychlostí, biologickou degradaci, velkou efektivitu při odstraňování řas a suspendovaných částic, anti-bakteriální účinky a nulovou tvorbu sekundárního znečištění. [15]

Bylo již provedeno mnoho studií ohledně odstraňování zákalu při použití chitosanu buď jako jediného koagulantu nebo v kombinaci s dalšími činidly. Bina B. a kol. [29] se zabýval použitím chitosanu společně se síranem hlinitým. Prokázáno bylo, že kombinace obou látek zvyšuje účinnost odstranění zákalu z vody ze 74,3 % na 98,2 % a snižuje obsah volných iontů Al³⁺. [29]

Farid Hesami, Bijan Bina, Afshin Ebrahimi [15] zkoumali v roce 2013 účinnost chitosanu v podobě pomocného koagulačního činidla v kombinaci s chloridem železitým, který představoval hlavní koagulant. Z výsledků provedené sklenicové koagulační zkoušky bylo

zjištěno, že za samostatného použití roztoku FeCl_3 je nejpříznivější hodnota pH pro odstranění zákalu pH 7 při optimální dávce FeCl_3 $10 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (odstranění až 95 % zákalu). V kombinaci této dávky s chitosanem (optimální dávka $0,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) byla zaznamenána hodnota zbytkového zákalu menší než 5 NTU^2 (bez filtrace). Následoval test s dávkou chitosanu $0,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a FeCl_3 v dávkách $0\text{--}30 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Výsledkem byla optimální dávka FeCl_3 pouze $5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ za ještě zvýšeného efektu odstranění zákalu. Přidáním pomocného koagulantu (chitosan) proběhla koagulace snadněji za rychlejší tvorby větších vloček, které sedimentovaly s vyšší rychlostí. Výsledný zákal dosáhl nižších hodnot i při snížení optimální dávky hlavního koagulantu na polovinu původní hodnoty. Použitím menšího množství FeCl_3 klesá obsah zbytkového železa v upravené vodě. Při aplikaci dávek chitosanu menších nebo větších než $0,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ bylo dosaženo nízkých hodnot odstranění zákalu (patrně vlivem restabilizace suspendovaných částic). [15]

Chitosan, jakožto kladně nabitý polymer s dlouhými řetězci, má schopnost koagulovat záporně nabitě jemně dispergované a koloidní částice vlivem adsorpce, nábojové neutralizace, hydrofobního efektu nebo prostřednictvím tvorby polymerních můstků. Použitím přírodního koagulantu v kombinaci s klasickým lze dosáhnout značných úspor z hlediska množství použitých činidel, navíc dojde ke snížení nákladů na likvidaci kalu, který vzniká v menším množství. [15]

Frederick W. Pontius prováděl sklenicovou koagulační zkoušku za použití surové vody z jezera Evans Lake v Kalifornii, USA. Srovnával účinky chitosanu, síranu hlinitého a chloridu železitého. [27]

Tab. 4.1 Výsledné optimální dávky koagulantů a pH testované vody pro odstranění zákalu zjištěné sklenicovou optimalizační zkouškou [27]

činidlo/optimální hodnoty	dávka koagulantu [$\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$]	pH
síran hlinitý $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	30	6,0
chitosan	8	5,5
chlorid železitý $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	5,5

Po provedení koagulace, sedimentace a filtrace přes filtrační papír bylo dosaženo hodnot redukce zákalu 98,8 %, 96,9 % a 98,9 % pro síran hlinitý, chitosan a chlorid železitý. USEPA udává limitní hodnotu zákalu $0,3 \text{ NTU}$. Anorganické soli tuto hodnotu splňují za použití filtrace přes filtrační papír, u chitosanu musí být tento krok pro splnění požadované hodnoty nahrazen membránovou filtrací. Odstranění koliformních bakterií bylo nejefektivnější při použití chloridu železitého, nejmenší účinek měl chitosan (při optimálních dávkách koagulantů a hodnotách pH). Ze všech testovaných činidel byl chitosan nejúčinnější při odstranění barvy, způsobil také mírné snížení tvrdosti vody (o 22 %). U chitosanu způsobují nadměrné dávky restabilizaci disperze, při úpravě surové vody na vodu pitnou je nutné dbát na optimální hodnotu pH. [27]

² Limitní hodnota zákalu v pitné vodě – WHO, 2011, Guidelines for Drinking-water Quality (Pokyny týkající se kvality pitné vody), 4. vyd. Ženeva, Švýcarsko

Syntetické polymery

Kromě solí železa a hliníku jsou běžně používanými koagulanty také syntetické polymery. Ve srovnání se solemi hliníku mají určité přednosti: nižší potřebné dávky, efektivita i při nízkých teplotách, menší množství vzniklého kalu, menší vliv pH na celý proces a další. Negativní vlastností těchto polymerů je však jejich toxicita.

Zpravidla jsou tyto látky účinnější než přírodní polymery (při výrobě lze ovlivňovat jejich vlastnosti), nejsou však biodegradabilní. Existuje velké množství různých výrobků, většina je označena pouze obchodní značkou nebo číslem.

Mnoho syntetických polymerů je založeno na bázi polyakrylamidu a jeho kopolymerů s kyselinou polyakrylovou. Kromě toho existují např. polymery polyethylenu a polyaminu, melaminové/formaldehydové polymery nebo polydimethylaminoethyl polymery a další.

Syntetické polymery jsou dodávány buď v pevné formě jako prášek nebo ve formě tekuté (emulze, roztoky). Suché polymery obsahují 80–90 % účinného polymeru a mohou být skladovány mnohem déle než tekuté. Polyakrylamidové polymery bývají dodávány jako emulze z důvodu nákladného a obtížného procesu jejich sušení. Emulze jsou složeny z kapiček polymeru a vody rozptýlených v minerálním oleji. Obsah aktivního polymeru se pohybuje v rozmezí cca 25–60 %. [4,15]

4.2.1 Pomocné koagulanty

Při úpravě vody lze pro zlepšení sedimentačních vlastností vloček použít tzv. zatěžkávadla, kterými jsou např. bentonit (křemičitan hlinitý), hlinitan sodný, kaolín, srážený uhličitan vápenatý, křemelina, práškové aktivní uhlí a další. [6]

Aktivovaný oxid křemičitý (aktivovaná kyselina křemičitá)

Tato látka anorganického původu se užívá především jako pomocný koagulant (flokulant). Příprava aniontového polyelektrolytu probíhá neutralizací roztoku vodního skla Na_2SiO_3 pomocí kyseliny sírové, chloru, síranu hlinitého nebo uhličitanu sodného, přičemž dochází ke snížení pH až na hodnoty menší než pH 9. Záporný náboj flokulantu způsobí neutralizaci kladně nabitých koloidních částic hydroxidů. Dojde tak k jejich destabilizaci a tvorbě vloček. Aktivovaný oxid křemičitý se obvykle používá v dávkách 1/15 až 1/10 dávky primárního destabilizačního činidla, kterým jsou soli železa nebo hliníku (obvykle se dávky kyseliny křemičité pohybují v rozmezí 1 až $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$). Při nedodržení přesného postupu přípravy této látky (chyby v koncentraci výchozích látek, stupeň míchání a neutralizace) se můžou tvořit vločky gelové konzistence. Ty pak způsobují problémy jako ucpávání čerpadel a dávkovacích potrubí nebo zkracování filtračních cyklů. Kyselina křemičitá se používá zejména při technologii úpravy vody vločkovým mrakem. [3,4]

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Tato část je zaměřena na porovnání účinku tří koagulantů používaných při úpravě vody. Vybranými koagulanty byly síran hlinitý jako běžně používaný koagulant, dále chitosan a moringa olejodárná jako alternativní koagulanty. Byla provedena sklenicová optimalizační zkouška, zkoumanou veličinou byl zákal.

5.1 TESTOVANÁ VODA

Pro koagulační zkoušku byla použita voda z řeky Svratky. K odběru vody došlo 21. 2. 2017 přibližně ve 14:00 v Brně-Bystrci poblíž Letenské lávky (ul. Kníničská). Při odběru byly naplněny 2 plastové třicetilitrové barely (každý cca do poloviny objemu). Venkovní teplota se pohybovala okolo 7 °C, naměřená teplota vody v řece činila 1,8 °C.



Obr. 5.1 Letecký snímek s vyznačením odběrného místa [30]



Obr. 5.2 Odběrné místo

5.2 POUŽITÁ ČINIDLA

5.2.1 Hydroxid vápenatý p.a.

Použitý práškový hydroxid vápenatý dodala firma Penta. Ca(OH) byl použit k dosažení požadovaného pH vody (alkalizaci).

Chemický vzorec:	Ca(OH)
Obsah Ca(OH):	min. 96,0 %
Chloridy:	max. 0,02 %
Sírany:	max. 0,05 %
Fe:	max. 0,05 %
Těžké kovy (Pb):	max. 0,005 %
CaCO ₃ :	max. 4,0 %

5.2.2 Kyselina sírová

Za účelem snížení pH byla použita kyselina sírová od firmy Merck spol. s.r.o.

Chemický vzorec:	H ₂ SO ₄
Koncentrace:	95–97 %
Molární hmotnost:	98,08 g·mol ⁻¹

5.2.3 Síran hlinitý (tekutý)

Dodavatel:	Kemwater Prochemie s.r.o.
Chemický vzorec:	Al ₂ (SO ₄) ₃ × n H ₂ O
Obsah Al ₂ O ₃ :	7,6 ± 0,3 %
Al:	4,0 %
Obsah H ₂ SO ₄ :	0,2 ± 0,5 %
Vzhled:	bezbarvý, čirý roztok
Nerozpustný zbytek:	< 0,005 %
Hustota:	1,30–1,32 g·cm ⁻³

5.2.4 Semena rostliny moringa olejodárná

Výrobce:	Aris Trust s.r.o., Tábor
Země původu:	Filipíny
Stav:	sušené při teplotách do 40 °C, vyloupané z lusků a očištěné

5.2.5 Kyselina octová 99%

Dodavatel:	Ing. Petr Švec – PENTA s.r.o.
Chemický vzorec:	CH ₃ COOH
Molární hmotnost:	60,05 g·mol ⁻¹
Vzhled:	bezbarvá kapalina
Zápach (vůně):	ostrý štiplavý
Hodnota pH:	2,5
Relativní hustota (20 °C):	1,05 g·cm ⁻³
Obsah CH ₃ COOH:	min. 99 %
Netěkavé látky:	max. 0,002 %
Chloridy:	max. 0,0002 %
Sírany:	max. 0,0002 %
Železo:	max. 0,0001 %
Těžké kovy (Pb):	max. 0,0001 %

5.2.6 Chitosan (deacetylovaný chitin, Poly(D-glucosamin)) [31]

Dodavatel:	ALDRICH Chemistry
Biologický původ:	skořápky krevet
Vzhled:	bílý až béžový prášek nebo vločky
Molekulová hmotnost:	190 000–375 000 Da
Viskozita:	> 200 cP
Rozpustnost:	10 mg·ml ⁻¹ 1 M kyseliny octové (vznik slabě nažloutlého kalného roztoku)
Deacetylace:	≥ 75 %

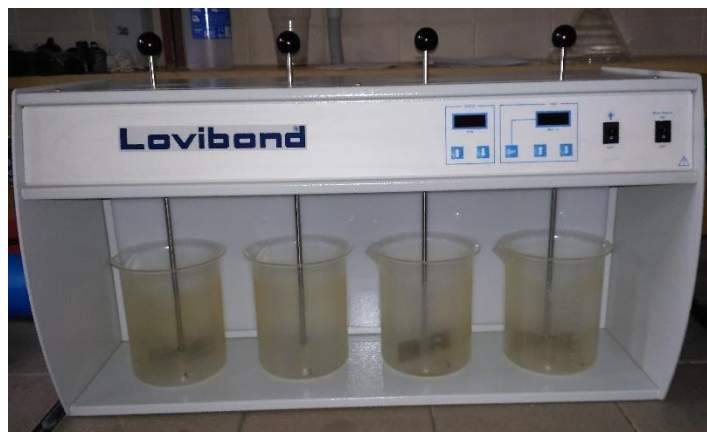
5.3 POUŽITÉ VYBAVENÍ

5.3.1 Míchací kolona [32]

Pro zkoušku byla použita míchací kolona Lovibond ET 740 se čtyřmi pádlovými míchadly. Na přední straně přístroje jsou dva digitální displeje – jeden zobrazuje otáčky (rpm), na druhém je vidět nastavený čas míchání v minutách (je zde i možnost načasování). Během provozu lze plynule měnit míchací rychlosti a nastavovat výšku míchadel. Součástí kolony je také lampa, která umožňuje snadnější pozorování flokulace. Testovaná voda byla míchána ve čtyřech jednolitrových plastových kádinkách.

Technické údaje:

Rozsah otáček:	10 až 300 ot·min ⁻¹
Časovač:	1 až 999 min
Rozměry (délka × hl. × výška):	645 mm × 347 mm × 260 mm
Hmotnost:	13 kg



Obr. 5.3 Míchací kolona Lovibond ET 740

5.3.2 Turbidimetr [33]

Byl použit přenosný turbidimetr HACH 2100Q is, který pracuje na nefelometrickém principu. Využívá dva detektory umístěné kolmo na sebe. Zdrojem světla je LED žárovka 860 nm. Výsledek je zobrazován v NTU (FNU) jednotkách, přičemž je možno měřit rozsah 0,01–1000 NTU s přesností ± 2 %. Přístroj se kalibruje podle roztoku stabilizovaného formazinu.



Obr. 5.4 Přenosný turbidimetr HACH 2100Q is

5.3.3 Multifunkční měřicí přístroj pro pH/Redox (ORP), vodivost/TDS a koncentraci kyslíku [34]

Model YK-2005WA od firmy Lutron slouží k měření pH, vodivosti, TDS (celkové množství rozpuštěných pevných látek), teploty a obsahu kyslíku ve vodě nebo vzduchu. Přístroj má funkci automatické kompenzace teploty. Byl využit pro měření pH pomocí připojené pH elektrody.



Obr. 5.5 Měřicí přístroj LUTRON YK-2005WA

5.3.4 Mikropipeta Eppendorf Research® PLUS [35]

Tato lehká, snadno ovladatelná pipeta umožňuje přesné dávkování objemu kapaliny, který lze nastavit na čtyřmístném displeji.

Technické údaje:

Nastavitelný objem: 500 až 5000 μ l

Správnost: $\pm 0,6$ až 2,4 %

Přesnost: 0,15 až 0,6 %



Obr. 5.6 Mikropipeta Eppendorf Research® PLUS

5.3.5 Multi – THERMOMETER

Teplota byla měřena digitálním teploměrem pro měření teplot v rozsahu -50 °C až $+150$ °C.



Obr. 5.7 Teploměr Multi – THERMOMETER

5.3.6 Analytická váha SARTORIUS BASIC BA 110 S [36]

Pro zjišťování hmotnosti byla použita váha Sartorius Basic BA 110 S vybavená LCD displejem, kruhovou váhící deskou o průměru 80 mm a ochranným krytem proti průvanu. Rozlišení váhy je 0,1 mg a maximální zatížení 110 g.



Obr. 5.8 Analytická váha Sartorius Basic BA 110 S

Dalším použitým vybavením bylo běžné laboratorní nádobí jako skleněné baňky, kádinky, pipety, odměrné válce, míchací tyčinky, zkumavky apod. Pro práci se semeny moringy olejodárné byl navíc použit hmoždír a porcelánová miska.

5.4 MĚŘENÉ VELIČINY

5.4.1 Zákal

Zákal je v podstatě snížená průhlednost vody, kterou způsobují anorganické (např. kovy, jílové minerály) nebo organické (např. bakterie, řasy, sinice, pyl) koloidní a jemně suspendované částice. Stanovení zákalu se provádí fotometricky porovnáním vzorku vody s koloidním roztokem formazinu nebo srovnáním s roztoky oxidu křemičitého (SiO_2) o různých koncentracích (vyjádření v $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ SiO_2).

Norma ČSN EN ISO 7027 (Jakost vod – Stanovení zákalu) uvádí dvě kvantitativní metody pro stanovení zákalu vody – optickými turbidimetry nebo nefelometry.

Turbidimetrie spočívá v měření útlumu zářivého toku a je vhodnější pro velmi zakalené vody (například pro odpadní nebo znečištěné vody). Takto naměřený zákal se vyjadřuje ve formazinových turbidimetrických jednotkách (ZFt), popř. FAU. Výsledky se obvykle pohybují v rozsahu 40 FAU až 4 000 FAU.

Nefelometrie – měření rozptýleného záření – je naopak vhodná pro vody s nízkým zákalem (například pro pitnou vodu). Zákal měřený touto metodou se vyjadřuje ve formazinových nefelometrických jednotkách (ZFn), popř. FNU nebo NTU. Výsledky se obvykle pohybují v rozsahu od 0,05 NTU do 400 NTU. Jednotky FNU a NTU jsou numericky ekvivalentní a platí vztah $1 \text{ NTU} = 1 \text{ ZFn} = 1 \text{ FNU}$.

Limit zákalu v pitné vodě je 5 ZF(t,n). Tuto hodnotu stanovuje vyhláška č. 252/2004 Sb. v příloze č. 1. Překročení hodnoty 5 ZF(t,n) zhoršuje vzhledové a chuťové vlastnosti vody, nepříznivě ovlivňuje účinnost dezinfekce chlórem, způsobuje přítomnost látek umožňujících růst a množení bakterií. [2,3,37,38]

5.4.2 pH

Hodnota pH slouží k vyjádření kyselosti/alkalinity vodného roztoku. Molekuly vody mohou reagovat jako kyseliny i jako zásady, disociací vody H_2O vznikají ionty H^+ a OH^- . Koncentrace vodíkových, popř. hydroxidových iontů je charakterizována hodnotou pH, což je záporný dekadický logaritmus látkové koncentrace (aktivity) vodíkových iontů.

$$\text{pH} = -\log c(\text{H}^+) \quad (5.1)$$

Součin látkových koncentrací H^+ a OH^- iontů je při 25 °C roven 10^{-14} :

$$K_v = c(\text{H}^+) \cdot c(\text{OH}^-) = 10^{-14} \text{ (při 25 °C)}, \quad (5.2)$$

kde: K_v ... iontový součin vody.

Platí tedy vztah:
$$\text{pH} = -\log c(\text{H}^+) = 14 + \log c(\text{OH}^-). \quad (5.3)$$

Orientační stanovení pH se provádí porovnáním zbarvení indikátorového papírku po jeho namočení do roztoku s barevnou stupnicí (kolorimetricky). Pro větší přesnost určení pH se používají pH metry (elektrochemické měření za použití elektrod a elektrolytu). [2,39]

Tab. 5.1 Klasifikace roztoků podle stupnice pH (při 25 °C) [3]

$(\text{H}^+) > (\text{OH}^-)$	$\text{pH} < 7$	roztok je kyselý
$(\text{H}^+) = (\text{OH}^-)$	$\text{pH} = 7$	roztok je neutrální
$(\text{H}^+) < (\text{OH}^-)$	$\text{pH} > 7$	roztok je zásaditý

5.4.3 Teplota

Teplota má vliv na kvalitu vody, rychlost průběhu chemických a biochemických reakcí, rozpustnost látek a vlastnosti vody jako jsou hustota, viskozita atd. Teplota podzemních vod se pohybuje celoročně kolem 10 °C, zatímco teplota povrchových vod kolísá v závislosti na ročním období a klimatických podmínkách.

S rostoucí teplotou vody se zvyšuje rychlost samočisticích procesů v povrchových vodách vlivem jejich biologického oživení, zároveň však klesá rozpustnost plynů. Důsledkem může být vyčerpání rozpuštěného kyslíku. [39]

5.5 PRŮBĚH POKUSŮ

Před pokusy bylo změřeno pH, teplota vody a zákal. Voda byla slabě zásaditá (pH 7,85), měla teplotu 18,2 °C a zákal 8,92 ZF (FNU, NTU). Zákal byl měřen u modelové vody vícekrát a výsledná hodnota byla získána zprůměrováním dílčích výsledků. Před první sérií pokusů bylo upraveno pH pomocí kyseliny sírové na hodnotu pH 7,5 (v případě nepřesného dávkování a přílišného snížení pH pod hodnotu 7,5 byl použit hydroxid vápenatý pro mírné zvýšení hodnoty pH).

5.5.1 Síran hlinitý

Jako první byla provedena sklenicová optimalizační zkouška s použitím síranu hlinitého. Tekutý 50% roztok dodala firma Kemwater Prochemie s.r.o. Toto anorganické koagulační činidlo na bázi soli hliníku se kromě úpravy pitné vody používá také pro čištění komunálních a průmyslových odpadních vod. Síran hlinitý se dále využívá například v papírenském nebo stavebním průmyslu. Při reakci s vodou dochází k hydrolýze a tvorbě kladně nabitých polymerů. Záporně nabité koloidní a suspendované látky obsažené ve vodě se vybíjí, částice se vrství na sebe a vytváří větší vločky. [40]

Tuto látku použil pro sklenicovou optimalizační zkoušku již dříve student VUT FAST v Brně Zdeněk Zelený. Ve své diplomové práci z roku 2014 na téma „Možnosti inovace procesu úpravy vody“ pracoval s vodou odebranou z Brněnské přehrady. Lze předpokládat, že tato surová voda měla podobné vlastnosti, jako voda použitá pro pokusy v rámci mé bakalářské práce. Zdeněk Zelený optimalizoval prováděním několika sérií sklenicových zkoušek dávkou koagulantu, pH a nakonec rychlost pomalého a rychlého míchání. Zkoumanou veličinou byl zákal. Ze zjištěných hodnot vyplynulo, že optimální pH pro odstranění zákalu je pH 7,5, rychlost míchání pro 1. fázi je 150 rpm (po dobu 2 minut) a rychlost míchání pro 2. fázi koagulace je 40 rpm (po dobu 20 minut). Stejně hodnoty byly použity i v případě mé bakalářské práce. [41]

Před naplněním kádinek testovanou vodou byla voda v zásobním barelu vždy důkladně promíchána protřesením nádoby po dobu 10 sekund. Čtyři plastové kádinky o objemu 1 litr byly po rysku naplněny vodou. Do každé byla přidána předem zvolená dávka síranu hlinitého.

Pro přepočítání mezi nadávkovaným objemovým množstvím a hmotnostní dávkou síranu hlinitého byl použit vzorec (5.4). Hmotnostní dávka hliníku v daném množství pak byla vypočítána podle vzorce (5.5).

$$D_m = D_v \cdot \rho \cdot 1000, \quad (5.4)$$

kde: D_m ... hmotnostní dávka síranu hlinitého [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$],
 D_v ... objemová dávka síranu hlinitého [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$],
 ρ ... objemová hmotnost síranu hlinitého [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$].

$$Al_m = \frac{D_m \cdot Al_{\%}}{100}, \quad (5.5)$$

kde: Al_m ... hmotnostní dávka hliníku [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$],

D_m ... hmotnostní dávka síranu hlinitého [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$],

$Al_{\%}$... hmotnostní podíl hliníku v síranu hlinitém [%].

Pro smísení koagulantu s vodou byl obsah kádinky po přidání síranu vždy zamíchán skleněnou tyčinkou. Následovalo spuštění míchadel do kádinek a nastavení dvouminutového intervalu míchání o rychlosti 150 rpm. Bezprostředně po dokončení této fáze bylo provedeno pomalé míchání rychlostí 40 rpm po dobu 20 minut. Poté byla pádlová míchadla vyzvednuta nad úroveň hladin v kádinkách, aby mohla proběhnout nerušená 60minutová sedimentace vytvořených vloček.



Obr. 5.9 Síran hlinitý – vytvořené vločky po dokončení fáze pomalého míchání

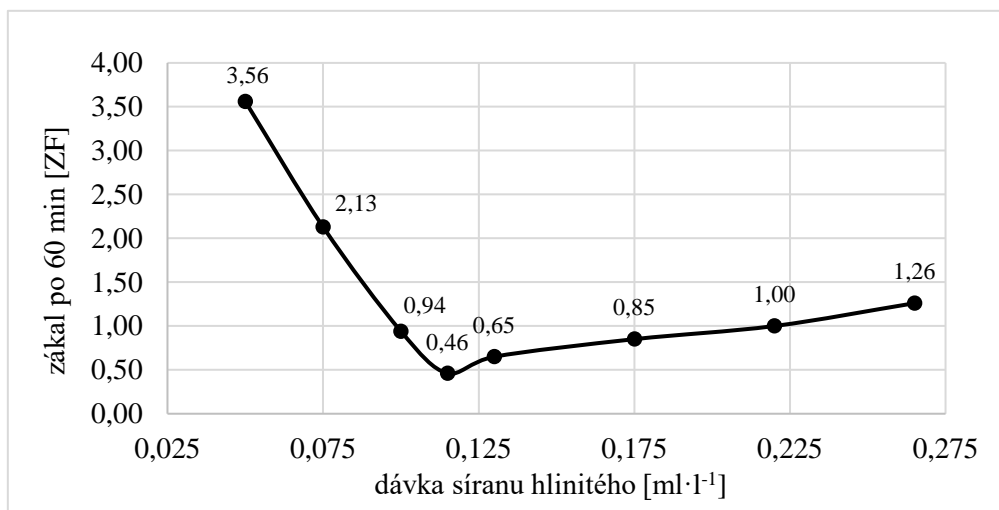
Při koagulaci byla pozorována tvorba vloček, které snadno klesaly na dno kádinek po skončení míchání. Množství usazených vloček se na pohled zdálo stejné ve všech 4 kádinkách u jednotlivých sérií pokusů. Zákal byl měřen u vzorků vody odebráných u hladiny z jednotlivých kádinek. Výsledky jsou patrné z tab. 5.2 a obr. 5.11 a 5.12.



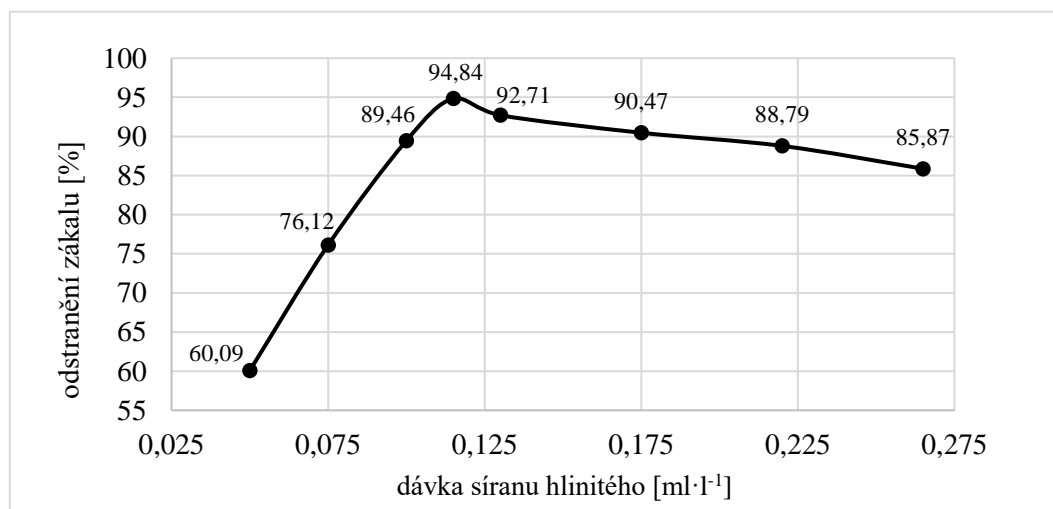
Obr. 5.10 Síran hlinitý – vločky usazené na dně po 60 minutách sedimentace

Tab. 5.2 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky síranu hlinitého

č. vzorku	surová voda			dávka			rychlé míchání		pomalé míchání		zákal po 60 min [ZF]	odstranění zákalu [%]
	pH	zákal	teplota	síran hlinitý		Al	rychlost	doba	rychlost	doba		
	[-]	[ZF]	[°C]	[ml]	[mg]	[mg]	[rpm]	[min]	[rpm]	[min]		
1	7,5	8,92	18,2	0,050	65,5	2,6	150	2	40	20	3,56	60,09
2				0,075	98,3	3,9					2,13	76,12
3				0,100	131,0	5,2					0,94	89,46
4				0,115	150,7	6,0					0,46	94,84
5				0,130	170,3	6,8					0,65	92,71
6				0,175	229,3	9,2					0,85	90,47
7				0,220	288,2	11,5					1,00	88,79
8				0,265	347,2	13,9					1,26	85,87



Obr. 5.11 Závislost zákalu na dávce síranu hlinitého



Obr. 5.12 Závislost odstranění zákalu na dávce síranu hlinitého

Nejmenší naměřená hodnota zákalu po šedesáti minutách sedimentace byla 0,46 ZF (při pH 7,50, počátečním zákalu 8,92 ZF a teplotě 18,2 °C), a to při dávce síranu hlinitého 0,115 ml. Pokles o 8,46 ZF představuje odstranění zákalu 94,84 %. Nejhorší výsledek byl zaznamenán při dávce 0,050 ml – hodnota zákalu 3,56 ZF a odstranění zákalu jen 60,09 %.

Správnost a přesnost výsledků může být ovlivněna mnoha faktory. Nejčastěji se vyskytujícími problémy jsou lidská chyba, výrobní nepřesnost laboratorního nádobí nebo chyba přístrojů. Tyto příčiny mohou způsobit například nechtěné nepřesné vážení nebo odměřování množství

činidel, objemu vody apod. Kromě nepřesnosti turbidimetru je měření zákalu ovlivněno stavem jednopalcových skleněných kyvet vkládaných do přístroje. Pokud se na povrchu těchto lahvíček vyskytují škrábance nebo nečistoty, měření může být ovlivněno. Rovněž bublinky vyskytující se v testované vodě zkreslují výsledek měření zákalu. Tato skutečnost platí pro všechny pokusy prováděné v rámci této bakalářské práce.

5.5.2 Moringa olejodárná

Semena této rostliny byla zakoupena přes internetový obchod společnosti Vitamare s.r.o.



Obr. 5.13 Použitá semena moringy olejodárné

Při první sérii pokusů byla použita 3 semena. Pod jejich slupkami se nacházela bílá zaoblená jádra. Ta byla rozdrčena ve hmoždíři na prach, vzniklé množství bylo přesunuto do porcelánové misky a zváženo. Hmotnost činila 0,4198 g.



Obr. 5.14 Porcelánová miska s práškem vzniklým po rozdrčení jader semen

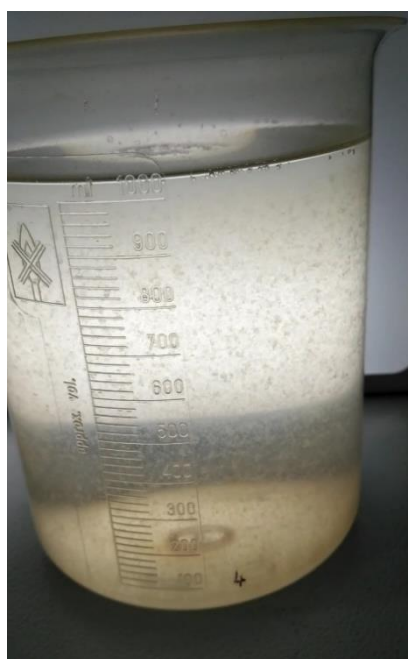
Koagulant byl připraven smícháním prášku ze semen se 102 ml kohoutkové vody (tato hodnota použitého objemu z důvodu ztráty cca 2 ml při následné filtraci vlivem nasáknutí látky). Suspenze byla intenzivně protřepávána po dobu 5 minut a poté přefiltrována přes čistou bavlněnou tkaninu za účelem separace větších částic. Do jednotlivých kádinek bylo dávkováno 10 ml, 20 ml, 30 ml a 40 ml vzniklého roztoku (41,2 mg, 82,3 mg, 123,5 mg, 164,6 mg prášku). U druhé série sklenicové optimalizační zkoušky bylo použito 6 semen (hmotnost prášku 0,8422 g). Příprava roztoku probíhala stejně jako u série první, tentokrát bylo však dávkováno 2,5 ml, 25 ml, 30 ml a 42,5 ml roztoku (20,6 mg, 206,4 mg, 247,7 mg, 350,9 mg prášku).

Již v průběhu pomalého míchání byl zaznamenán vznik drobných vloček světlé barvy v upravované vodě.



Obr. 5.15 Moringa olejodárná – stav po 30 minutách sedimentace

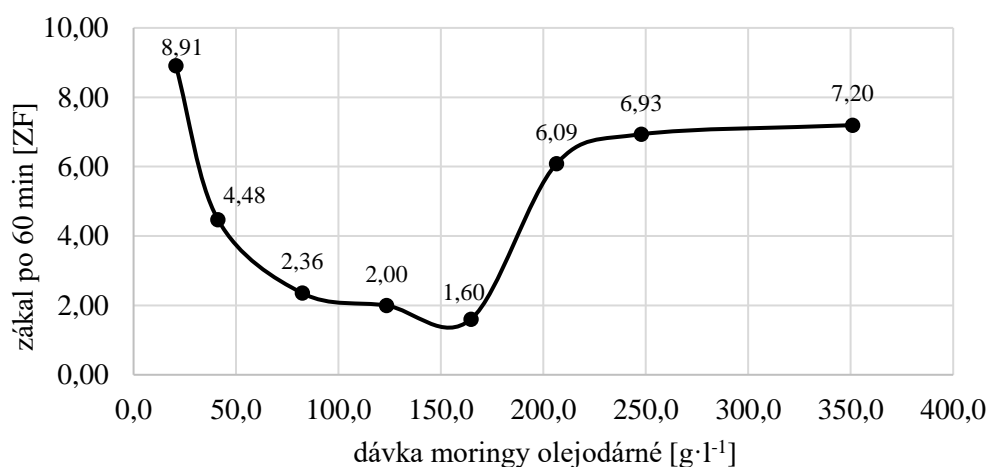
Množství těchto malých pozorovaných shluků rostlo s rostoucí dávkou koagulačního činidla. Vločky se však v průběhu celé fáze usazování vznášely v objemu kádínek a k jejich sedimentaci docházelo jen částečně. Na dně se usadila pouze část vloček a kal. I přesto byly naměřeny nižší hodnoty zákalu než před úpravou vody (viz tab. 5.3).



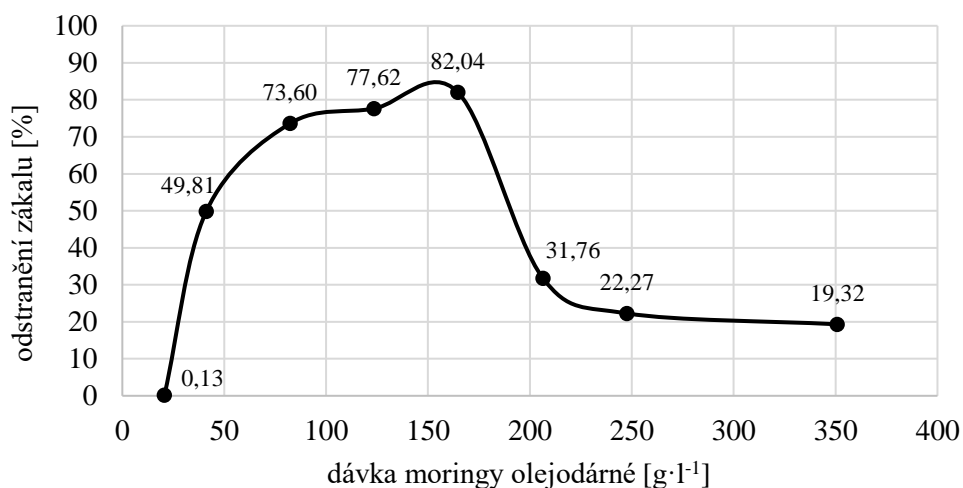
Obr. 5.16 Moringa olejodárná – detailní pohled na vytvořené vločky

Tab. 5.3 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky moringy olejodárné

č. vzorku	surová voda			dávka	rychlé míchání		pomalé míchání		zákal po 60 min	odstranění zákalu
	pH	zákal	teplota	moringa olejodárná	rychlost	doba	rychlost	doba	[ZF]	[%]
	[-]	[ZF]	[°C]	[mg]	[rpm]	[min]	[rpm]	[min]		
1	7,5	8,92	17,6	20,6	150	2	40	20	8,91	0,13
2				41,2					4,48	49,81
3				82,3					2,36	73,60
4				123,5					2,00	77,62
5				164,6					1,60	82,04
6				206,4					6,09	31,76
7				247,7					6,93	22,27
8				350,9					7,20	19,32



Obr. 5.17 Závislost zákalu na dávce moringy olejodárné



Obr. 5.18 Závislost odstranění zákalu na dávce moringy olejodárné

Z výše uvedených výsledků pokusu vyplývá, že nejučinnější při odstranění zákalu byla dávka moringy olejodárné 164,6 mg. Výchozí hodnota zákalu byla zredukována na 1,60 ZF, což představuje 82,04% odstranění zákalu. Nejmenší hodnota odstranění zákalu byla naměřena při dávce moringy 20,6 mg. Hodnota zákalu klesla pouze o 0,01 ZF.

5.5.3 Chitosan

Jako poslední byl zkoumán účinek chitosanu při odstraňování zákalu z vody. Činidlo dodala firma ALDRICH Chemistry v podobě 25 g bílého prášku distribuovaného v plastové lahvičce. Použitý chitosan byl rozpustný v 1 M CH₃COOH (10 mg·ml⁻¹). Pro přípravu koagulačního činidla byla použita 99% kyselina octová, kterou dodala firma Ing. Petr Švec – PENTA s.r.o. Ke 2 ml kyseliny octové byla přidána voda pro získání roztoku o koncentraci 1 mol·dm⁻³.

Výpočet objemu vody, který byl přidán k 99% kyselině octové:

$$M(\text{CH}_3\text{COOH}) = 60,05 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$c(\text{konečného roztoku}) = 1 \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$$

$$V(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) = 2 \text{ ml} = 2 \text{ cm}^3$$

$$\rho(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) = 1,05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

Hmotnost 2 ml 99% roztoku:

$$m(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) = V(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) \cdot \rho(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) \quad (5.6)$$

$$m(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) = 2,1 \text{ g}$$

Hmotnost čisté kyseliny v 99% roztoku:

$$m(\text{čisté CH}_3\text{COOH}) = m(99\% \text{ CH}_3\text{COOH}) \cdot w(\text{CH}_3\text{COOH}) \quad (5.7)$$

$$m(\text{čisté CH}_3\text{COOH}) = 2,079 \text{ g}$$

Látkové množství čisté kyseliny:

$$n(\text{čisté CH}_3\text{COOH}) = \frac{m(\text{čisté CH}_3\text{COOH})}{M(\text{CH}_3\text{COOH})} \quad (5.8)$$

$$n(\text{čisté CH}_3\text{COOH}) = 0,0346 \text{ mol}$$

Objem konečného roztoku:

$$V(\text{konečného roztoku}) = \frac{n(\text{čisté CH}_3\text{COOH})}{c(\text{konečného roztoku})} \quad (5.9)$$

$$V(\text{konečného roztoku}) = 0,0346 \text{ dm}^3 = 34,6 \text{ ml}$$

$$\text{Objem přidané vody: } 32,6 \text{ ml}$$

Roztok CH₃COOH o koncentraci 1 mol·dm⁻³ byl připraven přidáním 32,6 ml kohoutkové vody ke 2 ml kyseliny octové. V 10 ml vzniklého 1 M roztoku bylo rozpuštěno 0,1 g chitosanu. Vnikla kapalina poměrně husté konzistence, roztok byl dolit kohoutkovou vodou do objemu 100 ml. Tento koagulant (100 mg chitosanu ve 100 ml činidla) byl dávkován do kádinek při sklenicové optimalizační zkoušce.

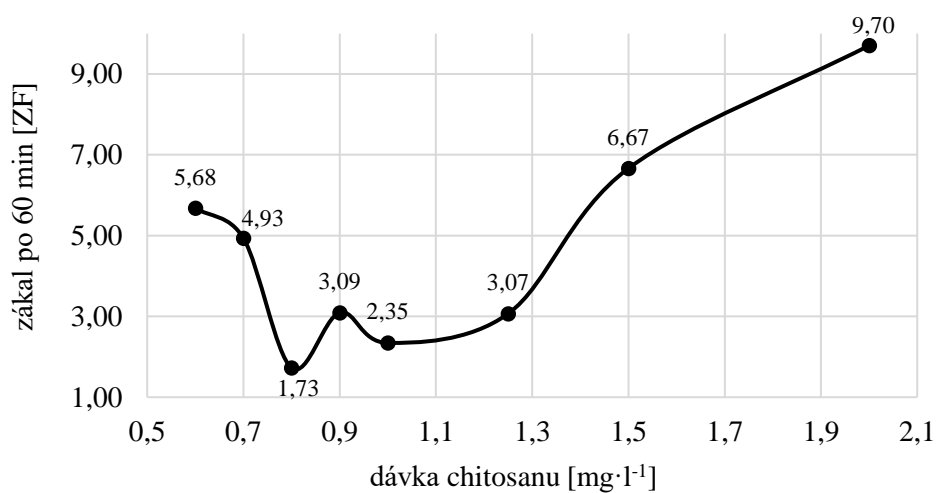
Tvorba vloček v surové vodě byla viditelná až přibližně od poloviny fáze pomalého míchání. Drobné agregáty měly světle hnědou barvu a usazovaly se rychleji než agregáty vzniklé při pokusu s použitím moringy. Po 60 minutách sedimentace se většina vloček sice usadila, zbytek však zůstal ve vznosu.



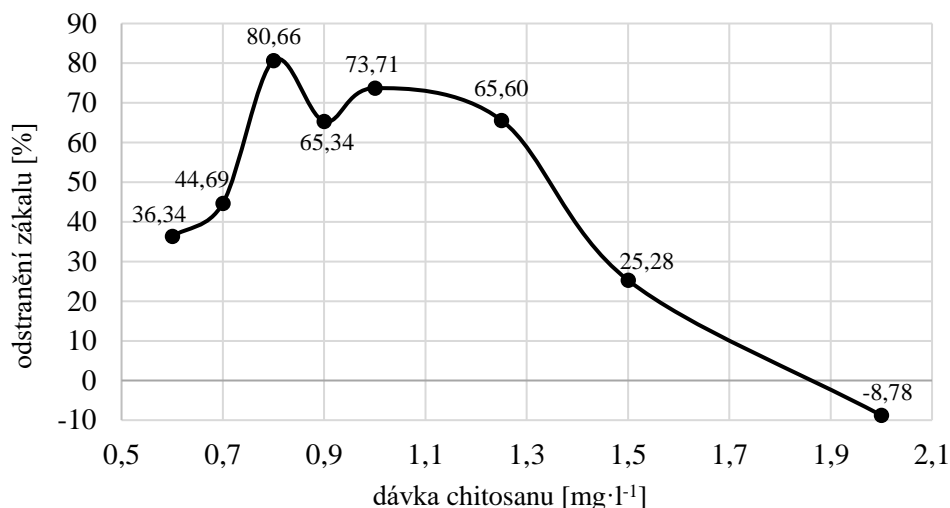
Obr. 5.19 Chitosan – vzhled usazených vloček

Tab. 5.4 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky chitosanu

č. vzorku	surová voda			dávka chitosan [mg]	rychlé míchání		pomalé míchání		zákal po 60 min [ZF]	odstranění zákalu [%]
	pH	zákal	teplota		rychlost	doba	rychlost	doba		
	[-]	[ZF]	[°C]	[rpm]	[min]	[rpm]	[min]			
1	7,5	8,92	18,2	0,6	150	2	40	20	5,68	36,34
2				0,7					4,93	44,69
3				0,8					1,73	80,66
4				0,9					3,09	65,34
5				1,0					2,35	73,71
6				1,3					3,07	65,60
7				1,5					6,67	25,28
8				2,0					9,70	-8,78



Obr. 5.20 Závislost zákalu na dávce chitosanu



Obr. 5.21 Závislost odstranění zákalu na dávce chitosanu

Nejnižší hodnota výsledného zákalu (1,73 ZF) byla naměřena při použití dávky chitosanu 0,8 mg. Toto činidlo dokázalo odstranit 80,66 % zákalu. Nejhorších výsledků bylo dosaženo při dávce 2,0 mg – došlo k navýšení zákalu oproti původní hodnotě o 0,78 ZF.

5.6 POROVNÁNÍ

V tab. 5.5 je shrnut výsledek sklenicových optimalizačních zkoušek. Nejúčinnějším koagulantem při odstranění zákalu byl síran hlinitý. Největších úspor z hlediska množství dávkovaného činidla pak dosáhneme použitím chitosanu. Podrobněji jsou pozorované účinky použitých koagulantů popsány a zhodnoceny v následující kapitole.

Tab. 5.5 Porovnání účinku jednotlivých činidel při odstranění zákalu z povrchové vody

činidlo	optimální dávka	zákal po 60 min	odstranění zákalu
	[mg]	[ZF]	[%]
síran hlinitý	150,7	0,46	94,84
moringa olejodárná	164,6	1,60	82,04
chitosan	0,8	1,73	80,66

V tab. 5.6 jsou porovnány ceny použitých koagulantů. Optimální dávka moringa olejodárné je několikanásobně dražší než optimální dávka dvou zbylých činidel. Nejlépe po finanční stránce vychází síran hlinitý.

Tab. 5.6 Cenové porovnání použitých činidel

použité činidlo	tekutý síran hlinitý	moringa olejodárná	chitosan
cena bez DPH [Kč/g]	0,015	53,143	51,876
optimální dávka [mg]	150,7	164,6	0,8
cena optimální dávky bez DPH [Kč]	0,002	8,747	0,042

6 ZÁVĚR

V rámci experimentální části bakalářské práce bylo hodnoceno odstranění zákalu z vodního prostředí pomocí procesu koagulace. U každého činidla použitého při sklenicové optimalizační zkoušce byl průběh procesu koagulace a flokulace odlišný.

Při použití síranu hlinitého došlo v kádinkách k vytvoření velkého počtu zřetelných vloček již v průběhu fáze rychlého míchání. Nejvíce agregátů vzniklo ve vodě, do které bylo nadávkováno největší množství činidla. Vločky se po 60 minutách sedimentace usadily na dnech nádob, kde vytvořily zákal světle hnědé barvy. Optimální dávka síranu hlinitého $150,7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ dokázala zredukovat zákal o 94,84 % na hodnotu 0,46 ZF.

Vytvořené vločky při koagulaci s použitím moringy olejodárné měly světlou barvu. Okem pozorovatelné byly až na počátku druhé fáze míchání. Sedimentace agregátů probíhala velmi pomalu, po hodině usazování nebyly patrné zřetelné změny. Optimální dávka moringy byla $164,6 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, tedy největší ve srovnání se síranem hlinitým a chitosanem. Moringa dosáhla druhé nejmenší hodnoty zbytkového zákalu 1,60 ZF (odstraněno 82,04 %). Lepších výsledků redukce zákalu lze dosáhnout prodloužením doby sedimentace nebo použitím filtrace.

U chitosanu byla optimální dávka nízká – pouze $0,8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Při tomto množství měl naměřený zbytkový zákal hodnotu 1,73 ZF, což představuje o 80,66 % méně, než bylo zjištěno u surové vody. Při sklenicové koagulační zkoušce byl účinek chitosanu viditelný až v druhé polovině fáze pomalého míchání. V kádinkách se tvořily velmi drobné světle hnědé vločky, přičemž jejich počet byl úměrný dávce koagulantu. Agregáty vykazovaly o mnoho lepší sedimentační vlastnosti než v případě moringy.

Nejlépeších výsledků při odstranění zákalu ze surové vody dosáhl síran hlinitý. V porovnání s přírodními koagulačními činidly je cena jeho optimální dávky nejnižší. Při použití síranu hlinitého pro úpravu vody však vznikají škodlivé sekundární produkty spojené se zdravotními problémy. Vysoké koncentrace hliníku v pitné vodě jsou spojeny s rizikem Alzheimerovy nemoci a mají karcinogenní účinky.

Výsledky pokusu při použití moringy olejodárné jsou sice méně příznivé, redukce zákalu o cca 82 % je však výsledek prokazující vcelku dobrou účinnost tohoto činidla. Lepších výsledků by bylo možné dosáhnout odlišnou přípravou koagulantu (použití NaCl, destilované vody). U nás vychází úprava modelové vody s použitím moringy olejodárné při pořízení semen přes internetový obchod nejdražší (ve srovnání se síranem hlinitým a chitosanem). Strom je však pro čištění vody využíván zejména v rozvojových zemích, kde je pěstován volně nebo cíleně na plantážích za účelem sběru a využívání jeho částí. Moringa je nejúčinnější při odstraňování vysokých hodnot zákalu z povrchové vody, přičemž klíčovou vlastností koagulačního činidla připraveného ze semen tohoto stromu je schopnost odstranění bakteriálního znečištění. Úprava vody před její konzumací za použití moringy může znamenat záchranu lidských životů. Důležitá je informovanost populace rozvojových zemí o schopnostech zmiňovaného stromu a postupu čištění surové vody.

U chitosanu byl očekáván nepatrně lepší výsledek. Redukce zákalu v hodnotě 80,66 % však vypovídá o dobré schopnosti tohoto polyelektrolytu odstraňovat zákal ze surové vody. Efektivitu chitosanu lze podpořit použitím v kombinaci s tradičními koagulanty. Studie zkoumající tuto variantu prokazují, že aplikace určitého množství látky přírodního původu snižuje potřebné optimální množství běžně používaných koagulantů. Úprava vody za použití takové kombinace obou látek je šetrnější k životnímu prostředí. V průběhu procesu vzniká méně škodlivých produktů (zbytkové Fe a Al), dochází k úsporám činidel, snížení množství vznikajícího kalu.

Metody čištění surové vody pomocí látek přírodního původu jsou postupem času více zkoumány a vylepšovány tak, aby bylo dosaženo větší efektivity blížící se účinkům běžně používaných koagulantů.

7 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. *Chemie a technologie vody - Modul M02: Vodárenství: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno, 58 s. Studijní opora. VUT FAST.
- [2] TUHOVČÁK, Ladislav, Pavel ADLER, Tomáš KUČERA a Jaroslav RACLAVSKÝ. *Vodárenství: úprava vody*. Brno, 2006.
- [3] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. *Chemie a technologie vody*. 2., dopl. vyd. Brno: ARDEC, c2006. ISBN 80-860-2050-9.
- [4] PIVOKONSKÝ, Martin. *Tvorba suspenze při úpravě vody: teorie a praxe*. Líbeznice: Medim, 2011. ISBN 978-80-87140-18-5.
- [5] *Zákony pro lidi.cz* [online]. Zlín: AION CS, c2010-2017 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/>
- [6] GRÜNWARD, Alexander. *Vodárenství*. Praha: Český svaz stavebních inženýrů, 1998. Technická knižnice autorizovaného inženýra a technika. ISBN 80-902-4607-9.
- [7] WÜNSCH, Josef a kol. *Technická příručka: Pro pracovníky oboru úprav vody*. Praha: ČKD Dukla, 1981.
- [8] ŽÁČEK, Ladislav. *Chemické a technologické procesy úpravy vod*. Brno: NOEL 2000, 1999. ISBN 80-86020-22-2.
- [9] DOLEJŠ, Petr. Možnosti zlepšení provozu úpraven vody optimalizací dávky koagulantu a pH. In: *Sborník příspěvků XIV. mezinárodní vodohospodářské konference Voda Zlín 2010*. Moravská vodárenská, a. s., 2010, s. 91 – 96.
- [10] BINNIE, Chris., Martin. KIMBER a George. SMETHURST. *Basic water treatment*. 3rd ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2002. ISBN 08-540-4989-4.
- [11] HENDRICKS, David W. *Water treatment unit processes: physical and chemical*. Boca Raton, FL: Taylor, 2005. ISBN 08-247-0695-1.
- [12] ŠTÍCHA, Václav a Atanas G. CUREV. *Vodárenství: Zásobování obyvatelstva, průmyslu a zemědělství vodou*. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1969.
- [13] ŽÁČEK, Ladislav. Polyaluminiumchlorid jako náhrada síranu hlinitého při úpravě vody. *SOVAK*. 1999(07).
- [14] LÁTAL, Milan, Igor TESAŘÍK a Rostislav ZEMAN. *Vybrané statě z vodárenství*. Vyd. 2., přeprac. Brno: Vysoké učení technické, 1989. ISBN 80-214-0019-6.
- [15] BINA, Bijan, Afshin EBRAHIMI a Farid HESAMI. The effectiveness of chitosan as coagulant aid in turbidity removal from water. *International Journal of Environmental Health Engineering* [online]. 2014, 3(1), 8- [cit. 2017-02-21]. DOI: 10.4103/2277-9183.131814. ISSN 2277-9183. Dostupné z: <http://www.ijehe.org/text.asp?2014/3/1/8/131814>
- [16] HASHIM, U., M. WESAM AL-MUFTI, Adamand TIJJANI a Hussein MUDHER A. Plant seeds-potential alternative asnatural coagulant to treat water for turbidity. *Journal of Applied Sciences Research* [online]. 2013, 2013(9), 1067-1073 [cit. 2017-02-22]. ISSN 1819-544X. Dostupné z: http://www.academia.edu/6499825/Plant_seeds-potential_alternative_asnatural_coagulant_to_treat_water_for_turbidity

- [17] LEA, Michael. Bioremediation of Turbid Surface Water Using Seed Extract from the *Moringa oleifera* Lam. (Drumstick) Tree. *Current Protocols in Microbiology* [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2005, 2014, 1G.2.1 [cit. 2017-02-23]. DOI: 10.1002/9780471729259.mc01g02s33. ISBN 9780471729259. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/9780471729259.mc01g02s33>
- [18] MORINGA OLEIFERA Lam. – moringa olejodárná. *BOTANY.CZ* [online]. c2007-2017 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://botany.cz/cs/moringa-oleifera/>
- [19] MALUSARE, C. N. Study of *Moringa oleifera* Extracts in Water Treatment. In: *Baharati Vidyapeeth University: College Of Engineering* [online]. PATKAR - VARDE COLLEGE MUMBAI, 2011 [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: http://www.bvucoepune.edu.in/pdfs/Research%20and%20Publication/Research%20Publications_2010-11/National_Conference_2010-11/Study%20of%20Moringa.pdf
- [20] *Moringa olejodárná (Moringa oleifera)*. *CELOSTATNIMEDICINA.CZ* [online]. c2004-2017 [cit. 2017-04-30]. Dostupné z: <https://www.celostnimedicina.cz/moringa-olejodarna-moringa-oleifeira.htm>
- [21] Forest & Kim Starr. *Moringa (Moringa oleifera) pods*. In: *Feedipedia: Animal feed resources information system* [online]. INRA CIRAD AFZ and FAO, c2012-2016 [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: http://www.feedipedia.org/sites/default/files/images/moringa_pods_02.jpg
- [22] YARAHMADI, M., M. HOSSIENI, M.H. MAHMOUDIAN, A. NAIMABADIE, A. SHAHSAVANI a B. BINA. Application of *Moringa Oleifer* Seed Extract and Polyaluminum Chloride in Water Treatment. *World Applied Sciences Journal 7* [online]. IDOSI Publications, 2009, **2009**(8), 962-967 [cit. 2017-04-08]. ISSN 1818-4952. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Mohammad_Hoseini4/publication/230821224_Application_of_Moringa_Olifer_Seed_extracted_and_polyaluminum_chloride_in_water_treatment/links/0fcfd505038f05aa18000000.pdf
- [23] YUSUF, J., M.B YUAKUBU a A. M BALARABE. The Use of *Moringa Oleifera* Seed As A Coagulant For Domestic Water Purification. *IOSR Journal of Pharmacy and Biological Sciences* [online]. 2015, **10**(1), 6-9 [cit. 2017-04-28]. DOI: 10.9790/3008-10130609. ISSN 2278-3008. Dostupné z: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jpbs/papers/Vol10-issue1/Version-3/C010130609.pdf>
- [24] ADEJUMO, Mumuni, Elizabeth. O. OLORUNTOBA a Mynepalli. K. C. SRIDHAR. USE OF MORINGA OLEIFERA (LAM.) SEED POWDER AS A COAGULANT FOR PURIFICATION OF WATER FROM UNPROTECTED SOURCES IN NIGERIA. In: *European Scientific Journal* [online]. 9. European Scientific Institute, 2013, s. 214-229 [cit. 2017-04-29]. ISSN 1857-7431. Dostupné z: <http://eujournal.org>
- [25] LESKOVJANOVÁ J., DOLJŠ P. Vliv celkové mineralizace vody na vhodnost použití různých typů koagulantů. *Sborník konference Pitná voda 2010*, s. 127 – 132. W&ET Team, Č. Budějovice 2010. ISBN 978-80-254-6854-8
- [26] VAVŘÍKOVÁ, E.; VINŠOVÁ, J.: Chitosan a jeho farmaceutické aplikace. *Chem. listy*, 103, 2009, s. 56–65.

- [27] W. PONTIUS, Frederick. Chitosan as a Drinking Water Treatment Coagulant. *American Journal of Civil Engineering* [online]. 2016, 4(5), 205- [cit. 2017-02-18]. DOI: 10.11648/j.ajce.20160405.11. ISSN 2330-8729. Dostupné z: <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=229>
- [28] YOUNES, Islem a Marguerite RINAUDO. Chitin and Chitosan Preparation from Marine Sources. Structure, Properties and Applications. *Marine Drugs* [online]. 2015, 13(3), 1133-1174 [cit. 2017-02-18]. DOI: 10.3390/md13031133. ISSN 1660-3397. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1660-3397/13/3/1133/>
- [29] BINA, B., M. H. MEHDINEJAD, M. NIKAEEN a H. MOVAHEDIAN ATTAR. EFFECTIVENESS OF CHITOSAN AS NATURAL COAGULANT AID IN TREATING TURBID WATERS. *Iran. J. Environ. Health Sci. Eng.* [online]. 2009, 2009(9), 247-252 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.bioline.org.br/pdf?se09036>
- [30] MAPY.CZ [online]. Seznam.cz, 2015 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <https://mapy.cz>
- [31] Chitosan: from shrimp shells, practical grade. *SIGMA-ALDRICH: A Part of Merck* [online]. Sigma-Aldrich, c2017 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/417963?lang=en&ion=CZ>
- [32] *MERCI: laboratoř jak má být* [online]. Brno: MERCI, c2015 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.mercishop.cz/zbozi/z1230002419155-kolona-michacilovibond-et-740/>
- [33] Modul napájecí s USB rozhraním pro turbidimetr HACH 2100Q01/2100Qis01. *MERCI: laboratoř jak má být* [online]. Brno: MERCI, c2015 [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.mercishop.cz/zbozi/z1940004474008-modul-napajeci-s-usb-rozhranim/>
- [34] PH metr YK-2005WA. *Micronix* [online]. Praha: micronix, c2013 [cit. 2017-03-04]. Dostupné z: <http://eshop.micronix.cz/data/cz/att/002/3932-1984.pdf>
- [35] PIPETY EPPENDORF RESEARCH. *VERKON: společnost pro vaši laboratoř* [online]. Praha: VERKON, c2009-2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/pipety-eppendorf-research/>
- [36] ČSN EN ISO 7027-1 (757343): Kvalita vod – Stanovení zákalu – Část 1: Kvantitativní metody. *NORMY.biz* [online]. Brno: Jiří Hrazdil, c2003-2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/501504>
- [37] Sartorius Basic: Electronic Analytical and precision Balances. *AMERICAN INSTRUMENT EXCHANGE* [online]. Haverhill: American Instrument Exchange, C2017 [cit. 2017-04-19]. Dostupné z: <http://www.americaninstrument.com/pdf/0703B-BALANCE.pdf>
- [38] Chemický slovník. *Chemila: Chemická a mikrobiologická laboratoř č.1273, akreditovaná ČIA* [online]. Hodonín: Chemila, 2017 [cit. 2017-02-22]. Dostupné z: <http://www.chemila.cz/products/chemicky/>
- [39] MALÝ, Josef a Jitka MALÁ. Chemie a technologie vody - Modul M01: *Chemie přírodních a pitných vod: Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia*. Brno, 42 s. Studijní opora. VUT FAST.

-
- [40] Kemwater ProChemie: SÍRAN HLINITÝ tekutý, pro úpravu pitné vody. *KEMWATER: PROCHEMIE* [online]. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.prochemie.cz/chem/tech-list-als-siran-hlinity-tekuty-50.pdf>
- [41] ZELENÝ, Zdeněk. *Možnosti inovace procesu úpravy vody*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, ústav vodního hospodářství obcí. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kučera, Ph.D.

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1 Typy úprav pro jednotlivé kategorie surové vody [5].....	11
Tab. 3.1 Vztah stability a potenciálu [8]	14
Tab. 3.2 Hodnoty k_x pro jednotlivá destabilizační činidla (Polášek a Mutl, 1995) [4].....	19
Tab. 4.1 Výsledné optimální dávky koagulantů a pH testované vody pro odstranění zákalu zjištěné sklenicovou optimalizační zkouškou [27]	30
Tab. 5.1 Klasifikace roztoků podle stupnice pH (při 25 °C).....	38
Tab. 5.2 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky síranu hlinitého	40
Tab. 5.3 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky moringy olejodárné.....	43
Tab. 5.4 Naměřené hodnoty při optimalizaci dávky chitosanu.....	45
Tab. 5.5 Porovnání účinku jednotlivých činidel při odstranění zákalu z povrchové vody	46
Tab. 5.6 Cenové porovnání použitých činidel.....	46

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 3.1 Elektrická dvojrstva [3].....	13
Obr. 3.2 Interakce částic stabilizovaných elektrickou dvojrstvou [4].....	14
Obr. 3.3 Mechanismus destabilizace adsorpcí a nábojovou neutralizací v závislosti na dávce činidla [4]	15
Obr. 3.4 Vlevo tvorba polymerních můstků, vpravo stabilizační efekt při přebytku polymeru [3].....	16
Obr. 3.5 Uspořádání sklenicové optimalizační zkoušky [4]	21
Obr. 4.1 Tobolky moringy olejodárné [21]	26
Obr. 4.2 Chemická struktura chitosanu [30]	29
Obr. 5.1 Letecký snímek s vyznačením odběrného místa [30]	32
Obr. 5.2 Odběrné místo	32
Obr. 5.3 Míchací kolona Lovibond ET 740	35
Obr. 5.4 Přenosný turbidimetr HACH 2100Q is	35
Obr. 5.5 Měřicí přístroj LUTRON YK-2005WA	35
Obr. 5.6 Mikropipeta Eppendorf Research® PLUS.....	36
Obr. 5.7 Teploměr Multi – THERMOMETER.....	36
Obr. 5.8 Analytická váha Sartorius Basic BA 110 S	36
Obr. 5.9 Síran hlinitý – vytvořené vločky po dokončení fáze pomalého míchání.....	39
Obr. 5.10 Síran hlinitý – vločky usazené na dně po 60 minutách sedimentace.....	39
Obr. 5.11 Závislost zákalu na dávce síranu hlinitého	40
Obr. 5.12 Závislost odstranění zákalu na dávce síranu hlinitého.....	40
Obr. 5.13 Použitá semena moringy olejodárné	41
Obr. 5.14 Porcelánová miska s práškem vzniklým po rozdrcení jader semen.....	41
Obr. 5.15 Moringa olejodárná – stav po 30 minutách sedimentace	42
Obr. 5.16 Moringa olejodárná – detailní pohled na vytvořené vločky.....	42
Obr. 5.17 Závislost zákalu na dávce moringy olejodárné	43
Obr. 5.18 Závislost odstranění zákalu na dávce moringy olejodárné	43
Obr. 5.19 Chitosan – vzhled usazených vloček	45
Obr. 5.20 Závislost zákalu na dávce chitosanu	45
Obr. 5.21 Závislost odstranění zákalu na dávce chitosanu.....	46

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A ...	empirický koeficient v rozmezí 4 až 20 [-]
Al% ...	hmotnostní podíl hliníku v síranu hlinitém [%]
Al _m ...	hmotnostní dávka hliníku [mg·l ⁻¹]
B ...	barva [mg·l ⁻¹ Pt]
BSK ₅ ...	biochemická spotřeba kyslíku za 5 dní [mg·l ⁻¹]
C ₀ , C ₅ , C ₆₀ ...	koncentrace sledované složky na začátku sedimentace (v čase t = 0), po 5 minutách sedimentace, po 60 minutách sedimentace [mg·l ⁻¹]
C _{F(0)} , C _{F(60)} ...	koncentrace sledované složky na začátku sedimentace po odstředění a po 60 minutách sedimentace a následném odstředění [mg·l ⁻¹]
COD ...	Chemical Oxygen Demand – chemická spotřeba kyslíku [mg·l ⁻¹]
ČSN EN ISO ...	Česká technická norma, která zavádí do soustavy českých norem evropskou normu identickou s mezinárodní normou ISO
D ...	dávka koagulantu [mg·l ⁻¹]
D _m ...	hmotnostní dávka síranu hlinitého [mg·l ⁻¹]
DOC ...	Dissolved Organic Carbon – rozpuštěný organický uhlík [mg·l ⁻¹]
D _{SH18} ...	dávka destabilizačního činidla Al ₂ (SO ₄) ₃ · 18H ₂ O [mg·l ⁻¹]
D _v ...	objemová dávka síranu hlinitého [ml·l ⁻¹]
FAU ...	Formazin Attenuation Unit – formazinová turbidimetrická jednotka
FNU ...	Formazin Nephelometric Unit – formazinová nefelometrická jednotka zákalu
G ...	střední gradient rychlosti [s ⁻¹]
G _{PAM} ...	gradient pomalého agregačního míchání [s ⁻¹]
G _{RAM} ...	gradient rychlého agregačního míchání [s ⁻¹]
CHSK _{Cr} ...	chemická spotřeba kyslíku – oxidace dichromanem draselným [mg·l ⁻¹]
CHSK _{Mn} ...	chemická spotřeba kyslíku – oxidace manganistanem draselným [mg·l ⁻¹]
k ...	konstanta závislá na viskozitě prostředí a poloměru částic
KNK _{4,5} ...	kyselinová neutralizační kapacita do pH 4,5 [mmol·l ⁻¹]
K _v ...	iontový součin vody [-]
k _x ...	přepočítávací koeficient pro jednotlivá destabilizační činidla [-]
LCD ...	displej z tekutých krystalů
LED ...	světlo vyzařující dioda
m ...	KNK _{4,5} [mmol·l ⁻¹]
N ...	počet částic v době t [-]
N ₀ ...	počet částic v čase 0 [-]
NTU ...	Nephelometric Turbidity Unit – nefelometrická jednotka zákalu

ORP ...	oxidačně redukční potenciál
P ...	výkon míchadla [$J \cdot s^{-1}$]
pH ...	vodíkový exponent [-]
PVC ...	polyvinylchlorid
rpm ...	otáčky za minutu
t ...	čas [s]
T ...	termodynamická teplota [K]
t_0, t_5, t_{60} ...	čas sedimentace na začátku, po 5 minutách, po 60 minutách [min]
TDS ...	Total Dissolved Solids – celkové množství rozpuštěných pevných látek [$mg \cdot l^{-1}$]
TOC ...	Total Organic Carbon – celkový organický uhlík [$mg \cdot l^{-1}$]
t_{PAM} ...	čas pomalého agregačního míchání [min]
t_{RAM} ...	čas rychlého agregačního míchání [min]
USA ...	Spojené státy americké
USEPA ...	United States Environmental Protection Agency (Agentura pro ochranu životního prostředí)
UV ...	ultrafialové
V ...	objem vložkovací nádrže [m^3]
WHO ...	World Health Organization (Světová zdravotnická organizace)
μ ...	dynamická viskozita [$Pa \cdot s$]
ρ ...	objemová hmotnost síranu hlinitého [$g \cdot cm^{-3}$]
ZFn ...	formazinová nefelometrická jednotka
ZFt ...	formazinová turbidimetrická jednotka

SUMMARY

This bachelor's thesis deals with the use of alternative coagulants in water treatment.

The most widely used coagulants in water treatment are inorganic aluminium or iron salts. These coagulants have several disadvantages including large chemical dosages required for treating eutrophic waters, large sludge production, and toxic effects on the aquatic environment.

There is an effort to replace common coagulants with more eco-friendly ones. Recently, the biodegradable polymer chitosan is often discussed.

Developing countries are facing potable water supply problems, because local people cannot afford conventional coagulants. *Moringa oleifera* seeds have been recommended for domestic water treatment in rural areas of Africa and Asia. This natural coagulant can remove turbidity and bacteria from surface water.

Several sets of the jar test were performed in order to investigate the efficiency of aluminium sulfate, *moringa oleifera* and chitosan on the removal of turbidity from water.

Coagulation experiments were conducted on a model turbid water from Svratka river. The tested water temperature was 18,2 °C, pH was adjusted to 7,5. The initial turbidity was 8,92 ZF (NTU).

The highest turbidity removal efficiency was 94,84 % for aluminium sulfate. The optimum dose 150,7 mg·l⁻¹ reduced turbidity to 0,46 ZF. Water treatment using aluminium sulfate as coagulant is the cheapest in comparison with *moringa oleifera* seeds and chitosan.

Moringa oleifera achieved the second best residual turbidity level of 1,60 ZF (82,04 % reduced). The optimum dose of seed powder was 164,6 mg·l⁻¹. This natural coagulant is more suitable for treatment of high turbidity surface water.

The optimum dosage of chitosan for turbidity removal has been found to be only 0,8 mg·l⁻¹ with percentage removal 80,66 %. The final turbidity was 1,73 ZF. Using chitosan as a coagulant aid can reduce the required amount of main coagulant. This natural polyelectrolyte can also enhance the removal turbidity efficiency. By using natural coagulants, considerable savings in chemicals and sludge handling cost may be achieved.

All applied coagulants demonstrated promising performance in turbidity removal from water.