

# Analiza mogućih tehnoloških rješenja za slučajeve iznenadnih povišenih mutnoća u vodi krških izvorišta u Hrvatskoj

---

**Kolesar, Nino**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2010**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:089645>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ANALIZA MOGUĆIH TEHNOLOŠKIH RJEŠENJA ZA SLUČAJEVE  
IZNENADNIH POVIŠENIH MUTNOĆA U VODI KRŠKIH  
IZVORIŠTA U HRVATSKOJ

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. SLAVEN DOBROVIĆ

Student:

NINO KOLESAR

ZAGREB, 2010.

## IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, svojim znanjem te uz pomoć navedene literature. Zahvaljujem se mentoru doc. dr. sc. Slavenu Dobroviću na savjetima i pomoći u realizaciji ovog rada.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nino Kolesar**

Mat. br.: 0035158970

Naslov: **Analiza mogućih tehnoloških rješenja za slučajeve iznenadnih povišenih mutnoća u vodi krških izvorišta u Hrvatskoj**

Opis zadatka:

Mnoga krška izvorišta vode u Hrvatskoj karakterizira pojava povišenih mutnoća, odnosno povišenog sadržaja suspendiranih tvari za vrijeme intenzivnijih padalina u slivnom području. S obzirom da se ovakva izvorišta često koriste za vodoopskrbne svrhe, ove pojave stvaraju brojne poteškoće među kojima su najvažnije nemogućnost poštivanja Pravilnika o zdravstvenoj ispravnosti vode za piće i onečišćenje vodoopskrbne mreže.

Za nekoliko vrsta zamućenih voda potrebno je na laboratorijskom uređaju analizirati učinkovitost sljedećih tehnoloških postupaka:

- izravna filtracija,
- koagulacija – flokulacija – filtracija,
- koagulacija – flokulacija – taloženje.

Učinkovitost postupka pratiti kroz mutnoću i sadržaj suspendiranih tvari.

Dobivene rezultate treba grafički prikazati, u raspravi analizirati, a najvažnija saznanja donijeti u zaključku.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. prosinca 2009.

Rok predaje rada:


Prosinac 2010.

Zadatak zadao:



Doc. dr. sc. Slaven Dobrović

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr./sc. Zvonimir Guzović

## SAŽETAK

Ovaj rad obuhvaća analizu tehnoloških rješenja za slučajeve iznenadnih povišenih mutnoća u vodi krških izvorišta u Hrvatskoj. Analiza je obuhvaćala mjerenje parametara vode prije te nakon različitih postupaka predobrade i to za uzorke voda; Drava, Sava, Ponikva i Jezero Krk. Analizirana su sljedeća tehnološka rješenja: izravna filtracija, koagulacija i flokulacija s naknadnom filtracijom, koagulacija i flokulacija s naknadnim taloženjem i filtracijom. Parametri mjereni za svaki uzorak vode bili su; mutnoća, ukupni sadržaj suspendiranih tvari i SDI indeks. Na uzorku vode Save radili smo tri ponovljena postupka mjerenja i predobrade zbog određivanja srednje vrijednosti, standardne i relativne standardne pogreške. Rezultati mjerenja parametara prikazani su tablično i grafički. U okviru analize rezultata uspoređena su tehnološka rješenja za pojedine vrste vode te su doneseni određeni zaključci.

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. TEORIJSKA OSNOVA</b> .....	2
2.1. KOAGULACIJA I FLOKULACIJA .....	3
2.2. FILTRACIJA .....	9
2.3. TALOŽENJE .....	11
<b>3. LABORATORIJSKI RAD</b> .....	13
3.1. OPIS MJERNIH UREĐAJA, POSTUPAKA I MATERIJALA .....	13
3.1.1. Mutnoća .....	13
3.1.2. Suspendirane tvari .....	15
3.1.3. Mjerenje indeksa gustoće mutnoće (SDI) .....	18
3.2. TEHNOLOŠKI POSTUPCI .....	19
3.2.1. Izravna filtracija .....	19
3.2.2. Koagulacija flokulacija, filtracija .....	21
3.2.3. Koagulacija flokulacija, taloženje, filtracija .....	24
3.4. OPIS LABORATORIJSKOG RADA .....	25
<b>4. REZULTATI MJERENJA</b> .....	26
4.1. MJERENJE MUTNOĆE .....	26
4.2. MJERENJE UKUPNOG SADRŽAJA SUSPENDIRANIH TVARI .....	27
4.3. MJERENJE SDI INDEKSA .....	28
4.4. KVALITETA SIROVE VODE .....	30
4.5. IZRAVNA FILTRACIJA .....	30
4.6. KOAGULACIJA FLOKULACIJA, FILTRACIJA .....	31
4.7. KOAGULACIJA FLOKULACIJA, TALOŽENJE, FILTRACIJA .....	31
<b>5. ANALIZA REZULTATA</b> .....	32
5.1. USPJEŠNOST UKLANJANJA SUSPENDIRANIH TVARI IZRAVNOM .....	32
FILTRACIJOM .....	32
5.2. UTJECAJ UVOĐENJA KOAGULACIJE FLOKULACIJE, FILTRACIJE .....	32
5.3. UTJECAJ UVOĐENJA KOAGULACIJE FLOKULACIJE, TALOŽENJA, .....	34
FILTRACIJE .....	34
5.4.1. Mjerni parametar mutnoća .....	37
5.4.2. Mjerni parametar suspendirane tvari .....	38
<b>7. ZAKLJUČAK</b> .....	40
<b>8. POPIS LITERATURE</b> .....	42

Slika 1. Prikaz odvijanja koagulacije i flokulacije [1] .....	3
Slika 2. Prikaz zeta potencijala (nV) vode u bari i koagulacijskog taloga [1] .....	4
Slika 3. Mikroskopski prikazi tipičnog tretiranja flokula vode.....	6
Slika 4. Korelacija između zeta potencijala i uspješnosti uklanjanja čestica nečistoće kaolina,9	
Slika 5. Turbidimetar 2100P .....	14
Slika 6. Turbidimetar 2100AN.....	14
Slika 7. Stavljanje membrane u petrijevku.....	16
Slika 8. Filtracija uzorka vode kroz membranu uz pomoć vakuum pumpe.....	16
Slika 9. Eksikator sa uzorcima u petrijevkama .....	17
Slika 10. Višeslojni gravitacijski filter .....	21
Slika 11. JAR tester (bez taloženja- lijeve dvije posude; flokulacija sa 100 uL FeCl <sub>3</sub> .....	23
Slika 12. Eppendorf pipeta 100-1000 uL .....	23
Slika 13. Eppendorf pipeta 1-10 mL .....	23
Slika 14. JAR tester (taloženje – lijeve dvije posude; flokulacija sa 100 uL FeCl <sub>3</sub> .....	24
Slika 15. Uklanjanje suspendiranih tvari izravnom filtracijom.....	32
Slika 16. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, filtracijom.....	32
Slika 17. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, filtracijom.....	33
Slika 18. Utjecaj povećanja doze na mutnoću i suspendirane tvari .....	33
Slika 19. Utjecaj uvođenja koagulacije flokulacije, filtracije u odnosu na izravnu filtraciju ..	34
Slika 20. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, taloženjem, filtracijom	34
Slika 21. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, taloženjem, filtracijom	35
Slika 22. Utjecaj povećanja doze na mutnoću i suspendirane tvari .....	35
Slika 23. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na izravnu filtraciju.....	36
Slika 24. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju-filtraciju.....	36
Slika 25. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju-filtraciju.....	37
Slika 26. Smanjenje mutnoće ovisno o uzorku .....	37
Slika 27. Smanjenje mutnoće ovisno o postupku.....	38
Slika 28. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o uzorku .....	38
Slika 29. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o postupku .....	39

Tablica 1. Uobičajeni anorganski koagulantni upotrebljavani u pročišćavanju vode [1.].....	5
Tablica 2. Uzorci za ponovljivost rezultata mjerenja.....	14
Tablica 3. Uzorci za ponovljivost rezultata mjerenja.....	17
Tablica 4. Uzorci vode .....	25
Tablica 5. Mutnoća sirove vode .....	26
Tablica 6. Mutnoća nakon izravne filtracije.....	26
Tablica 7. Mutnoća nakon koagulacije flokulacije, filtracije.....	26
Tablica 8. Mutnoća nakon koagulacije flokulacije taloženja, filtracije .....	27
Tablica 9. Sadržaj suspendiranih tvari sirove vode.....	27
Tablica 10. Sadržaj suspendiranih tvari nakon filtracije .....	27
Tablica 11. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije flokulacije, filtracije.....	28
Tablica 12. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije ...	28
Tablica 13. SDI indeks sirovih voda .....	28
Tablica 14. SDI indeks nakon filtracije.....	29
Tablica 15. SDI indeks nakon koagulacije flokulacije, filtracije .....	29
Tablica 16. SDI indeks nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije.....	29
Tablica 17. Kvaliteta sirove vode.....	30
Tablica 18. Svojstva vode nakon izravne filtracije .....	30
Tablica 19. Svojstva vode nakon koagulacije flokulacije, filtracije.....	31
Tablica 20. Svojstva vode nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije .....	31



## **1.UVOD**

U mnogim gradovima i naseljima širom Republike Hrvatske često se pojavljuje problem povišenja mutnoće u izvorištu na kojem se temelji vodoopskrba. Ovo zamućenje čine dispergirane čestice u rasponu veličina od 0,1 do nekoliko tisuća  $\mu\text{m}$ , vrlo raznolikog sastava. Najčešći uzrok pojave povišenih mutnoća su vremenske prilike, odnosno pojačane padaline u kratkom vremenskom razdoblju na slivnom području izvorišta. Posljedica je pogoršanje kvalitete vode izvorišta i nemogućnost poštivanja pravilnika o zdravstvenoj ispravnosti pitke vode (NN 47/08) bez dodatne obrade. Iz toga proizlazi nužnost uvođenja obrade vode prije distribucije potrošačima za mnoga izvorišta vode. S obzirom da je svaka voda u prirodi jedinstvena, najbolji način za određivanje optimalnog rješenja je laboratorijski rad s predmetnom vodom. U ovom radu dana je analiza mogućih tehnoloških rješenja za slučajeve iznenadnih povišenih mutnoća sljedećih tehnoloških postupaka: 1/ izravna filtracija, 2/ koagulacija-flokulacija-filtracija i 3/ koagulacija-flokulacija-taloženje-filtracija.

## 2. TEORIJSKA OSNOVA

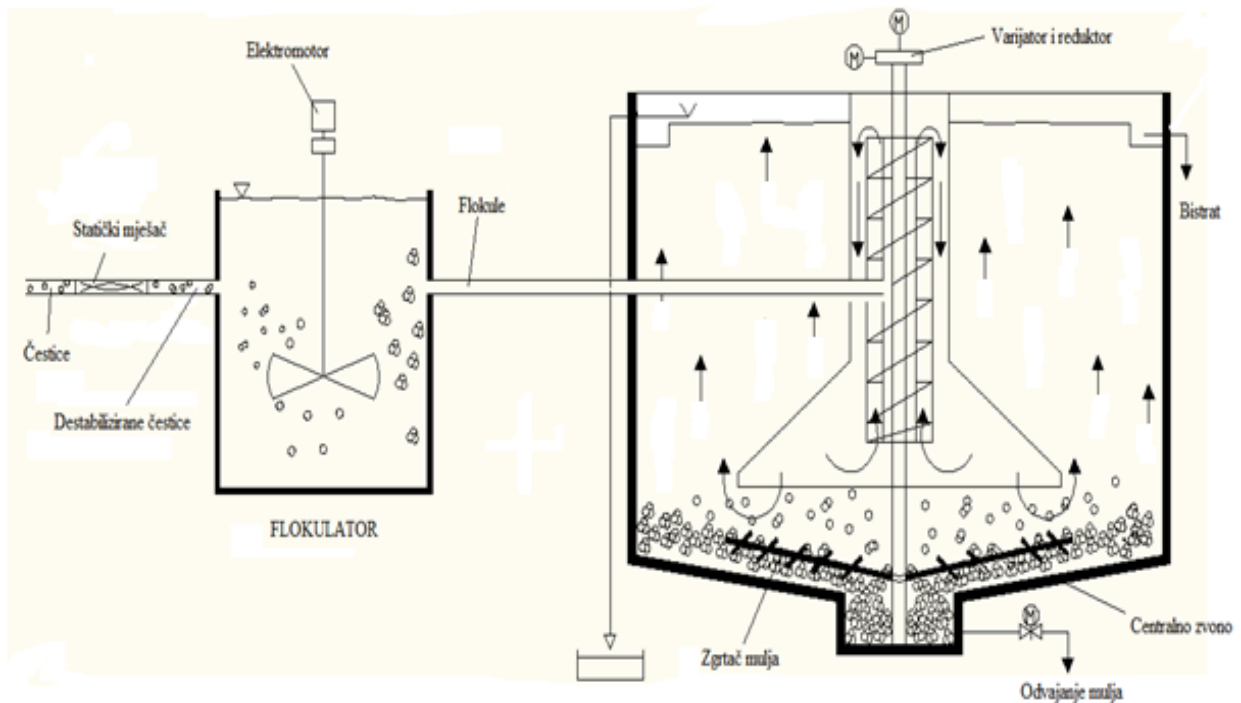
Rješenja problema zamućenosti:

- koagulacija i flokulacija – provodi se kemijskim sredstvima čime se djeluje na granice faza čestica te time pospješujemo povećanje njihovih veličina i taloženje - nužno je kad god postoji naboj
- filtracija – efikasnost je uvjetovana veličinom čestica i vrstom filtracijske ispune, odvija se u odgovarajućim filtrima
- taloženje – efikasnost je uvjetovana veličinom i gustoćom čestica brzinom taloženja, odvija se u odgovarajućim taložnicima

<b>R A S P O N V E L I Č I N A P R I R O D N I H N E Č I S T O Ć A</b>				
<b>Grube disperzije anorganskog i organskog porijekla</b>	<b>Koloidne disperzije</b>		<b>Molekularne disperzije</b>	<b>Plinovi</b>
10 - 10 <sup>-3</sup> mm	<u>Organske</u> Huminske tvari 10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-5</sup> mm	<u>Anorganske</u> Gline, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> 10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-5</sup> mm	Otopljene soli – ioni 10 <sup>-6</sup> - 10 <sup>-7</sup> mm	CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, CH <sub>4</sub>
<b>T E H N O L O Š K I P O S T U P C I P R I P R E M E V O D E</b>				
ZADRŽAVANJE NA SITIMA SEDIMENTACIJA CENTRIFUGALNA SEPARACIJA	FLOKULACIJA I KOAGULACIJA SEDIMENTACIJA FILTRACIJA MEMBRANSKI POSTUPCI OKSIDACIJSKI POSTUPCI	IONSKA IZMJENA MEMBRANSKI POSTUPCI	RAZNI POSTUPCI OTPLINJAVANJA	

## 2.1. KOAGULACIJA I FLOKULACIJA

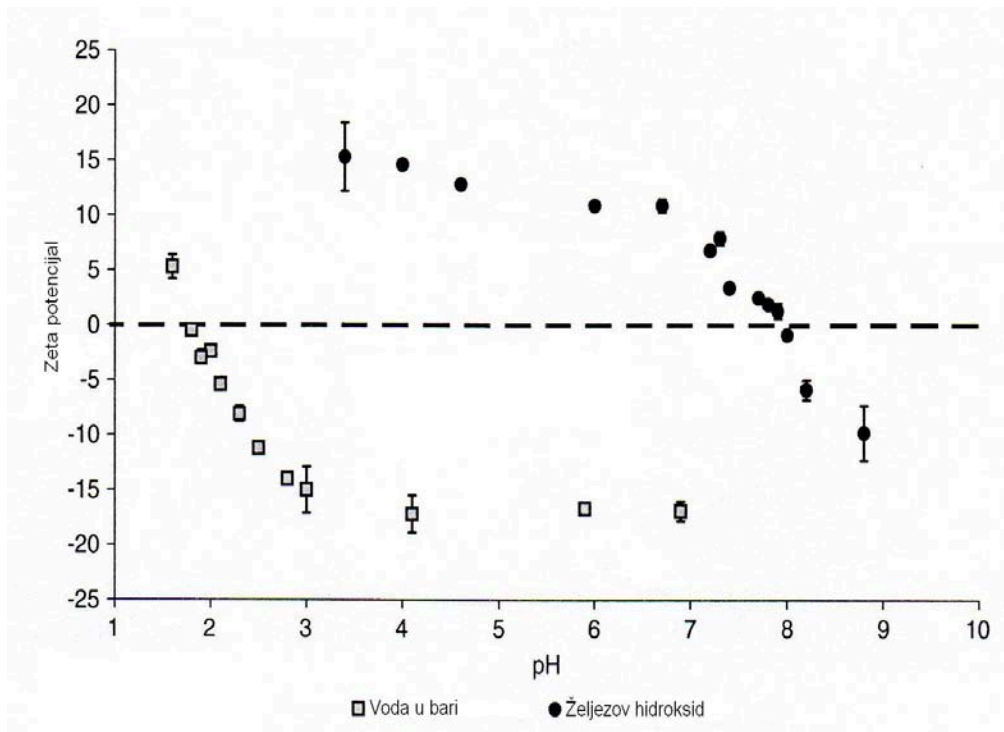
Submikronske čestice koje uzrokuju zamućenost u vodi su koloidalne ( $10^{-3} - 10^{-5}$  mm), tj. one nose naboj površine zbog kojeg se odbijaju pa se ne mogu skupiti u veće čestice, koje bi bilo jednostavnije ukloniti u bilo kojem procesu pročišćavanja (Slika 1.).



Slika 1. Prikaz odvijanja koagulacije i flokulacije [1]

Taj naboj je skoro stalno negativan i tamo je kao posljedica brojnih mehanizama, najvažnijeg ionizacije funkcionalnih skupina, karboksilnih skupina na primjer, na površini čvrstih, i kao drugo apsorpcija iona ili drugih nabijenih vrsta poput polimera na površini. Važnija karakteristika je elektronski naboj na površini ravne plohe koji se zove zeta potencijal (Većina prirodnih koloida u vodi stječe zeta potencijal između -5 i -40 mV djelomično zbog prisutnosti nabijenih skupina poput karboksilnih kiselina i oksida. Kao posljedica ovih skupina, zeta potencijal je ovisan o pH i općenito govoreći kako se pH smanjuje, naboj na površini se povećava prema nuli. pH kod kojeg je zeta potencijal nula zove se izo-električna točka (i.e.t.) čestice i važan je parametar u razumijevanju prirode koloidnih čestica.

Kiselinske skupine, poput karboksilne skupine koja izaziva znatne promjene u naboju alga i prirodnim organskim tvarima, disociraju se kod niske pH vrijednosti i stoga imaju zeta potencijal koji ostaje prilično stabilan u neutralnim i uobičajenim uvjetima. Suprotno tome, oksidi su amfoterični pa koloidne gline imaju zeta potencijal koji varira i preko kiselinskih i običnih pH vrijednosti. Hidroksid željeza je na primjer pozitivno nabijen u kiselim vodama i negativno nabijen u lužnatim vodama (Slika 2.).



Slika 2. Prikaz zeta potencijala (nV) vode u bari i koagulacijskog taloga [1]

## KOAGULACIJA

Da bi uklonili te stabilne čestice iz vode, potrebno je neutralizirati negativni naboj. Postoje brojni načini destabilizacije tih čestica, ali tretiranju vode najviše odgovaraju oni koji se oslanjaju na dodavanje kemikalije koagulant. To su tipične soli metala poput željezo i aluminij sulfata (Tablica 1.).

Kemikalija	Uobičajeno ime	Formula	Molekulska masa	% metal iona	Oblik	pH
Željezo sulfat	Željezni sulfat	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	400	14	tekućina	
Željezo klorid	Željezni klorid	$\text{FeCl}_3$	162	14	tekućina	
Aluminij sulfat	stipsa	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	594	17-18% kao $\text{Al}_2\text{O}_3$	bijelo sivi prah	2.7
				8% kao $\text{Al}_2\text{O}_3$	bistra tekućina	3.5
Polialuminij klorid	PACL	$\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$	n/a	12.4	Bistra tekućina	4.2

Tablica 1. Uobičajeni anorganski kogulanti upotrebljavani u pročišćavanju vode [1]

Postoje brojni mehanizmi destabilizacije koloida:

- a) kompresija difuznog sloja
- b) adsorpcija kojom se neutralizira naboj
- c) ugrađivanje u talog (sweep flokulacija)
- d) adsorpcija koja omogućava međučestično premošćivanje.

Koagulant koji se odabere, njegovo doziranje i kvaliteta vode određuju mehanizam. Na primjer, adsorpcija kojom se neutralizira naboj je dominantni način uklanjanja za vode koje sadrže prirodne organske tvari ili alge, dok je za manju zamućenost prikladnija sweep flokulacija.

Kada se vodi dodaju koagulanti, pojavi se niz složenih reakcija hidrolize. Koagulanti sadrže  $\text{Al}^{3+}$  ili  $\text{Fe}^{3+}$  koji su jako nabijeni suprotni-ioni, za većinu čestica te vrste postoje pod uvjetima kiseline (niski pH). Kod normalne vode pH tih iona reagiraju i daju različite produkte hidrolize poput  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$  i  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{12}^{7+}$  („ $\text{Al}_{13}$ “ polimer), koji može jako apsorbirati na negativnim česticama i tako reducirati naboj čestica na taj način. U većini slučajeva, taloženje netopivih hidroksida,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  i  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  također se pojavljuje. Taloženje hidroksida također igra ključnu ulogu u primjenjivoj flokulaciji. Veći broj koloidnih hidroksilnih čestica se proizvodi i flokulira, te oblikuju želatinaste flokove koji uhvate većinu prvobitnih čestica u vodi. To je način sweep flokulacije i vrlo je važan kada je koncentracija čestica prilično niska (tj. za slabu zamućenost vode). Pod tim uvjetima količina kolizije čestica je niska i stoga će

flokulacija, čak za potpuno destabilizirane čestice, biti spora. Formiranje novih čestica (hidroksid taloga) značajno povećava brzinu flokulacije. Neutralizacija naboja stabilnih čestica je brza i može biti postignuta pri prilično niskim dozama koagulanta, ali doziranje treba biti proporcionalno koncentraciji onečišćenja. Sweep flokulacija se treba koristiti pri višim dozama i puno je sporija, ali potrebna doza ne bi trebala jako ovisiti o koncentraciji čestica.

Gore prikazani različiti mehanizmi doveli su do definiranja četiri zone doziranja koagulanta, sa slijedećim posljedicama za negativno nabijene čestice:

Zona 1: Vrlo nisko doziran koagulant; čestice su još negativne i stoga stabilne.

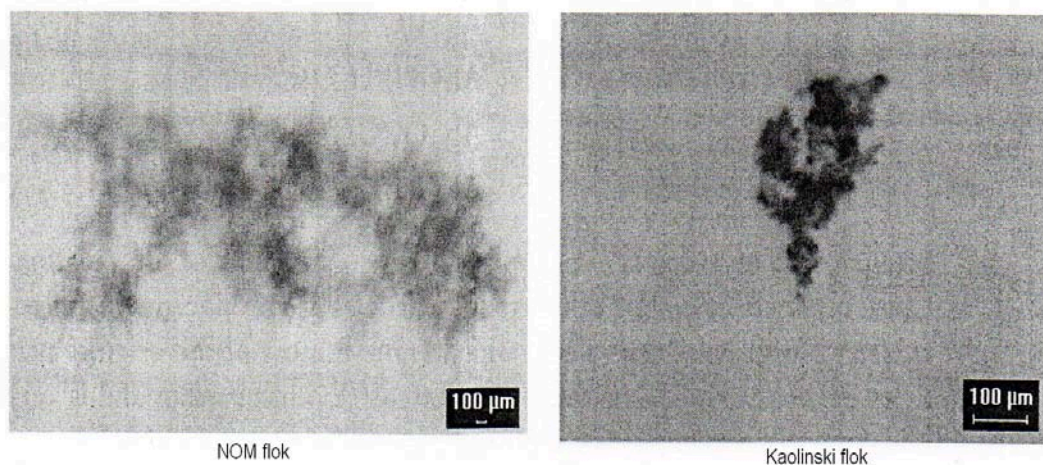
Zona 2: Doziranje je dovoljno da neutralizira naboj, a stoga i koagulant.

Zona 3: Više doziranje neutralizira naboj i restabilizira.

Zona 4: Još uvijek više doziranje daje hidroksidu taloženje i sweep flokulaciju.

## FLOKULACIJA

Jednom kada se doda koagulant, čestice ubrzo postanu destabilizirane. To vodi formaciji nestabilnih mikro-flokova koji se rangiraju od 1 do oko 10  $\mu\text{m}$ . Rast flokula pojavljuje se zbog kolizije s ostalim flokulama dok se ne dosegne stabilno stanje distribucije flokule. Te kolizije također mogu voditi do raspada flokula. Slika 3. prikazuje kako se flokule formiraju za vrijeme koagulacije prirodnih organskih tvari i kaolinske gline.



Slika 3. Mikroskopski prikazi tipičnog tretiranja flokula vode

Aglomeracija koloidnih čestica u flokule pojavljuje se kao rezultat brojnih osnovnih koraka koji se mogu skratiti na dva mehanička događaja:

- a) čestice moraju kolizirati jedne s drugima bilo pomoću prisiljenog ili slobodnog kretanja (*kolizija / transport*)
- b) čestice tada moraju prijanjati jedne uz druge i ostati kao samostalna skupina čestica (*spajanje*).

Ta dva događaja na mnogo se načina, koji se obično odnose na transport i spajanje, svaki pojedinačno mogu smatrati kao neovisne radnje i moraju se posebno tretirati. U čestici je raspon koloidnih interakcija vrlo kratak, obično primjetno manji od veličine čestica. Stoga korak transporta; dvije čestice mora dovesti blizu od relativno velike duljine odvojenosti preko koje sile koloidne interakcije ne vrše nikakav utjecaj.

Najuobičajenija metoda analize koraka transporta aglomeracijskog procesa prvi put je predstavio Smoluchowski 1917. godine. U njegovom pristupu sistem je opisan terminima procesa brzine drugog reda gdje je brzina kolizije proporcionalna umnošku koncentracija dviju koloidnih vrsta. Zbog pojednostavljenja se pretpostavlja da su čestice identične i stoga je kvadrat koncentracije ( $N^2 = n_i n_j$ ). Svaki put kad dvije čestice kolidiraju da bi oblikovale aglomerat, postoji gubitak naboja *jedne* čestice i brzina flokulacije se može napisati kao brzina smanjenja koncentracije čestica (broja):

$$- (dN/dt) = \alpha k_F N^2 \quad [1.]$$

gdje je  $N$  broj koncentracije čestica,  $\alpha$  je *faktor korisnosti kolizije* (dio kolizije koji vodi aglomeraciji) a  $k_F$  je koeficijent brzine flokulacije. Točna veličina konstante brzine ovisi o kontrolnim mehanizmima. U praktičnim situacijama postoje tri značajna mehanizma:

- a) perikinetička flokulacija (difuzija)
- b) ortokinetička flokulacija (kontakti koji su rezultat gibanja mase fluida)
- c) diferencijalna sedimentacija.

Potpuni dizajn procesa koagulacije uključuje razmatranja; destabilizacije i prijenosa čestica. Destabilizacija se određuje i procjenjuje jar testom, dakle eksperimentalno se određuje vrsta i

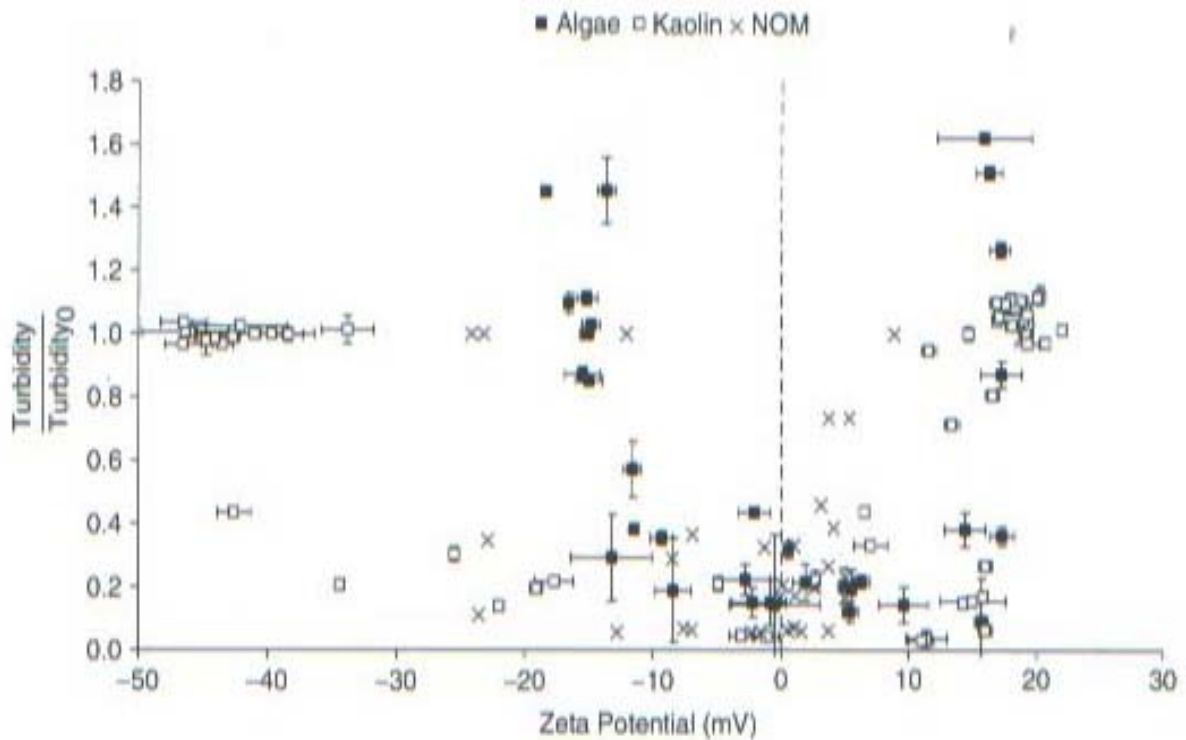
doza koagulanta, dok se konstrukcijski dizajn te hidraulička ili mehanička oprema temelji na Smoluchovskoj teoriji ili nekoj drugoj teoriji ortokinetičke flokulacije. Uređaji za flokulaciju (bazeni) dizajnirani su tako da omogućuju kontakte između čestica, koji su općenito izazvani ortokinetičkom flokulacijom, što znači da se koloidne čestice sudaraju međusobno zbog gradijenta brzine koji je stvoren unutar fluida hidrauličkim ili mehaničkim načinom. Dizajn uključuje izbor gradijenta brzine, oblik reaktora i vrijeme zadržavanja potrebno da se stvore agregati veličine pogodne za uklanjanje suspenzije u sljedećem koraku, tj. u sljedećoj jedinici (taložnik, vakuum filter, centrifuga, pješčani filter ili uređaj za sušenje).

## PRIMJENA

Koagulacija i flokulacija upotrebljavaju se kao ključni proces za uklanjanje suspendiranih čestica i rastopljenih anorganskih i organskih onečišćivača. Opseg nakupina onečišćenja varira od izvora do izvora. Na primjer, voda koja dolazi iz rijeka može imati visoku količinu suspendiranih glinenih koloida, dok u gorskim krajevima, područja s tresetom općenito dominiraju u NOM-u. Alge su prisutne u svim izvorskim vodama, iako se obilje razlikuje i ovisi o mjeri eutrofikacije. Rast sezonski algi može značajno ometati proces koji je optimiziran bilo za glinene ili NOM sisteme. Ovo obično rezultira povećanom uporabom koagulanta i čepljenjem filtera. Proces koagulacije je obično optimaliziran za određeni sistem u uvjetima doze koagulanta i pH, postignutog kroz niz jar testiranja.

Henderson *et. al.* (2005.) je otkrio da su operacijski dometi različiti oviseći o onečišćivaču koji se uklanja. NOM je uspješno uklonjen između -10 mV i +5 mV, dok je veza zeta potencijala za kaolin bila puno šira kod -20 mV do +5 mV. Alge su imale optimalno simetričko uklanjanje nakupina od -12 mV do +12 mV, što je više ličilo na uklanjanje veze za NOM nego za kaolin. To ukazuje da se organske čestice puno više oslanjaju na neutralizaciju naboja za uklanjanje nego na anorganske čestice. Optimalni uvjeti za organske čestice trebaju nizak pH (~pH 5-6) gdje je dominantni mehanizam uklanjanja neutralizacija naboja. Međutim, za anorganske čestice koagulacija se odvija kod pH 7. Kod ovog pH, ne samo da bi se neutralizacija naboja pojavila do tog stupnja, smatrajući da je rezultat fizičke adsorpcije kationskog amorfnoh hidroksida na površinu anorganske čestice (Duan & Gregory, 2003.), ali sweep flokulacija bi se također pojavila i povećala gustoće flokula.





Slika 4. Korelacija između zeta potencijala i uspješnosti uklanjanja čestica nečistoće kaolina, algi i NOM [1]

## 2.2. FILTRACIJA

Filtracija je proces propuštanja vode kroz poroznu sredinu – filtarski materijal. Primjenjuje se za uklanjanje koloidnih čestica koje su nakon procesa taloženja preostale u vodi, naročito najsitniji koloidi koji se nisu uspjeli slijepiti u flokule, već su prosljedili tokom vode dalje. Kod procjeđivanja će i te čestice zaostati u kontaktu s filtarskim materijalom. U vodovodnoj se praksi kao osnovni filtarski materijal primjenjuje kvarcni pijesak. Ova vrsta pijeska sadrži silicijev dioksid,  $\text{SiO}_2$ , koji vrlo povoljno neutralizira preostale potencijalne sile koloida zaostalih u vodi nakon procesa taloženja. Na procjeđivanje se dovodi vodu s mutnoćom do 8 (iznimno 16) [°NTU], jer bi veća mutnoća izazvala prebrzo onečišćenje filtarskog materijala, odnosno potrebu njegovog vrlo čestog pranja (čišćenja).

Filtracija je složen proces koji objedinjuje:

- a) mehaničko djelovanje, koje se sastoji u odstranjivanju čestica većih od pora filtarskog materijala,

- b) adhezijsko djelovanje, koje se ogleda u prijanjanju čestica na površini filtarskog materijala,
- c) adsorpcijsko djelovanje, koje se očituje u pripijanju (na površini filtarskog materijala) koje s vodom prodiru u poroznu sredinu,
- d) taložno djelovanje, koje se sastoji u gravitacijskom izdvajanju čestica koje s vodom prodiru u unutrašnjost filtarskog materijala,
- e) kemijsko djelovanje, koje se očituje u rastavljanju (disociranju) muteži na sitnije dijelove ili u njenom pretvaranju u netopivu masu koja se potom uklanja iz vode,
- f) biološko djelovanje, koje se ogleda u stvaranju *biološke opne* ili *prevlake (filma, membrane)* od mikroorganizama.

Proces filtracije se odvija u posebnim objektima – filtrima.

Ovisno o načinu kretanja vode kroz filtarski materijal, filtri se dijele na:

- a) gravitacijske filtre - su otvoreni spremnici u kojima se iznad filtarskog sloja nalazi voda sa slobodnim vodnim licem. Filtracija nastaje zbog djelovanja sile teže pri visinskoj razlici dovoda i odvoda vode na filtru.
- b) tlačne filtre - su zatvoreni (čelični) cilindrični spremnici u koje se voda dovodi pod tlakom. Procjeđivanje nastaje zbog razlike tlaka na dovodu i odvodu vode.
- c) vakuumske filtre - su vrsta filtera kod kojih na odvodu vlada potlak.

Kod kondicioniranja vode, naročito ako se radi o uređajima većih kapaciteta, najčešće se primjenjuju gravitacijski procjeđivači.

### 2.3. TALOŽENJE

Čestice se mogu slegnuti na četiri prilično različita načina oviseći o relativnoj tendenciji čestica da aglomeriraju dok se talože. Kod solidno niskih koncentracija, tipično manje od 500-1000 mg l<sup>-1</sup>, taloženje se pojavljuje bez interferiranja od strane susjednih čestica. Kako se koncentracija povećava, utjecaj susjednih čestica povećava brzinu taloženja. . Kako se koncentracija čestica nadalje povećava, proces se mijenja od razbistravanja do sprječavanja taloženja i zguščivanja. Kako se određena čestica taloži, tako će ubrzati pod gravitacijom, dok uzgonska sila na čestici izjednači njenu silu težu. Na ovom dijelu čestica pada pod konstantnom brzinom koja se zove brzina taloženja. Točan izraz za brzinu terminalnog taloženja ovisi o režimu toka oko čestice kako se taloži. Međutim, u većini slučajeva u obradi pitke vode čestice padaju u laminarno polje toka ( $Re < 0,1$ ) i izraz postaje poznat kao Stokesov zakon:

$$v = \frac{2 d^2 (\rho_c - \rho) g}{9 \eta}$$

$v$  - brzina taloženja [m/s]

$\rho_c$  - gustoća koloidne čestice [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho$  - gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

$r$  - promjer čestice [m]

$\eta$  - dinamički viskozitet [Pas]

Gornji izraz prikazuje važnost gustoće i viskoziteta vode kod taloženja čestica. Ključni problemi odnose se na temperaturu koja ima dramatičan utjecaj na viskozitet vode takav da se čestice brže talože u toplijoj vodi tako da je moguće da se brzina udvostručuje između ljeta i zime. Brzina taloženja flokula je komplicirana ako nisu idealne sfere pri čemu se onda brzina taloženja mijenja kao funkcija veličina, strukture i gustoće. Tipične brzine taloženja se obično spominju u odnosu s pijeskom zbog njegovih nepromjenjivih svojstava i raspoloživosti. Tipični brzine taloženja pijeska (specifična težina 2,65) su 100 mm s<sup>-1</sup>, 8 mm s<sup>-1</sup> i 0,154 mm s<sup>-1</sup> za čestice veličine 1000 μm, 100 μm, 10 μm. Normalno tretirane flokule u procesu sedimentacije uključuju NOM i mutnoću temeljnu na aglomeratima. Tipična brzina taloženja veličina vjerojatno će se formirati između 0,2 i 1 mm s<sup>-1</sup> za NOM te 0,5 i 2,5 mm s<sup>-1</sup> za mutnoćom temeljenom aglomeratima.

Proces taloženja odvija se u posebnim objektima (bazenima) – taložnicima. Danas se u praksi kondicioniranja vode primjenjuju dvije osnovne vrste taložnika, ovisno od smjera toka u njima:

- a) horizontalni taložnici (pravokutni, radijalni)
- b) vertikalni taložnici (pravokutni, radijalni)
- c) taloženje u posebnim (specijalnim) taložnicima (cijevni i pločasti (lamelni), taložnici s lebdećim muljem).

### **3. LABORATORIJSKI RAD**

#### 3.1. OPIS MJERNIH UREĐAJA, POSTUPAKA I MATERIJALA

##### 3.1.1. Mutnoća

Mutnoća je mjera stupnja do kojeg voda gubi prozirnost zbog prisutnosti suspendiranih tvari i koloida. Mutnoća vode uzrokovana je suspendiranim tvarima kao što su; glina, mulj, organske tvari; plankton i mikroskopski organizmi koji ometaju prolaz svjetlosti kroz vodu. Mjerenje mutnoće vrši se turbidimetrom. Turbidimetar mjeri apsorbiranu količinu zračenja koja prolazi kroz suspenziju. Na vrijednost raspršenja utječu veličina čestica, oblik i vrsta materijala od kojeg se sastoji.

Za mjerenje mutnoće korištena su dva uređaja:

a) turbidimetar 2100P - baterijski izvor

- jedna svjetlosna zraka za mjerenje raspršenja svjetlosti

b) turbidimetar 2100AN - napajanje iz gradske mreže

- tri svjetlosne zrake za mjerenje raspršenja svjetlosti



Slika 5. Turbidimetar 2100P



Slika 6. Turbidimetar 2100AN

Postupak mjerenja:

- a) stavljanje uzorka vode u staklenu epruvetu
- b) brisanje epruvete parafilmom zbog otklanjanja kapljica i vlakana
- c) stavljanje epruvete u uređaj
- d) prikaz rezultata na uređaju [NTU].

Određivanje srednje vrijednosti, standardne i relativne standardne pogreške [2]

Uzorak vode: Sava

	Mutnoća 2100P [NTU]	Mutnoća 2100AN [NTU]
Sava 2 a	1,95	2,08
Sava 2 b	2,07	2,11
Sava 2 c	1,99	2,09

Tablica 2. Uzorci za ponovljivost rezultata mjerenja

Turbidimetar 2100P

Srednja vrijednost:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 2,00$$

Standardna pogreška:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} = 12,5 \cdot 10^{-4}$$

Relativna standardna pogreška:

$$r = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{X}} \cdot 100\% = 0,0625\%$$

Turbidimetar 2100AN

Srednja vrijednost:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 2,09$$

Standardna pogreška:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} = 0,83 \cdot 10^{-4}$$

Relativna standardna pogreška:

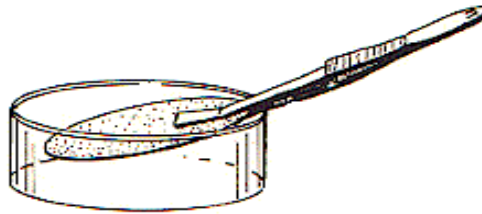
$$r = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{X}} \cdot 100\% = 0,00397\%$$

### 3.1.2 Suspendirane tvari

Suspendirane tvari su nerastvorljive čestice neorganskog porijekla.

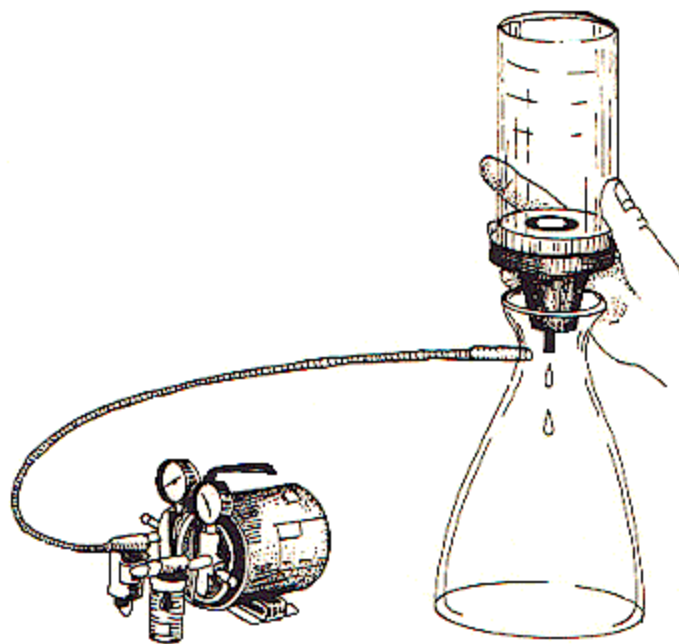
Postupak mjerenja:

a) Stavljanje membrane (GF-6, veličina pora  $47 \mu\text{m}$ ,  $\text{Ø}47$ ) pažljivo pincetom u petrijevku. Petrijevka prije toga treba biti očišćena; odnosno oprana demineraliziranom vodom i sušena kratko vrijeme u peći ( $103 \text{ }^\circ\text{C}$ ) kako ne bi došlo do pogreške u mjerenju zbog zaostalih kapljica ili nečistoća. Zatim mjerenje preciznom vagom masu petrijevke sa membranom i bilježenje rezultata ( $m_1$ ).



Slika 7. Stavljanje membrane u petrijevku

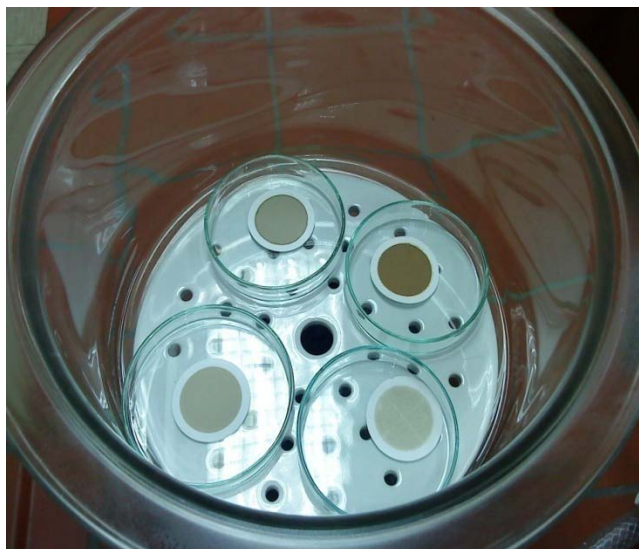
b) Filtracija uzorka vode. Za filtriranje uzorka vode kroz membranu pomaže nam vakuum pumpa; koja nam ubrzava ovaj proces. Filtrira se željena količina vode ali radilo se sa  $V=1-3\text{ L}$ .



Slika 8. Filtracija uzorka vode kroz membranu uz pomoć vakuum pumpe

c) Uzimanje membrane iz filtera, te stavljanje u petrijevku. Zajedno sa petrijevkom membranu stavljamo u peć dva sata pri temperaturi od  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$  zbog vlage sadržane u membrani. Nakon dva sata provedena u peći petrijevka se sa membranom stavlja u eksikator također dva sata radi hlađenja. Eksikator sadrži silikagel koji sprečava upijanje vlage iz zraka. Te slijedi mjerenje mase na preciznoj vagi; petrijevke sa membranom ( $m_2$ ).





Slika 9. Eksikator sa uzorcima u petrijevkama

Određivanje ukupnog sadržaja suspendiranih tvari:

$$\text{TSS} = \frac{m_2 - m_1}{V} \text{ [mg/L]}$$

$m_2$  - masa petrijevke sa membranom prije filtracije [mg]

$m_1$  - masa petrijevke sa membranom nakon filtracije [mg]

V – volumen profiltriranog uzorka vode [L]

Određivanje srednje vrijednosti, standardne i relativne standardne pogreške [2]

Uzorak vode: Sava

Suspendirane tvari	Profiltrirana količina vode V [L]	Masa prije filtracije $m_1$ [g]	Masa nakon filtracije $m_2$ [g]	Suspendirane tvari TSS [mg/L]
Sava 2 a	2	54,84036	54,84791	3,77
Sava 2 b	2	44,45924	44,46714	3,95
Sava 2 c	2	61,36016	61,36788	3,86

Tablica 3. Uzorci za ponovljivost rezultata mjerenja

Srednja vrijednost:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 3,86$$

Standardna pogreška:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} = 0,01485$$

Relativna standardna pogreška:

$$r = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{X}} \cdot 100\% = 0,385\%$$

### 3.1.3. Mjerenje indeksa gustoće mutnoće (SDI)

SDI ispitivanja se koriste za procjenu čepjenja koje će se dogoditi u sustavima za pročišćavanje vode kao što su reverzna osmoza ili nano filtracija. Veći SDI indeks označava veći potencijal prema čepjenju sustava. Kod pročišćavanja vode reverznom osmozom SDI indeks mora biti u određenim granicama, kako bi se osigurao efikasan rad. Prihvatljiva vrijednost je 4 SDI ili manje.

#### Postupak mjerenja

Postupak se temelji na mjerenju vremena potrebnog za protok određene količine sirove vode kroz membranu veličine pora 0,45  $\mu\text{m}$  i  $\text{Ø}47\text{ mm}$  uz tlak od 2,1 bar. Vrijeme se mjeri na početku, nakon 5, 10 i 15 minuta kontinuirane filtracije, te se iz dobivenih rezultata prema određenom postupku izračunava SDI indeks. Temperatura vode ne smije varirati više od  $\pm 1^\circ\text{C}$  tokom testa.

Proračun SDI [3.] :

$$P30 = \left( \frac{T_f - T_i}{T_f} \right) \cdot 100$$

$$SDI = \frac{P30}{T_t}$$

P30 – čepljenje membrane na tlaku 2,1 bar

Tt – ukupno vrijeme trajanja testa [min]

(obično 15, ali može biti i manje ako se dogodi da je P30 = 75% u manje od 15 minuta)

Ti – početno vrijeme potrebno za prikupljanje uzorka [s]

Tf – vrijeme potrebno za prikupljanje zadnjeg uzorka [s]

\* Ako se protok zaustavi za manje od 5 minuta uzima se da je P30=100%, a Tt je vrijeme nakon kojeg je došlo do zaustavljanja protoka u minutama

## 3.2. TEHNOLOŠKI POSTUPCI

### 3.2.1. Izravna filtracija

Za ispitivanje korišten je višeslojni gravitacijski filter. Kao ispuna filtra koristila se kombinacija hidroantracita i kvarcnog pijeska (Ø2,0 – 3,15 mm), koja se stavlja na drenažni sloj koji služi za odvod filtrirane vode. Primjena višeslojnih filtera produljuje radni ciklus filtra, omogućuje bolji učinak filtracije i povećava kapacitet filtra. Kao gornji sloj filtra najčešće se primjenjuje hidroantracit, dok se u filtracijskom i nosivom sloju nalazi kvarcni pijesak. Budući da je hidroantracit veće granulacije od kvarcnog pijeska u filtracijskom sloju, u gornjem se sloju filtra zadržavaju samo krupnije nečistoće i na taj način štiti filtracijski sloj pijeska od preuranjenog prljanja. Filtracijom na višeslojnim filterima moguće je ostvariti uklanjanje čestica i organizama iz balastne vode promjera većih od 10µm. Time je omogućena dubinska filtracija koja ima za posljedicu određene prednosti:

- bolji učinak filtracije;
- povećanje brzine filtracije, odnosno povećanje kapaciteta;

- povećanje sigurnosti protiv proboja nečistoća;
- smanjenje specifičnog utroška vode za pranje;
- produženje trajanja radnog perioda filtra.

Gravitacijski, odnosno otvoreni filtri se projektiraju s minimalnim visinama sloja od 600 mm za kvarcni pijesak, te 400 mm za hidroantracit. Uz to se preporuča i nosivi sloj kvarcnog pijeska veći od 200 mm. Voda se filtrira silaznim tokom a pranje filtra vrši se suprotnim tokom.

Osobine filtarskog materijala kvantificiraju se sa slijedeća dva parametra:

- a) efektivnim promjerom,
- b) koeficijentom jednolikosti.

a) Efektivni promjer,  $d_e$  [mm] definiran je izrazom:

$$d_e = d_{10}$$

b) Koeficijent jednolikosti,  $U$  [-] definiran je odnosom:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \leq 1,5$$

$d_{60}$  - promjer čestice filtracijske ispune u mm: 60 % masenog udjela filtracijske ispune čine čestice manje ili jednake  $d_{60}$

$d_{10}$  - promjer čestice filtracijske ispune u mm: 10 % masenog udjela filtracijske ispune čine čestice manje ili jednake  $d_{10}$

Ove se veličine očitavaju s granulometrijske krivulje filtarskog materijala.

## Proračun parametara filtera



Slika 10. Višeslojni gravitacijski filter

$$w = 50 \frac{dm}{h} \dots\dots\dots \text{brzina filtracije}$$

$$d = 0,7 \text{ dm} \dots\dots\dots \text{promjer filtra}$$

$$h = 4,8 \text{ dm} \dots\dots\dots \text{visina filtarske ispune}$$

$$A = \frac{d^2 \pi}{4} = 0,3848 \text{ dm}^2 \dots\dots\dots \text{površina poprečnog presjeka filtra}$$

$$V = w \cdot A = 19,24 \frac{dm^3}{h} = 320 \frac{mL}{min} \dots\dots\dots \text{volumenski protok kroz filter}$$

$$V_{\text{vode}} = A \cdot h \cdot 0,25 = 0,48 \text{ L} \dots\dots\dots \text{volumen vode u filtarskoj ispuni}$$

### 3.2.2. Koagulacija flokulacija, filtracija

Koloidne čestice mogu se praktički odstraniti iz vode jedino povećanjem veličine čestice, odnosno povećanjem brzine padanja (taloženja) na oko 2 do 4 m/h. U svrhu povećanja veličine koloidnih čestica neophodno je izbijanje naboja do  $\pm 5 \text{ mV}$ , jer se u ovom području električki nabijene čestice mogu približiti do  $10 \text{ \AA}$  ( $10^{-7} \text{ cm}$ ), kada započinje djelovanje adsorpcijske sile van der Waals-London. Izbijanje naboja koloidnih čestica zove se koagulacija, a rast skoro neutralnih čestica u veće nakupine (flokule) zove se flokulacija. Bez

koagulacije ne može nastupiti flokulacija, odnosno taloženje čestica, a samim procesom koagulacije ne možemo praktički odstraniti koloidne tvari iz vode.

Za izvođenje procesa koagulacije i flokulacije koriste se JAR – tester.

Postupak koagulacije i flokulacije:

a) Prelijevanje uzorka vode u sve četiri posude, pri čemu u svaku posudu se stavlja točno 2,25 L.

b) Doziranje koagulant (FeCl<sub>3</sub>) u dvije doze kod svakog uzorka vode kako bi se vidjelo koja doza koagulant daje bolju iskoristivost postupka. Jedna doza od 100 μL dozirala se pomoću pipete (100-1000 μL) u dvije posude a druga od 200 μL pomoću iste pipete (100-1000 μL) u druge dvije posude. Nakon toga slijedi puštanje miješalica u rad 2 minute kod 140 min<sup>-1</sup>.

c) Dodavanje polielektrolita. Polielektroliti su najčešće organski spojevi, čije molekule se sastoje od dugačkih lanaca koji sadrže naboje.

POLIELEKTROLIT;

teoretska doza:  $0,05 - 0,5 \frac{mg}{L}$

koncentracija otopine POLY: 0,01%

doza:  $0,1 \frac{mg}{L}$

priprema otopine:  $0,01\% = \frac{0,01g}{100mL} = \frac{10mg}{100mL}$ .

Dakle otopili smo 10 mg na 100 mL demineralizirane vode. Znači da bi u 1 L bilo 0,1 mg treba dozirati 1mL 0,01%-tne otopine polielektrolita, a pošto naše posude sadrže 2,25 L doziralo se pomoću pipete (1-10 mL) 2,25 mL u sve četiri posude. Nakon dodavanja polielektrolita bilo je potrebno miješati još 4 sekunde kod 140 min<sup>-1</sup> a zatim smanjiti broj okretaja miješalica na 30 min<sup>-1</sup> i tako 4 minute čime se proces koagulacije i flokulacije završava.



Slika 11. JAR tester (bez taloženja- lijeve dvije posude; flokulacija sa 100 uL FeCl<sub>3</sub> -desne dvije posude; flokulacija sa 200 uL FeCl<sub>3</sub>)



Slika 12. Eppendorf pipeta 100-1000 uL



Slika 13. Eppendorf pipeta 1-10 mL

Nakon koagulacije i flokulacije voda se filtrira ali za svaku dozu FeCl<sub>3</sub> posebno kroz višeslojni filtar uz međupranje kako bi se odstranili preostali koloidi naročito oni najsitniji.

### 3.2.3. Koagulacija flokulacija, taloženje, filtracija

Postupak koagulacije i flokulacije identičan je prethodnome ali sa tom razlikom da treba proći 45 minuta da se flokule istalože, a u višeslojni filter se ide samo bistratom dakako posebno sa svakom dozom  $\text{FeCl}_3$  uz međupranje.



Slika 14. JAR tester (taloženje –lijeve dvije posude; flokulacija sa 100 uL  $\text{FeCl}_3$  -desne dvije posude; flokulacija sa 200 uL  $\text{FeCl}_3$ )



### 3.4. OPIS LABORATORIJSKOG RADA

U okviru završnog rada ispitivano je nekoliko postupaka za uklanjanje suspendiranih i koloidnih tvari iz više uzoraka realne vode. Ispitivani postupci su:

- izravna filtracija
- koagulacija-flokulacija-filtracija
- koagulacija-flokulacija-taloženje.

Uzorci vode su:

	Datum	Količina [L]	Temperatura [°C]	Vodostaj
Sava	29.12.2009.	60	6	Vrlo visok
Sava 2	27.01.2010.	100	5	Uobičajeni
Drava	03.01.2010.	60	5	Povišeni
Ponikva	21.11.2009.	60	12	Uobičajeni
Jezero Krk	21.11.2009.	30	11	Uobičajeni

Tablica 4. Uzorci vode

Kvaliteta vode promatrana je kroz mutnoću, sadržaj suspendiranih tvari i SDI indeks. Varirani su parametri kvaliteta vode i doza koagulanta.

## 4. REZULTATI MJERENJA

### 4.1. MJERENJE MUTNOĆE

	Mutnoća 2100P [NTU]	Mutnoća 2100AN [NTU]
Drava	20,60	20,50
Sava	118,00	94,30
Sava 2 a	1,95	2,08
Sava 2 b	2,07	2,11
Sava 2 c	1,99	2,09
Ponikva	1,07	0,93
Jezero Krk	1,21	1,30

Tablica 5. Mutnoća sirove vode

	Mutnoća 2100P [NTU]	Mutnoća 2100AN [NTU]
Drava	1,97	1,90
Sava	17,20	15,40
Sava 2 a	1,43	1,25
Sava 2 b	1,38	1,26
Ponikva	0,80	0,70

Tablica 6. Mutnoća nakon izravne filtracije

	Mutnoća 2100P [NTU]	Mutnoća 2100AN [NTU]
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,39	0,20
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,09	1,10
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,93	0,87
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,43	0,30
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,09	1,01
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,98	0,90
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,12	1,02
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,91	0,82
Jezero Krk 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,27	0,21

Tablica 7. Mutnoća nakon koagulacije flokulacije, filtracije

	Mutnoća 2100P [NTU]	Mutnoća 2100AN [NTU]
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,24	0,19
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,52	0,40
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,51	0,47
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,33	0,25
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,43	0,35
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,40	0,30
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,50	0,42
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,33	0,23
Ponikva 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	0,33	0,26

Tablica 8. Mutnoća nakon koagulacije flokulacije taloženja, filtracije

#### 4.2. MJERENJE UKUPNOG SADRŽAJA SUSPENDIRANIH TVARI

	Profiltrirana količina vode [L]	Masa prije filtracije [g]	Masa nakon filtracije [g]	Suspendirane tvari [mg/L]
Drava	1	60,74964	60,76388	14,24
Sava	1	61,37356	61,46824	94,68
Sava 2 a	2	54,84036	54,84791	3,77
Sava 2 b	2	44,45924	44,46714	3,95
Sava 2 c	2	61,36016	61,36788	3,86
Ponikva	3	53,15785	53,16174	1,30
Jezero Krk	3	59,93185	59,93713	1,76

Tablica 9. Sadržaj suspendiranih tvari sirove vode

	Profiltrirana količina vode [L]	Masa prije filtracije [g]	Masa nakon filtracije [g]	Suspendirane tvari [mg/L]
Drava	1	53,17185	53,18086	9,01
Sava	1	59,92518	59,93620	11,02
Sava 2 a	2	60,73750	60,74402	3,26
Sava 2 b	2	48,74788	48,75484	3,48
Ponikva	1,5	60,74608	60,74785	1,18

Tablica 10. Sadržaj suspendiranih tvari nakon filtracije

	Profiltrirana količina vode [L]	Masa prije filtracije [g]	Masa nakon filtracije [g]	Suspendirane tvari [mg/L]
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,5	54,85474	54,85691	1,45
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,5	55,12155	55,13152	6,65
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,5	61,37230	61,37775	3,63
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,5	59,92316	59,92545	1,53
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	54,84611	54,85022	2,05
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	61,36694	61,37116	2,11
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	44,46164	44,46607	2,21
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	60,75058	60,75472	2,07
Jezero Krk 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	1,5	48,76120	48,76199	0,53

Tablica 11. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije flokulacije, filtracije

	Profiltrirana količina vode [L]	Masa prije filtracije [g]	Masa nakon filtracije [g]	Suspendirane tvari [mg/L]
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	54,84710	54,84931	1,10
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	55,12105	55,12840	3,67
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	61,36470	61,37082	3,06
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	59,92147	59,92405	1,29
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	61,36475	61,36771	1,48
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	54,84345	54,84631	1,43
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	60,75148	60,75470	1,61
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	44,46197	44,46459	1,31
Ponikva 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2	57,64733	57,64912	0,89

Tablica 12. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije

#### 4.3. MJERENJE SDI INDEKSA

	SDI
Drava	35,8
Sava	40,3
Sava 2 a	17,7
Sava 2 b	18,7
Sava 2 c	18,3
Ponikva	6,5
Jezero Krk	9,8

Tablica 13. SDI indeks sirovih voda

	SDI
Drava	20,6
Sava	35,5
Sava 2 a	16,1
Sava 2 b	14,9
Ponikva	5

Tablica 14. SDI indeks nakon filtracije

	SDI
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	7,7
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	18,1
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	16,5
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	8,7
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	12,0
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	11,5
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	12,9
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	11,4
Jezero Krk 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	2,9

Tablica 15. SDI indeks nakon koagulacije flokulacije, filtracije

	SDI
Drava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	4,5
Drava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	9,5
Sava 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	9,3
Sava 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	5,4
Sava 2 a 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	5,9
Sava 2 a 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	5,9
Sava 2 b 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	6,9
Sava 2 b 200 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	5
Ponikva 100 $\mu$ L FeCl <sub>3</sub>	3,6

Tablica 16. SDI indeks nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije

#### 4.4. KVALITETA SIROVE VODE

	Mutnoća 2100AN [NTU]	Suspendirane tvari [mg/L]	SDI
Drava	20,50	14,24	35,8
Sava	94,30	94,68	40,3
Sava 2	2,09	3,86	18,2
Ponikva	0,93	1,30	6,5
Jezero Krk	1,30	1,76	9,8

Tablica 17. Kvaliteta sirove vode

#### 4.5. IZRAVNA FILTRACIJA

	Mutnoća 2100AN [NTU]	Suspendirane tvari [mg/L]	SDI
Drava	1,90	9,01	20,6
Sava	15,40	11,02	35,5
Sava 2	1,25	3,37	15,5
Ponikva	0,70	1,18	5

Tablica 18. Svojstva vode nakon izravne filtracije

#### 4.6. KOAGULACIJA FLOKULACIJA, FILTRACIJA

	Mutnoća 2100AN [NTU]	Suspendirane tvari [mg/L]	SDI
Drava 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,20	1,45	7,7
Drava 200µL FeCl <sub>3</sub>	1,10	6,65	18,1
Sava 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,87	3,63	16,5
Sava 200µL FeCl <sub>3</sub>	0,30	1,53	8,7
Sava 2 100µL FeCl <sub>3</sub>	1,01	2,13	12,4
Sava 2 200µL FeCl <sub>3</sub>	0,86	2,09	11,4
Jezero Krk 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,21	0,53	2,9

Tablica 19. Svojstva vode nakon koagulacije flokulacije, filtracije

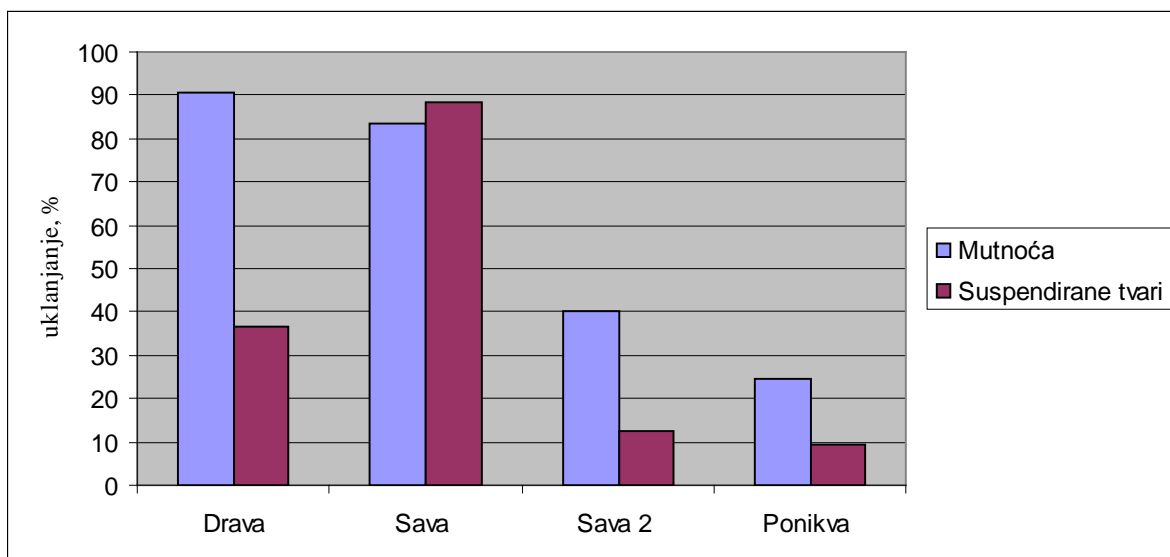
#### 4.7. KOAGULACIJA FLOKULACIJA, TALOŽENJE, FILTRACIJA

	Mutnoća 2100AN [NTU]	Suspendirane tvari [mg/L]	SDI
Drava 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,19	1,10	4,5
Drava 200µL FeCl <sub>3</sub>	0,40	3,67	9,5
Sava 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,47	3,06	9,3
Sava 200µL FeCl <sub>3</sub>	0,25	1,29	5,4
Sava 2 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,39	1,54	6,4
Sava 2 200µL FeCl <sub>3</sub>	0,26	1,37	5,4
Ponikva 100µL FeCl <sub>3</sub>	0,26	0,89	3,6

Tablica 20. Svojstva vode nakon koagulacije flokulacije, taloženja, filtracije

## 5. ANALIZA REZULTATA

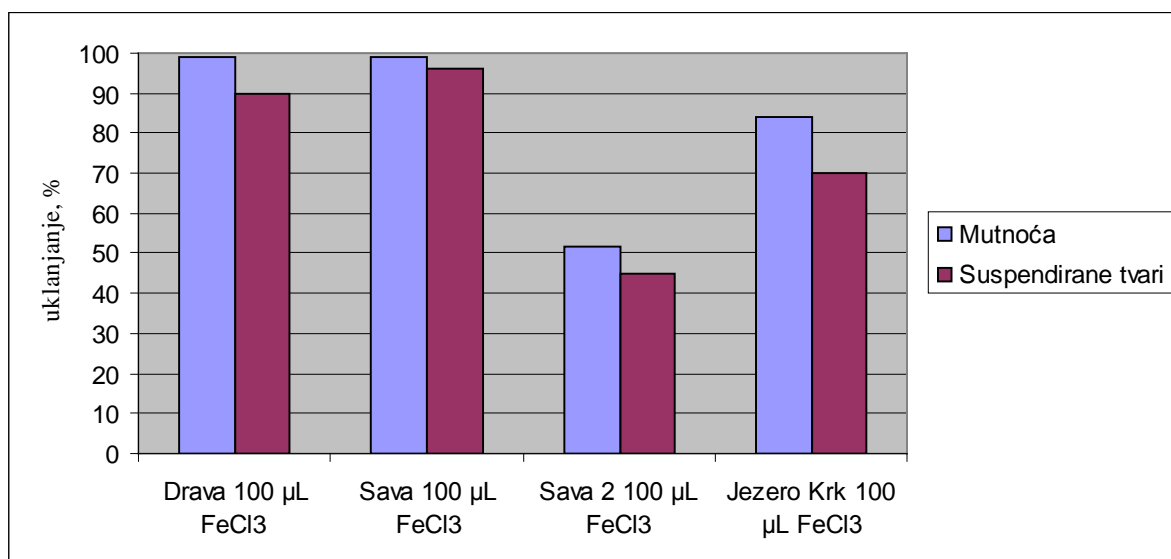
### 5.1. USPJEŠNOST UKLANJANJA SUSPENDIRANIH TVARI IZRAVNOM FILTRACIJOM



Slika 15. Uklanjanje suspendiranih tvari izravnom filtracijom

### 5.2. UTJECAJ UVOĐENJA KOAGULACIJE FLOKULACIJE, FILTRACIJE

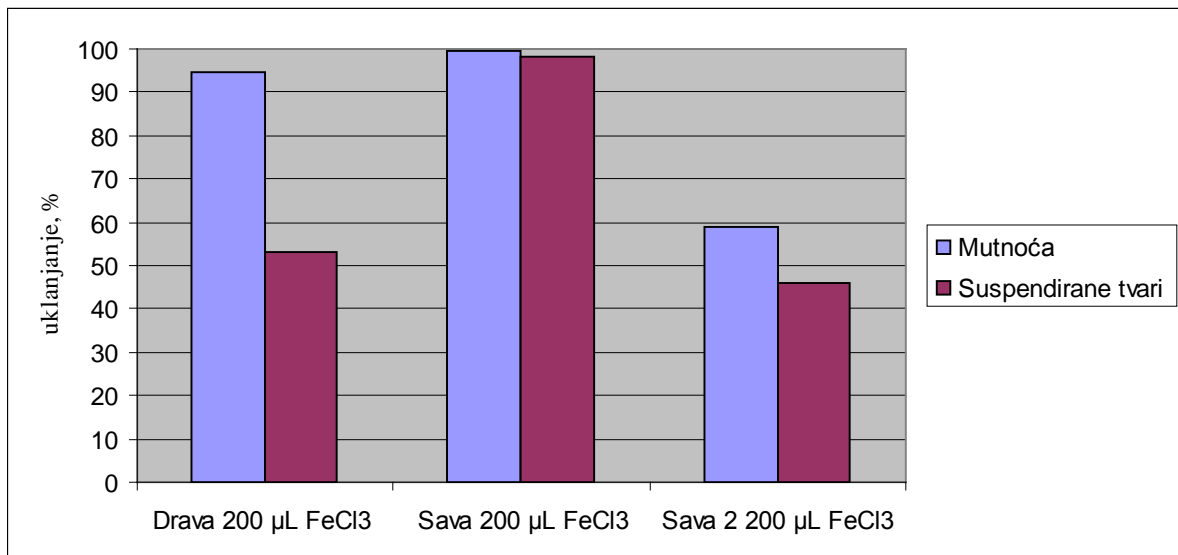
- Doza 100 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>



Slika 16. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, filtracijom

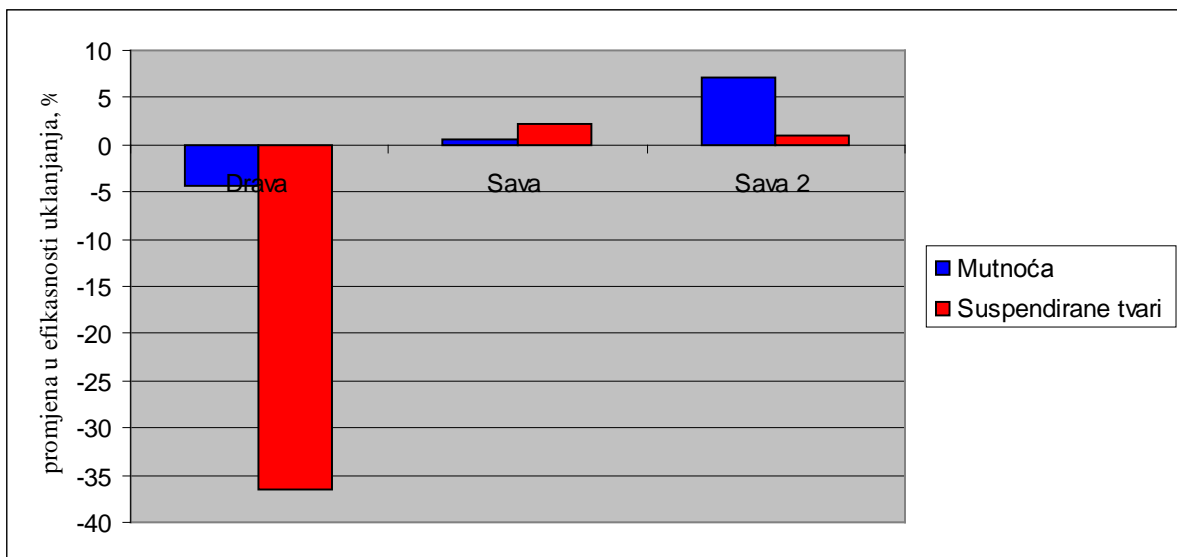


- Doza 200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>



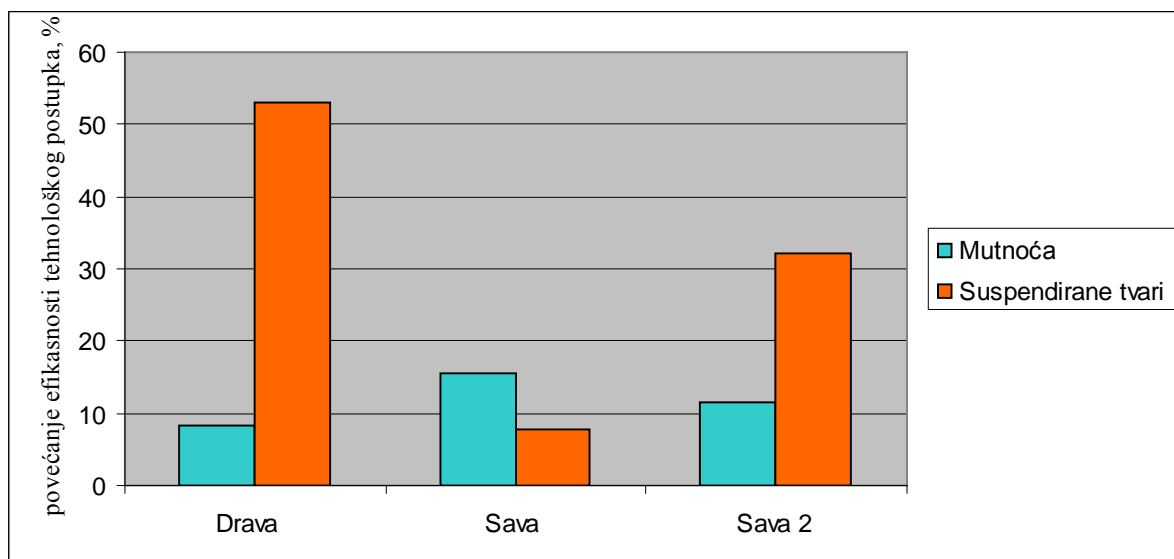
Slika 17. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, filtracijom

- Utjecaj povećanja doze sa 100 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub> na 200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>



Slika 18. Utjecaj povećanja doze na mutnoću i suspendirane tvari

- Povećanje efikasnosti tehnološkog postupka koagulacije-flokulacije ( $100\mu\text{L FeCl}_3$ )-  
filtracije u odnosu na izravnu filtraciju



Slika 19. Utjecaj uvođenja koagulacije flokulacije, filtracije u odnosu na izravnu filtraciju

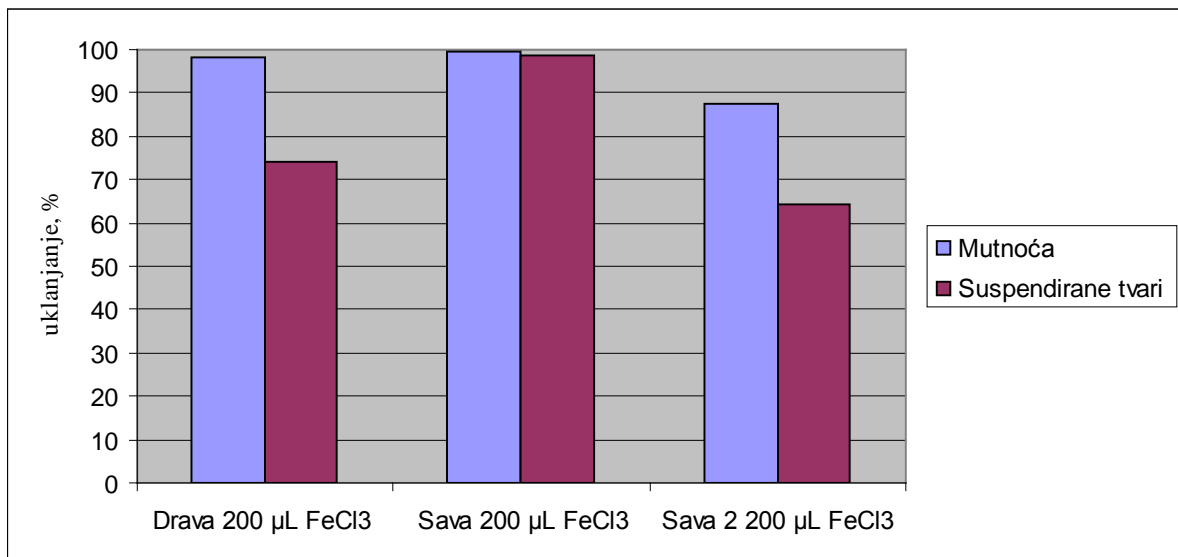
### 5.3. UTJECAJ UVOĐENJA KOAGULACIJE FLOKULACIJE, TALOŽENJA, FILTRACIJE

- Doza  $100\mu\text{L FeCl}_3$



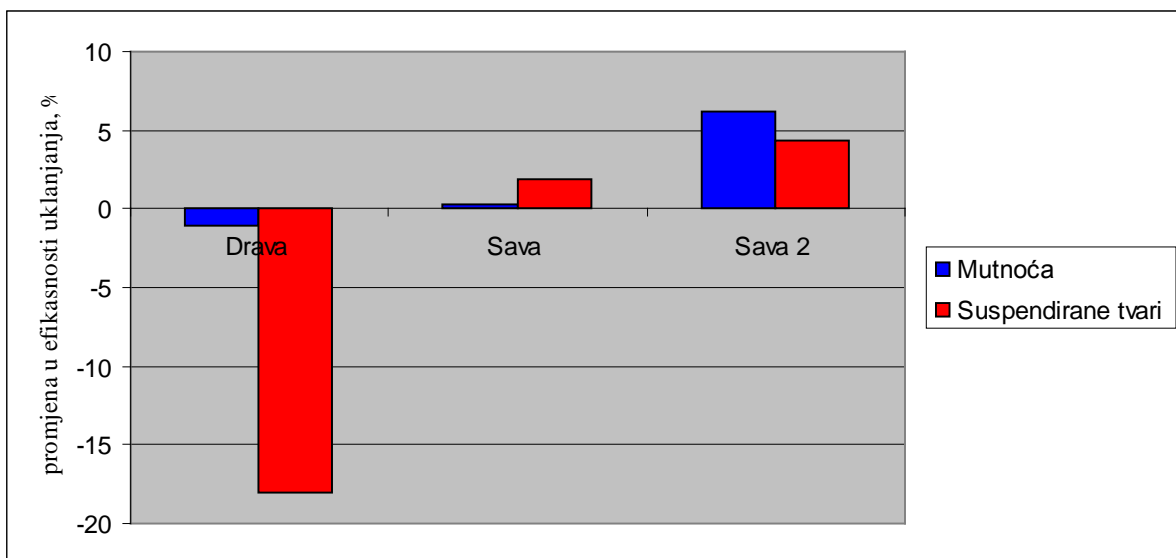
Slika 20. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, taloženjem, filtracijom

- Doza 200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>



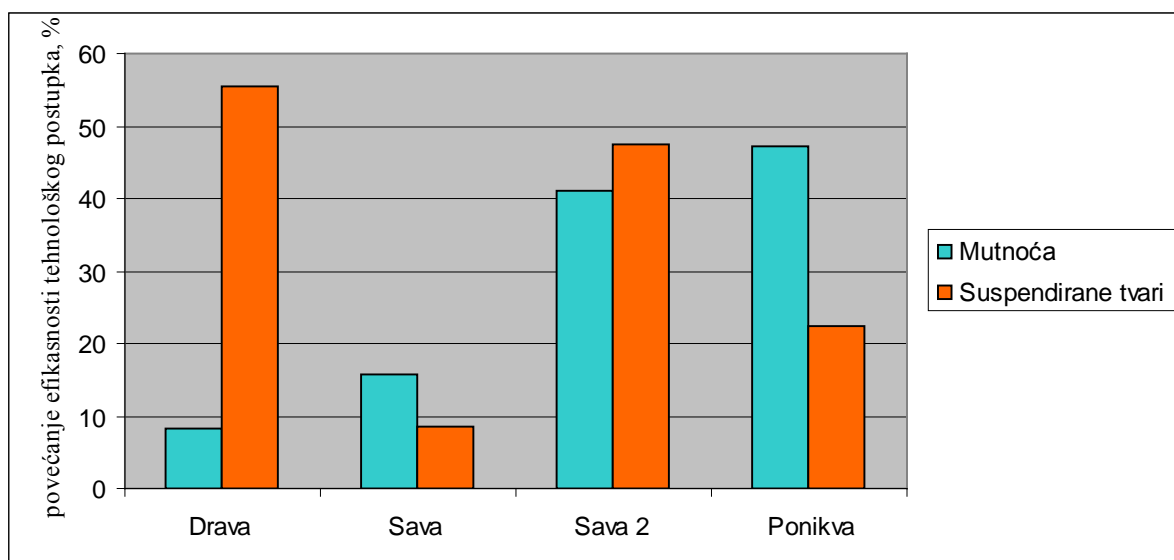
Slika 21. Uklanjanje suspendiranih tvari koagulacijom flokulacijom, taloženjem, filtracijom

- Utjecaj povećanja doze sa 100 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub> na 200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>



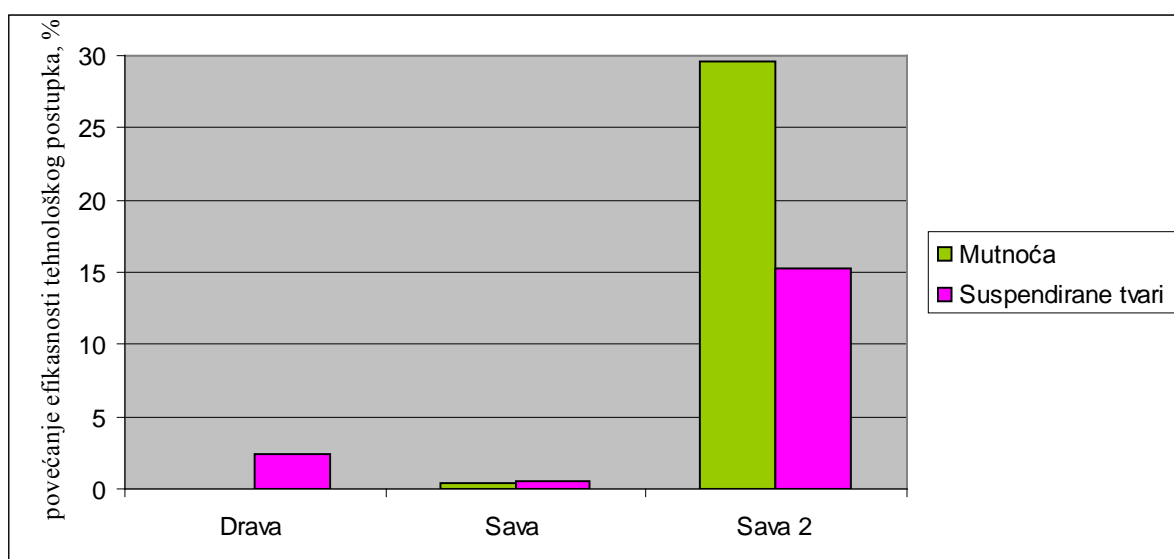
Slika 22. Utjecaj povećanja doze na mutnoću i suspendirane tvari

- Povećanje efikasnosti tehnološkog postupka koagulacije-flokulacije ( $100\mu\text{L FeCl}_3$ )-taloženja i filtracije u odnosu na izravnu filtraciju



Slika 23. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na izravnu filtraciju

- Povećanje efikasnosti tehnološkog postupka koagulacije-flokulacije ( $100\mu\text{L FeCl}_3$ )-taloženja i filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju ( $100\mu\text{L FeCl}_3$ )-filtraciju



Slika 24. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju-filtraciju

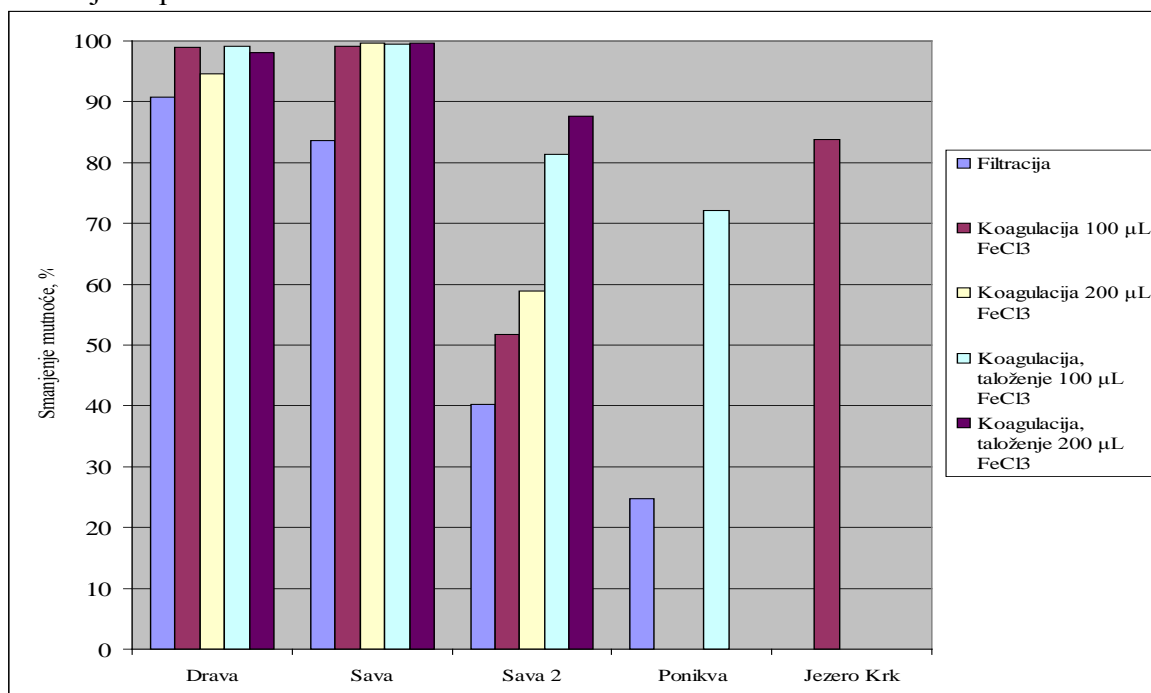
- Povećanje efikasnosti tehnološkog postupka koagulacije-flokulacije (200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>)-taloženja i filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju (200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub>)-filtraciju



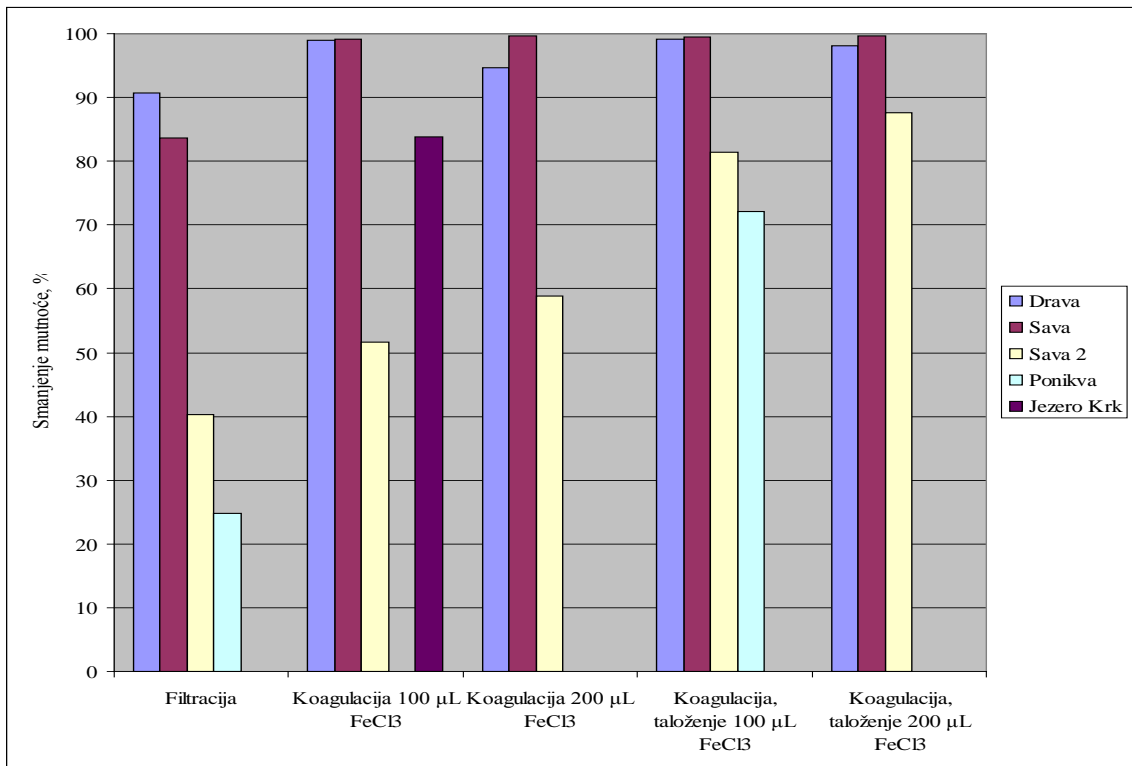
Slika 25. Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju-filtraciju

#### 5.4. UTJECAJ TEHNOLOŠKIH POSTUPAKA ZA POJEDINE VRSTE VODE

##### 5.4.1. Mjerni parametar mutnoća

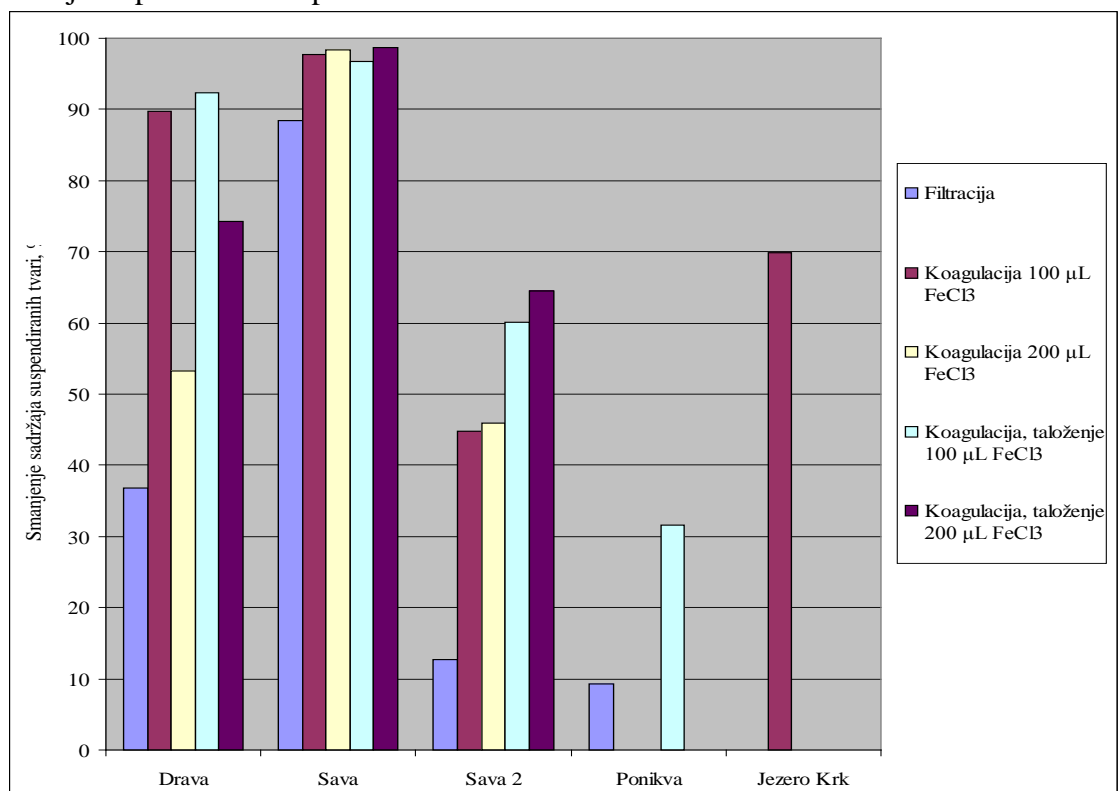


Slika 26. Smanjenje mutnoće ovisno o uzorku

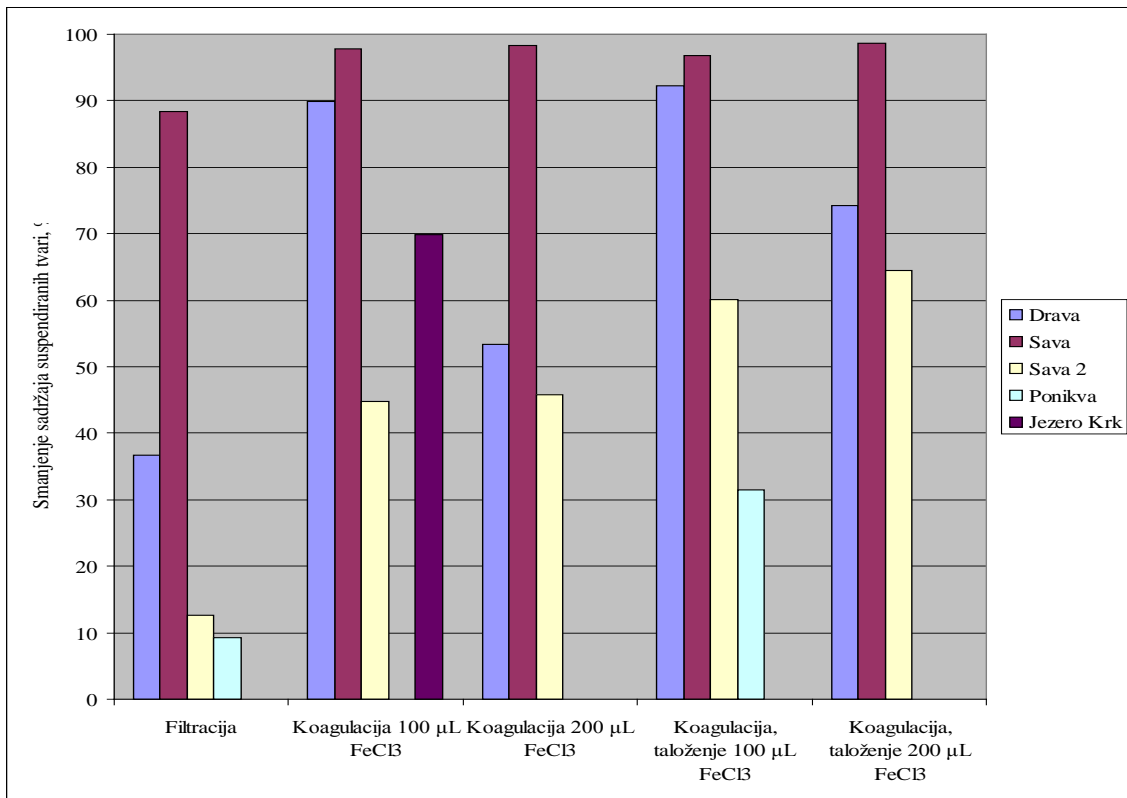


Slika 27. Smanjenje mutnoće ovisno o postupku

#### 5.4.2. Mjerni parametar suspendirane tvari



Slika 28. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o uzorku



Slika 29. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o postupku

## **7. ZAKLJUČAK**

Za uzorke sirove ve prirodne vode iz rijeke Drave i Save, te jezera Ponikve i Jezero na otoku Krku načinjeno je laboratorijsko ispitivanje učinkovitosti sljedećih tehnoloških postupaka:

- izravna filtracija
- koagulacija-flokulacija-filtracija
- koagulacija-flokulacija-filtracija-taloženje.

Temeljem dobivenih rezultata, za pojedine stupnjeve obrade vode donose se sljedeći zaključci:

### **1. IZRAVNA FILTRACIJA**

- Izravnom filtracijom moguće je postići vrlo visoke učinke u smanjenju sadržaja grubih i finih disperzija. Tako npr. za uzorak Save se izravnom filtracijom smanji mutnoća za 82% a suspendirane tvari smanje se za 89%; Slika 15. To je posljedica činjenice da se radi o uzorku vrlo visoke mutnoće, odnosno većeg udjela grubo dispergiranih tvari, te su veće čestice pa se lakše filtriraju.
- Međutim za uzorke voda s nižim inicijalnim sadržajem suspendiranih tvari odnosno sa većim udjelom koloidnih tvari visoki učinak uklanjanja moguće je postići tek uvođenjem koagulacije i flokulacije. To ilustriraju rezultati rada sa Savskom vodom kod uobičajenih hidroloških uvjeta (Sava 2).

### **2. KOAGULACIJA-FLOKULACIJA-FILTRACIJA**

- Koagulacija-flokulacija-filtracija provedena je sa dvije doze koagulanta od 100 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub> i 200 $\mu$ L FeCl<sub>3</sub> a njihov utjecaj na mutnoću i suspendirane tvari može se vidjeti na Slici 18. Na slici se vidi da povećanje doze utječe na smanjenje mutnoće i suspendiranih tvari za rijeku Savu dok za Dravu nema poboljšanja efikasnosti sa većom dozom nego isključivo sa manjom. Iz razlike je vidljivo da je potrebno optimirati doze koagulanta za pojedinu vrstu vode koja se namjerava obrađivati ovim postupkom.
- Prisustvo velikih koncentracija suspendiranih tvari – olakšava formiranje i rast pahulja. Bistre vode, sa malim sadržajem suspendiranih tvari – teško se obrađuju koagulacijom npr. Ponikva.



- Usporede li se tehnološki postupak koagulacije-flokulacije ( $100\mu\text{L FeCl}_3$ )-filtracije u odnosu na izravnu filtraciju zamjećuje se povećanje efikasnosti kod svih uzoraka voda; najveće kod Save za mutnoću; 16% a kod Drave za suspendirane tvari; 53% Slika 19.

### **3. KOAGULACIJA-FLOKULACIJA-TALOŽENJE-FILTRACIJA**

- Koagulacija-flokulacija-taloženje-filtracija utječe značajno na poboljšanja efikasnosti uklanjanja kod većih sadržaja koloidnih tvari.
- Utjecaj uvođenja koagulacije-flokulacije-taloženja-filtracije u odnosu na koagulaciju-flokulaciju-filtraciju može se vidjeti na Slici 24. i Slici 25. Vidi se da za dozu od  $100\mu\text{L FeCl}_3$  povećanje efikasnosti uklanjanja se primjetno javlja za Savu 2 koja ima veću zamućenost, dok za dozu  $200\mu\text{L FeCl}_3$  izraženije je kod Drave i Save 2. Može se pretpostaviti da je tomu nešto veći sadržaj koloidnih tvari kod tih voda.

U svakom slučaju, iz dobiveni rezultati sugeriraju potrebu da se ovim problemima pristupi sustavno te da je prije izbora tehnološkog rješenja potrebno načiniti ovakvu usporedbu tehnoloških postupaka. Optimalan izbor omogućuje veću kvalitetu vode te niže pogonske i investicijske troškove.

## **8. POPIS LITERATURE**

- [1] Simon A. Parsons and Bruce Jefferson, Portable water treatment processes, Cranfield, 2006
- [2] S. Dobrović, Voda gorivo mazivo, Zagreb, 2008/2009
- [3] Z. Blatarić, Završni rad: Određivanje indeksa gustoće mutnoće prirodnih voda, Zagreb, 2010
- [4] [www.lenntech.com](http://www.lenntech.com)
- [5] [www.watertech.com](http://www.watertech.com)