

# Određivanje indeksa gustoće mutnoće prirodnih voda

---

**Blatarić, Zoran**

**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:235:802954>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-29**

*Repository / Repozitorij:*

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





Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje



## ZAVRŠNI RAD

Određivanje indeksa gustoće mutnoće prirodnih voda

Voditelj rada:

Prof. dr.sc. Slaven Dobrović

Zoran Blatarić

Zagreb, (2010.)

## SAŽETAK RADA

Indeks gustoće mutnoće (Silt density indeks - SDI) je empirijski parametar kvalitete vode koji iskazuje potencijal čepjenja filtracijskih uređaja. Indeks se temelji na kvaliteti i količini suspendiranih tvari sadržanih u vodi koja se namjerava obrađivati membranskim uređajem. U okviru ovog rada koristeći laboratorijski uređaj izvršeno je ispitivanje indeksa gustoće mutnoće za nekoliko prirodnih voda sa i bez predobrade. Korištene vode su: Sava, Drava, Ponikva i Jezero Krk. Kao postupci predobrade korišteni su: Izravna filtracija, koagulacija i flokulacija, te koagulacija i flokulacija sa taloženjem. Za svaki pojedini uzorak vode je prije i nakon svake predobrade izmjerena mutnoća, ukupni sadržaj suspendiranih tvari i SDI indeks. Srednja vrijednost, standardna i relativna standardna pogreška mjerenja su određene na temelju tri ponovljena postupka mjerenja i predobrade istog uzorka vode. Rezultati navedenih mjerenja prije i nakon svakog od postupka predobrade vode su prikazani tablično. Obradom i usporedbom dobivenih rezultata, te grafičkim prikazom relevantnih veličina utvrđen je utjecaj pojedinog postupka predobrade na mjerene veličine ispitanih uzoraka vode. Iz dobivenih se rezultata zaključuje o svrsishodnosti i opravdanosti primjene određenog procesa predobrade u membranskim sustavima za pročišćavanje vode.

**SADRŽAJ:**

1. POPIS TABLICA, SLIKA I DIJAGRAMA.....	3
2. TEORIJSKI DIO .....	5
3. LABORATORIJSKI RAD.....	7
3.1. Uzorci vode.....	7
3.2. Opis postupaka predobrade.....	7
3.2.1. Izravna filtracija .....	7
3.2.2. Koagulacija, flokulacija , filtracija .....	10
3.2.3. Koagulacija, flokulacija, taloženje, filtracija .....	13
3.3. Opis mjernih uređaja, postupaka i materijala .....	14
3.3.1. Mjerenje mutnoće .....	14
3.3.2. Mjerenje ukupnog sadržaja suspendiranih tvari.....	17
3.3.3. Mjerenje indeksa gustoće mutnoće (SDI) .....	19
3.4. Mjerni rezultati .....	23
4. ANALIZA MJERNIH REZULTATA .....	27
4.1. Svojstva vode prije i nakon postupaka predobrade.....	27
4.1.1. Sirove vode .....	27
4.1.2. Izravna filtracija .....	27
4.1.3. Koagulacija, flokulacija , filtracija .....	28
4.1.4. Koagulacija, flokulacija , taloženje, filtracija .....	28
4.2. Utjecaj postupaka predobrade na svojstva vode.....	29
4.2.1. Smanjenje mutnoće ovisno o predobradi.....	29
4.2.2. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o predobradi .....	30
4.2.3. Smanjenje SDI indeksa ovisno o predobradi .....	31
4.3. Međusobni odnosi mjerenih veličina .....	32
5. ZAKLJUČAK.....	35
6. LITERATURA.....	37

## 1. POPIS TABLICA, SLIKA I DIJAGRAMA

### Popis tablica:

Tablica 1. Utjecaj na SDI membranu ovisno o vrsti onečišćenja.....	6
Tablica 2. Odnos SDI i čepljenja membrane .....	6
Tablica 3. Uzorci vode .....	7
Tablica 4. Analiza ponovljivosti mjerenja mutnoće.....	16
Tablica 5. Analiza ponovljivosti mjerenja ukupnog sadržaja suspendiranih tvari	18
Tablica 6. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak a) .....	21
Tablica 7. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak b) .....	21
Tablica 8. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak c) .....	22
Tablica 9. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa .....	22
Tablica 10. Mutnoća sirove vode.....	23
Tablica 11. Mutnoća nakon izravne filtracije.....	23
Tablica 12. Mutnoća nakon koagulacije, flokulacije, filtracije .....	23
Tablica 13. Mutnoća nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije .....	24
Tablica 14. Sadržaj suspendiranih tvari sirove vode.....	24
Tablica 15. Sadržaj suspendiranih tvari nakon filtracije .....	25
Tablica 16. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije, flokulacije, filtracije	25
Tablica 17. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije.....	25
Tablica 18. SDI indeks nakon filtracije.....	26
Tablica 19. SDI indeks sirovih voda.....	26
Tablica 20. SDI indeks nakon koagulacije, flokulacije, filtracije .....	26
Tablica 21. SDI indeks nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije .....	26
Tablica 22. Kvaliteta sirove vode.....	27
Tablica 23. Svojstva vode nakon izravne filtracije.....	27
Tablica 24. Svojstva vode nakon koagulacije, flokulacije, filtracije.....	28
Tablica 25. Svojstva vode nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije ...	28

**Popis slika:**

Slika 1. Višeslojni filter .....	8
Slika 2. Jar tester .....	11
Slika 3. Pipete .....	11
Slika 4. Flokulacija 100 i 200 $\mu\text{L}$ $\text{FeCl}_3$ .....	12
Slika 5. Taloženje .....	13
Slika 6. 2100P .....	14
Slika 7. 2100AN .....	14
Slika 8. Eksikator .....	17

**Popis dijagrama:**

Dijagram 1. Smanjenje mutnoće ovisno o predobradi .....	29
Dijagram 2. Smanjenje mutnoće za svaku od voda .....	29
Dijagram 3. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o predobradi .....	30
Dijagram 4. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari za svaku od voda .....	30
Dijagram 5. Smanjenje SDI indeksa ovisno o predobradi .....	31
Dijagram 6. Smanjenje SDI indeksa za svaku od voda .....	31
Dijagram 7. Odnosi mjerenih veličina Drava .....	32
Dijagram 8. Odnosi mjerenih veličina Sava .....	32
Dijagram 9. Odnosi mjerenih veličina Sava 2 .....	33
Dijagram 10. Odnos sadržaja suspendiranih tvari i mutnoće .....	33
Dijagram 11. Odnos SDI indeksa i mutnoće .....	34
Dijagram 12. Odnos SDI indeksa i sadržaja suspendiranih tvari .....	34

## 2. TEORIJSKI DIO

SDI ispitivanja se koriste za procjenu čepjenja koje će se dogoditi u sustavima za pročišćavanje vode kao što su reverzna osmoza ili nano filtracija.

Prisutnost finih čestica raspršenih u vodi može uzrokovati ozbiljne probleme kod sustava za pročišćavanje vode reverznom osmozom. 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. Funkcija membrane kod reverzne osmoze je separirati suspendirane tvari na jednoj strani membrane, a dopustiti molekulama vode da prođu na drugu stranu membrane. Raspršene koloidne čestice su veće od otopljenih soli, te se nakupljaju na membrani. To uzrokuje smanjenje protoka permeata, te povećanje tlaka. Ne postoji direktna korelacija između zamućenosti vode i njenog SDI indeksa. Iskustvo je pokazalo da voda vrlo male zamućenosti ( $<1$  NTU) može imati visoku vrijednost SDI. Podzemne vode u pravilu nemaju suspendiranih tvari, te imaju nizak SDI indeks. Površinske vode nasuprot tome u pravilu imaju mnogo suspendiranih tvari, te time i visok SDI indeks, pa je često potrebna predobrada vode u slučaju primjene reverzne osmoze ili nano filtracije kod pročišćavanja. SDI indeks se može koristiti da se utvrdi djelotvornost procesa predobrade kao što su bistrenje i filtracija. Iskustva pokazuju da ti postupci nekad nisu adekvatni, pa se industrije sve više oslanjaju na korištenje membranskih procesa kao što je ultrafiltracija u svrhu smanjenja SDI indeksa.

	<b>Tvari</b>	<b>Način onečišćenja</b>	<b>Utjecaj na SDI membranu</b>
<b>Čestice</b>	Koloidi	Čepljenje pora	Znatno blokiranje protoka na površini i u porama
	Bakterije		
<b>Otopine</b>	Organizmi	Adhezija unutar pora	Propusnost se održava, ali je u laganom padu
	Proteini		
<b>Plin</b>	Mikro mjehurići	Mjehurići unutar pora	Blagi pad propusnosti

Tablica 1. Utjecaj na SDI membranu ovisno o vrsti onečišćenja [1.]

Vrsta nečistoća s obzirom na boju membrane:

1. Slabo žuta – mogući problem mogao bi biti prisutnost željeza
2. Crvenkasto smeđa – pokazatelj prisutnosti željeza u vodi
3. Siva – označava prisutnost ugljika u vodi
4. Crna – ako se boja otapa u kiselini ukazuje na prisutnost mangana u vodi

SDI<1	Nekoliko godina bez koloidnog onečišćenja
SDI<3	Nekoliko mjeseci između čišćenja
SDI 3-5	Mogući problemi. Često čišćenje
SDI>5	Neprihvatljivo, potrebna predobrada vode

Tablica 2. Odnos SDI i čepljenja membrane [2.]



### 3. LABORATORIJSKI RAD

#### 3.1. Uzorci vode

	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 3. Uzorci vode

#### 3.2. Opis postupaka predobrade

##### 3.2.1. Izravna filtracija

U ovom je ispitivanju korišten višeslojni filter. Jedna od najčešćih kombinacija je hidroantracit/kvarcni pijesak koji je primijenjen i u našem slučaju. (Slika 1.)

Primjena višeslojnih filtera donosi znatna poboljšanja u procesu filtracije. Ovdje se primjenjuju različiti materijali kao što su kvarcni pijesak, hidroantracit, koks i drugi. Hidroantracit je čvrsti, sjajno-crni, oštrokuti mineral manje specifične težine, pa se u filter stavlja kao gornji sloj ispune. Po svom sastavu je gotovo čisti ugljik, a po porijeklu najstariji ugljen, odnosno posljednji u nizu transformacije biljnih ostataka. Važna karakteristika ovih filtera je da je granulacija hidroantracita uvijek veća od granulacije pijeska. Kao donji, nosivi sloj koristi se kvarcni pijesak granulacije  $\varnothing$  2,0 – 3,15 mm.



Slika 1. Višeslojni filter

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. Prilikom pranja filtra specifično lakši antracit hidrauličkom separacijom ostaje kao gornji sloj filtarske mase. Kako je hidroantracit konstituiran od čestica veće granulacije (u odnosu na pijesak) zadržavaju se samo krupnije nečistoće, a finije prolaze kroz antracit do finije granuliranog kvarcnog pijeska odnosno do drugog filtracijskog sloja. Time se omogućuje dubinska filtracija, koja ima za posljedicu određene prednosti:

1. Bolji učinak filtracije
2. Povećanje brzine filtracije, odnosno povećanje kapaciteta
3. Povećanje sigurnosti protiv proboja nečistoća
4. Smanjenje specifičnog utroška vode za pranje
5. Produženje trajanja radnog perioda filtra

Postoje međutim izvjesni zahtjevi na kvalitetu materijala. Zrnca kvarcnog pijeska trebaju biti što sličnija formi kugle. Ovisno o namjeni filtra odabire se filtracijska ispuna, koja odgovara jednoj od granulacijskih ispuna.

Za svaku granulacijsku skupinu standard propisuje dozvoljeni sadržaj čestica iznad i ispod granulacijskog intervala.

Granulometrijska ispravnost filtra je vrlo bitna za kvalitetu filtracijskog procesa. Postižu se veći učinci separacije suspendiranih tvari, duži radni period između dva pranja, veći kapacitet filtra, te manji pad tlaka preko filtarske ispune.

Također veoma važna je i brzina protoka vode kroz filter:

$$A = 0,3848 \text{ dm}^2$$

$$w = 50 \text{ dm/h}$$

$$h = 5 \text{ dm}$$

$$V = A \cdot w = 19,24 \text{ L/h} = 320 \text{ mL/min}$$

$$V_{vode} = A \cdot h \cdot 0,25 = 0,48 \text{ L}$$

$A$  – površina filtra [dm<sup>2</sup>]

$w$  – brzina protoka kroz filter [dm/h]

$h$  – visina filtarske ispune [dm]

$V$  – protok kroz filter [L/h]

$V_{vode}$  – volumen vode u filtarskoj ispuni [L]

### 3.2.2. Koagulacija, flokulacija , filtracija

Kod prirodnih voda vrlo često su prisutne koloidne disperzije te se tehnološkim postupkom koagulacije i flokulacije nastoji uspostaviti ubrzana sedimentacija čestica. Koloidne tvari čine čestice promjera  $\varnothing 10^{-3} - 10^{-5}$  mm koje se ne mogu vidjeti običnim mikroskopom, jer su im dimenzije manje od valne dužine svjetla (350-700 nm). U prirodnim vodama mogu postojati hidrofilne i hidrofobne čestice, ali uglavnom susrećemo hidrofobne koloidne čestice. Koloidne tvari su električki nabijene čestice čiji je električni potencijal u granicama od 5-80 mV. Većina prirodnih sirovih voda imaju hidrofobne koloidne čestice koje posjeduju negativne naboje. Potrebno je naglasiti da koloidne čestice imaju velik stupanj disperzije, time i veliku kontaktnu površinu. Stupanj disperzije nekog sustava definiran je kao odnos ukupne površine dispergirane faze i ukupnog volumena dispergirane faze. Koloidne čestice mogu se odstraniti iz vode povećanjem veličine čestice, odnosno povećanjem brzine taloženja na oko 2 do 4 m/h. U svrhu povećanja veličine koloidnih čestica neophodno je izbijanje naboja do  $\pm 5$  mV, jer se u ovom području električki nabijene čestice mogu približiti do  $10^{-6}$  mm, kada započinje djelovanje adsorpcijske sile. Izbijanje naboja koloidnih čestica zove se koagulacija, a rast skoro neutralnih čestica u veće nakupine zove se flokulacija. Bez koagulacije ne može nastupiti flokulacija, odnosno taloženje čestica. Za odvijanje procesa koagulacije se doziraju soli aluminijska i željeza. Potrebne količine koagulantata se kreću u rasponu od 10 do 50 g po  $m^3$  sirove vode. Nakon koagulacije spontano slijedi proces flokulacije. Međutim, u praksi je često potrebno ubrzati proces stvaranja flokula dodatkom polielektrolita u količini 0,05 do 0,5 g/ $m^3$ . Danas se u principu nabavljaju gotove otopine – formulacije za koagulaciju koje se dostavljaju u velikoj specifičnoj gustoći. Uglavnom se koriste anorganski koagulantata na bazi željeza ( $FeCl_3$ ) i aluminijska ( $Al_2(SO_4)_3$ ).

U ovom je ispitivanju za proces koagulacije i flokulacije korišten Jar tester (Slika 2.) i željezni klorid ( $\text{FeCl}_3$ ) kao sredstvo za koagulaciju.



Slika 2. Jar tester

Korištene su dvije doze željeznog klorida po svakom uzorku vode kako bi se vidjelo koja količina koagulanta daje bolje rezultate. Korištene su doze 100 i 200  $\mu\text{L}$  željeznog klorida ( $\text{FeCl}_3$ ) i 2,25 mL polielektrolita po uzorku vode od 2,25L koliko najviše stane u jednu posudicu Jar testera. Doziranje je vršeno mikrolitarskom i mililitarskom pipetom (Slika 3.).



Slika 3. Pipete

Postupak predobrade:

1. Stavljanje uzorka vode u posudice
2. Doziranje koagulanta i intenzivno mješanje 2 minute
3. Doziranje polielektrolita i lagano mješanje 4 minute

Pokazalo se da dolazi do znatnog odstupanja u brzini i kvaliteti koagulacije i flokulacije za ove dvije doze (Slika 4.), što opravdava svrsishodnost dvostrukog ispitivanja.



Slika 4. Flokulacija 100 i 200  $\mu\text{L}$   $\text{FeCl}_3$

Budući da su koloidne čestice veoma malih dimenzija teško ih je kvalitetno odstraniti izravnom filtracijom. Ovako flokulirane čestice kada su im dimenzije višestruko veće filtracija daje znatno bolje rezultate.

### 3.2.3. Koagulacija, flokulacija, taloženje, filtracija

Ovaj je postupak identičan prethodnom s tom razlikom što se po završetku čeka pola sata da bi se flokule istaložile (Slika 5.), te se u filter ide samo sa bistratom.



Slika 5. Taloženje

Brzina kojom će sedimentirati sferna čestica radiusa  $r$  i gustoće  $\rho_c$  u fluidu gustoće  $\rho$  i dinamičkog viskoziteta  $\eta$  dana je Stokesovim zakonom:

$$v = \frac{2 \cdot r^2 \cdot g \cdot (\rho_c - \rho)}{9 \cdot \eta} \quad [3.]$$

$v$  - brzina taloženja [m/s]

$\rho_c$  - gustoća koloidne čestice [ $\text{kg/m}^3$ ]

$\rho$  - gustoća vode [ $\text{kg/m}^3$ ]

$r$  - promjer čestice [m]

$\eta$  - dinamički viskozitet [Pas]

### 3.3. Opis mjernih uređaja, postupaka i materijala

#### 3.3.1. Mjerenje mutnoće

Mutnoća je važan pokazatelj kvalitete vode za sve sustave za obradu vode. Mutnoća predstavlja prisutnost raspršenih čestica, mulja, gline, algi, mikroorganizama ili slično. Uređaj za mjerenje mutnoće mjeri raspršenje svjetla koje nastaje prolaskom svjetlosne zrake kroz određeni uzorak vode. Dakle ne mjeri se izravno količina čestica, već efekt raspršenja svjetla koje spomenute čestice uzrokuju. Na vrijednost raspršenja utječu veličina čestica, oblik i vrsta materijala od kojeg se sastoje. Vrlo male čestice (0,2 mikrometra) raspršuju svjetlost podjednako prema naprijed i prema natrag, dok veće čestice (1 mikrometar) raspršuju prvenstveno prema naprijed.

U našem ispitivanju korištena su dva uređaja za mjerenje mutnoće.



Slika 6. 2100P



Slika 7. 2100AN



Najvažnija razlika između ova dva uređaja je u tome što je 2100P (Slika 6.) prijenosna verzija koja kao napajanje koristi bateriju i jednu svjetlosnu zraku prilikom mjerenja mutnoće, dok je 2100AN (Slika 7.) stolna verzija koja koristi tri svjetlosne zrake, te bi samim time njegovi rezultati trebali biti točniji i sa manjim rasipanjem.

Da bismo odredili standardnu i relativnu standardnu pogrešku mjerenja za svaki od ovih mjernih uređaja provedeno je trostruko uzastopno mjerenje mutnoće istog uzorka vode na svakom od njih. Postupak mjerenja je isti za oba navedena uređaja.

Postupak mjerenja:

1. Stavljanje uzorka vode u staklenu epruveticu
2. Brisanje epruvetice kako bi se ulonile eventualne kapljice i vlakna sa stakla
3. Stavljanje epruvetice u predviđeno mjesto na uređaju
4. Očitavanje rezultata na digitalnom displeju

Analiza ponovljivosti mjerenja mutnoće [4.]:

	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 4. Analiza ponovljivosti mjerenja mutnoće

### Turbidimeter 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:

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

### Turbidimeter 2100AN

Srednja vrijednost:

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

Standardna pogreška:

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

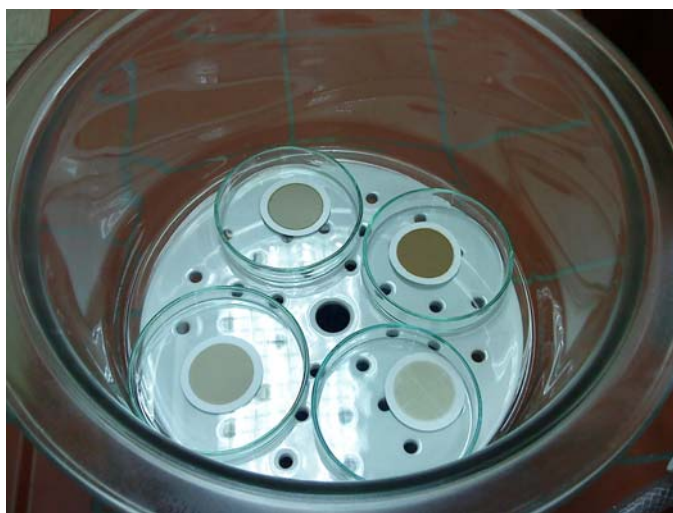
Relativna standardna pogreška:

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

Iz navedene se analize vidi da je relativna standardna pogreška uređaja 2100AN mnogo manja, te će se u analizi rezultata prikazivati mutnoće mjerene ovim uređajem.

### 3.3.2. Mjerenje ukupnog sadržaja suspendiranih tvari

Ova metoda se temelji na filtraciji određene količine vode kroz membranu na kojoj se nakupljaju suspendirane tvari. Vaganjem membrane prije i nakon filtracije dobiva se ukupni sadržaj suspendiranih tvari u vodi. Obično se izražava u mg/L. Prije vaganja posudice se moraju temeljito očistiti i oprati demineraliziranom vodom, te dobro osušiti kako ne bi došlo do pogreške u mjerenju zbog zaostalih kapljica ili nečistoća. Membrana se pincetom oprezno stavlja u pripremljenu posudicu da ne dođe do njenog oštećenja ili onečišćenja. U našem su ispitivanju korištene membrane GF-6. Preciznom se vagom izvaže masa posudice i membrane, te se zatim pristupa filtriranju vode. U izvlačenju vode kroz membranu nam pomaže vakuum pumpa bez koje bi postupak trajao jako dugo ili bi bio neizvediv u slučaju ispitivanja vode visoke zamućenosti. Nakon filtracije membrane se moraju osušiti kako vlaga u membrani ne bi utjecala na rezultat. Sušenje se odvija u sušioniku u trajanju od dva sata na temperaturi od 105 °C. Hlađenje membrana i posudica se vrši u eksikatoru (Slika 8.) koji sprečava upijanje vlage iz zraka tijekom hlađenja.



Slika 8. Eksikator

Nakon hlađenja membrane i posudice se ponovno važu, te se iz razlike u masi prije i nakon filtracije izračunava ukupni sadržaj suspendiranih tvari.

Određivanje ukupnog sadržaja suspendiranih tvari:

$$SS = \frac{M_2 - M_1}{V} \cdot 1000 \text{ [mg/L]}$$

Analiza ponovljivosti mjerenja ukupnog sadržaja suspendiranih tvari [4.]:

Suspendirane tvari	Profiltrirana količina vode V [L]	Masa prije filtracije M <sub>1</sub> [g]	Masa nakon filtracije M <sub>2</sub> [g]	Suspendirane tvari SS [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 5. Analiza ponovljivosti mjerenja ukupnog sadržaja suspendiranih tvari

Srednja vrijednost:

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

Standardna pogreška:

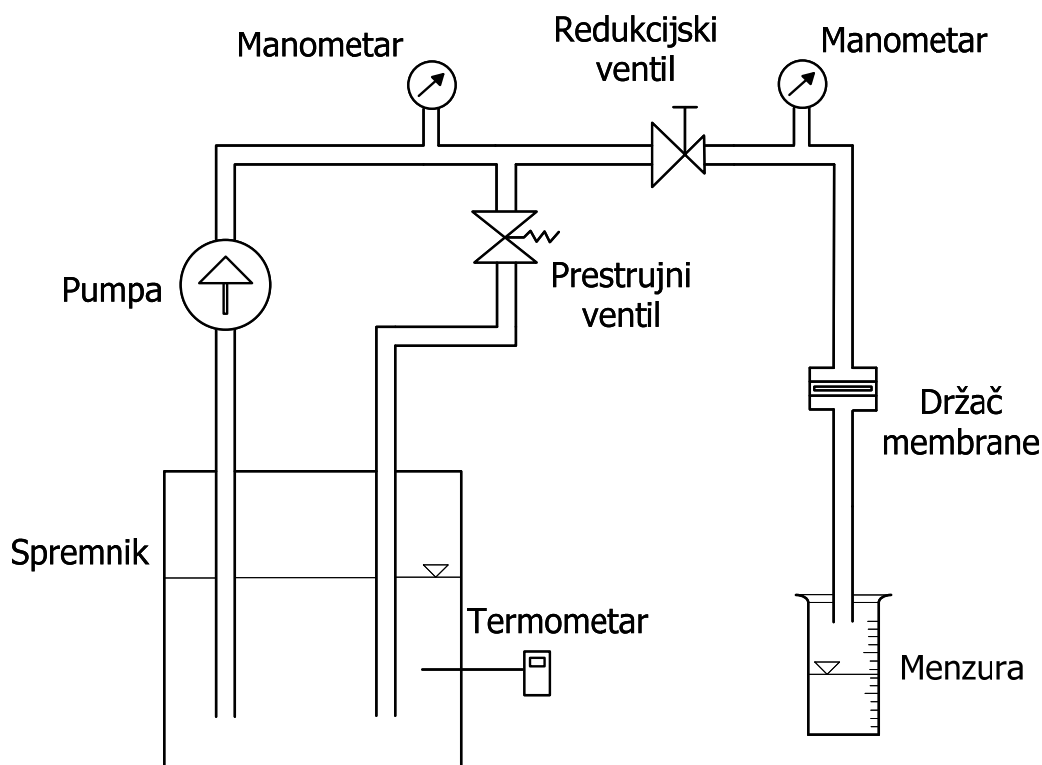
$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} = 0,01485$$

Relativna standardna pogreška:

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

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

Svi dijelovi koji su u doticaju s vodom moraju biti izrađeni od nehrđajućeg čelika visoke kvalitete, plastike ili stakla da se spriječi kontaminacija korozivnim česticama.



Slika 9. Shema SDI uređaja

Postupak mjerenja:

Postupak se temelji na mjerenju vremena potrebnog za protok određene količine sirove vode kroz membranu veličine pora 0,45 mikrometara i promjera 47 milimetara 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.

1. Spojiti opremu prema shemi
2. Spojiti opremu na izvor sirove vode
3. Podesiti regulator tlaka na 2,1 bar
4. Temperatura vode ne smije varirati više od  $\pm 1^\circ\text{C}$  tokom testa
5. Provjeriti dali u sustavu nema zaostalog zraka
6. Na izlaz staviti umjerenu posudu od 500 mililitara
7. U potpunosti otvoriti kuglasti ventil i mjeriti vrijeme potrebno za prikupljanje 100 i 500 mililitara vode
8. Ponoviti mjerenje nakon 5, 10 i 15 minuta kontinuirane filtracije
9. Ako je vrijeme potrebno za prikupljanje 100 mililitara veće od 60 sekundi, onečišćenje membrane će biti oko 90% pa nije potrebno nastaviti test
10. Na kraju testa izmjeriti temperaturu vode kako bi provjerili dali je u dopuštenim granicama

Proračun SDI:

$$P30 = \left( \frac{T_f - T_i}{T_f} \right) \cdot 100 \quad [5.]$$

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

P30 – čepljenje membrane na tlaku 30 psi (2,1 bar)

Tt – ukupno vrijeme trajanja testa [min]

(obično 15, ali može biti i manje ako se desi 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

Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa [4.]:

Sava 2 a 100 ml	Vrijeme [s]	Temperatura [°C]
Početak	16	20
2 min	34	20
4 min	55	21

Tablica 6. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak a)

$$P30 = \left( \frac{55 - 16}{55} \right) \cdot 100 = 70,91\%$$

$$SDI = \frac{70,91}{4} = 17,7$$

Sava 2 b 100 ml	Vrijeme [s]	Temperatura [°C]
Početak	17	21
2 min	39	22
4 min	67	22

Tablica 7. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak b)

$$P30 = \left( \frac{67 - 17}{67} \right) \cdot 100 = 74,63\%$$

$$SDI = \frac{74,63}{4} = 18,7$$

Sava 2 c 100 ml	Vrijeme [s]	Temperatura [°C]
Početak	16	22
2 min	43	22
4 min	60	23

Tablica 8. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa (uzorak c)

$$P30 = \left( \frac{60 - 16}{60} \right) \cdot 100 = 73,33\%$$

$$SDI = \frac{73,33}{4} = 18,3$$

	SDI
Sava 2 a	17,7
Sava 2 b	18,7
Sava 2 c	18,3

Tablica 9. Analiza ponovljivosti mjerenja SDI indeksa

Srednja vrijednost:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = 18,2$$

Standardna pogreška:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n(n-1)}} = 0,085$$

Relativna standardna pogreška:

$$r = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{X}} \cdot 100\% = 0,467\%$$



### 3.4. Mjerni rezultati

#### 3.4.1. 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 10. 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 11. 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 12. 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 13. Mutnoća nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije

### 3.4.2. 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 14. 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 15. 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 16. 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 17. Sadržaj suspendiranih tvari nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije

### 3.4.3. 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 19. SDI indeks sirovih voda

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

Tablica 18. 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 20. 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 21. SDI indeks nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije

## 4. ANALIZA MJERNIH REZULTATA

### 4.1. Svojstva vode prije i nakon postupaka predobrade

#### 4.1.1. 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 22. Kvaliteta sirove vode

#### 4.1.2. 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 23. Svojstva vode nakon izravne filtracije

**4.1.3. Koagulacija, flokulacija , filtracija**

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

Tablica 24. Svojstva vode nakon koagulacije, flokulacije, filtracije

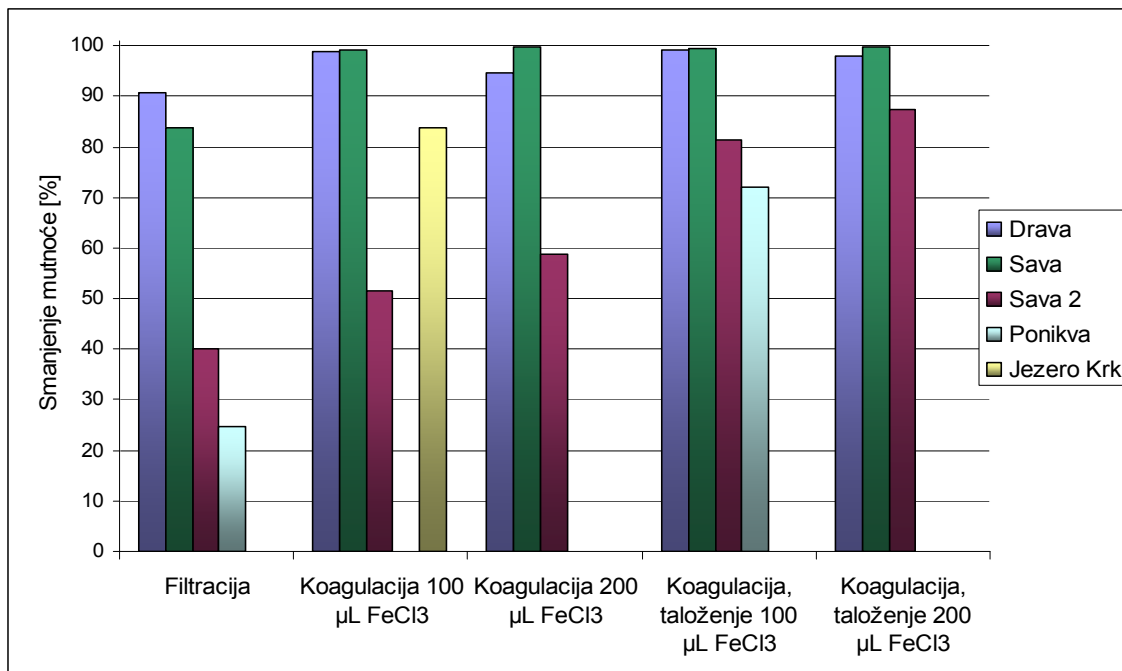
**4.1.4. Koagulacija, flokulacija , taloženje, filtracija**

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

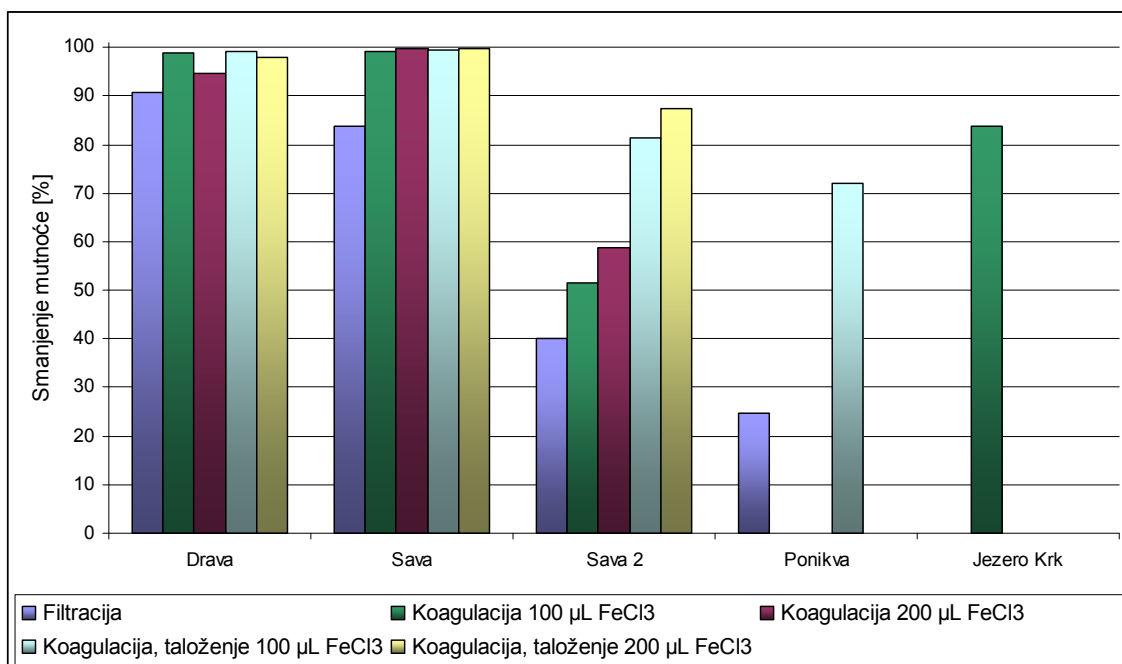
Tablica 25. Svojstva vode nakon koagulacije, flokulacije, taloženja, filtracije

## 4.2. Utjecaj postupaka predobrade na svojstva vode

### 4.2.1. Smanjenje mutnoće

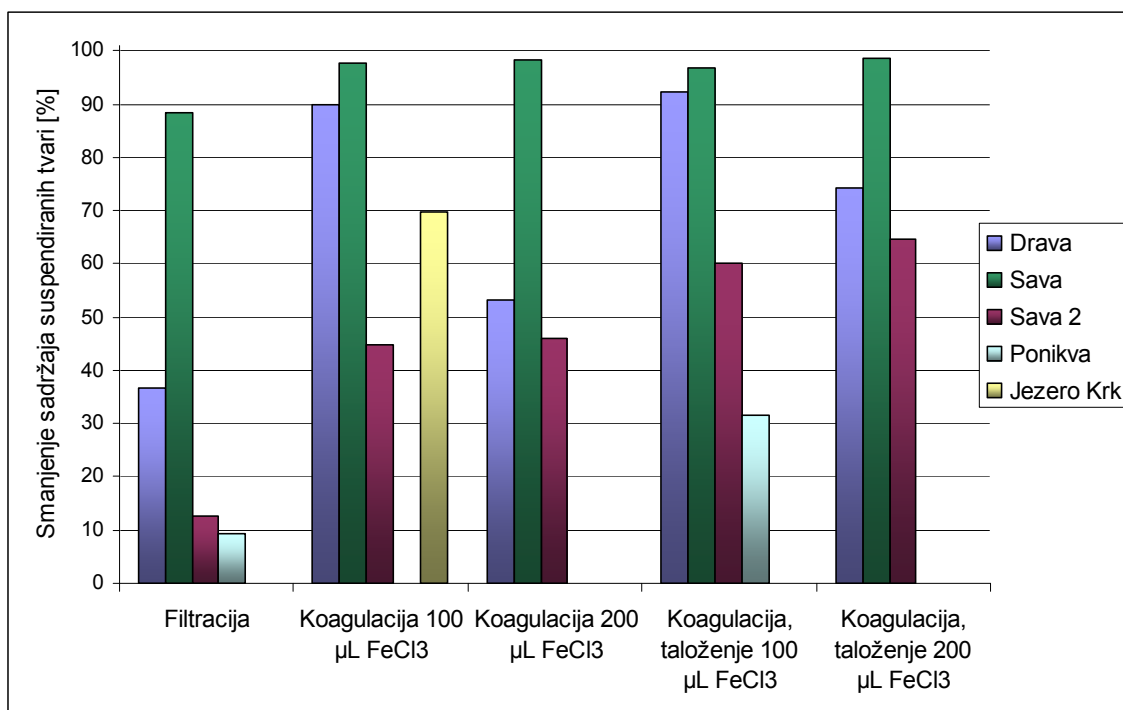


Dijagram 1. Smanjenje mutnoće ovisno o predobradi

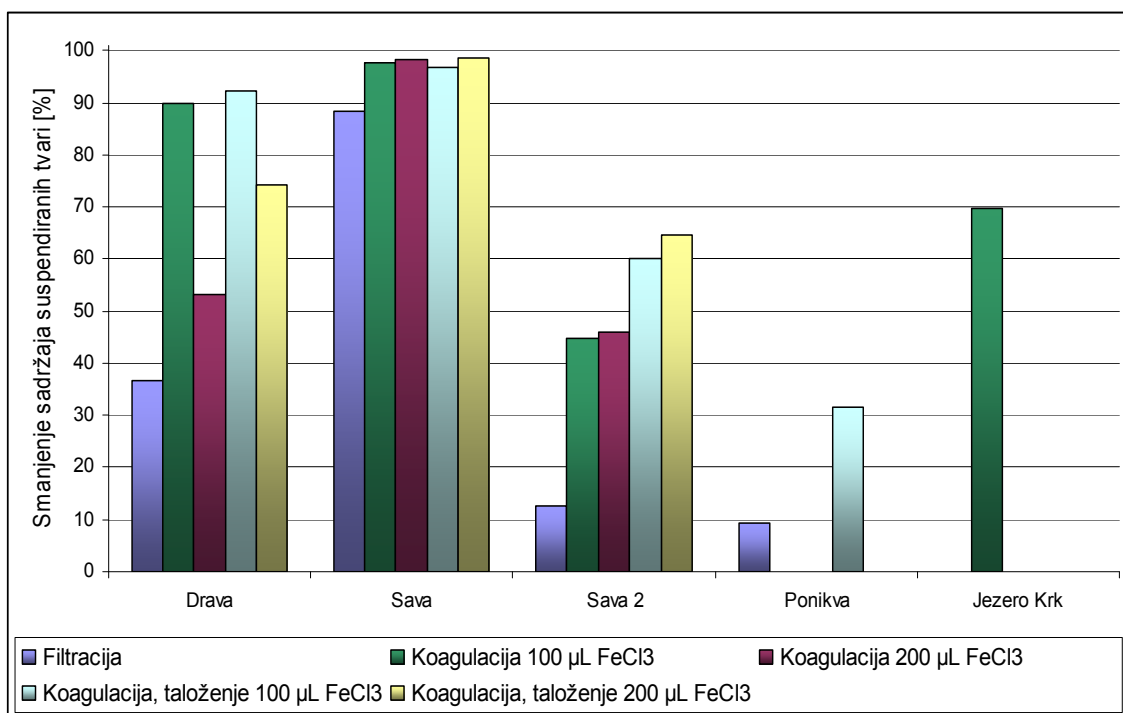


Dijagram 2. Smanjenje mutnoće za svaku od voda

#### 4.2.2. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari



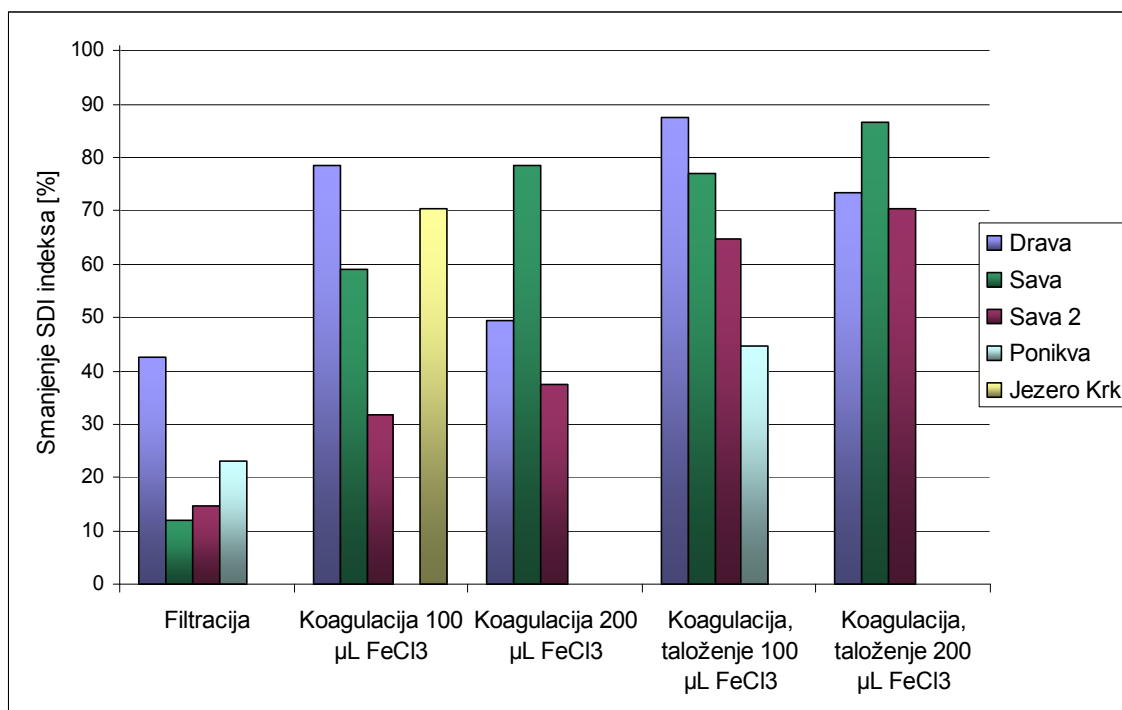
Dijagram 3. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari ovisno o predobradi



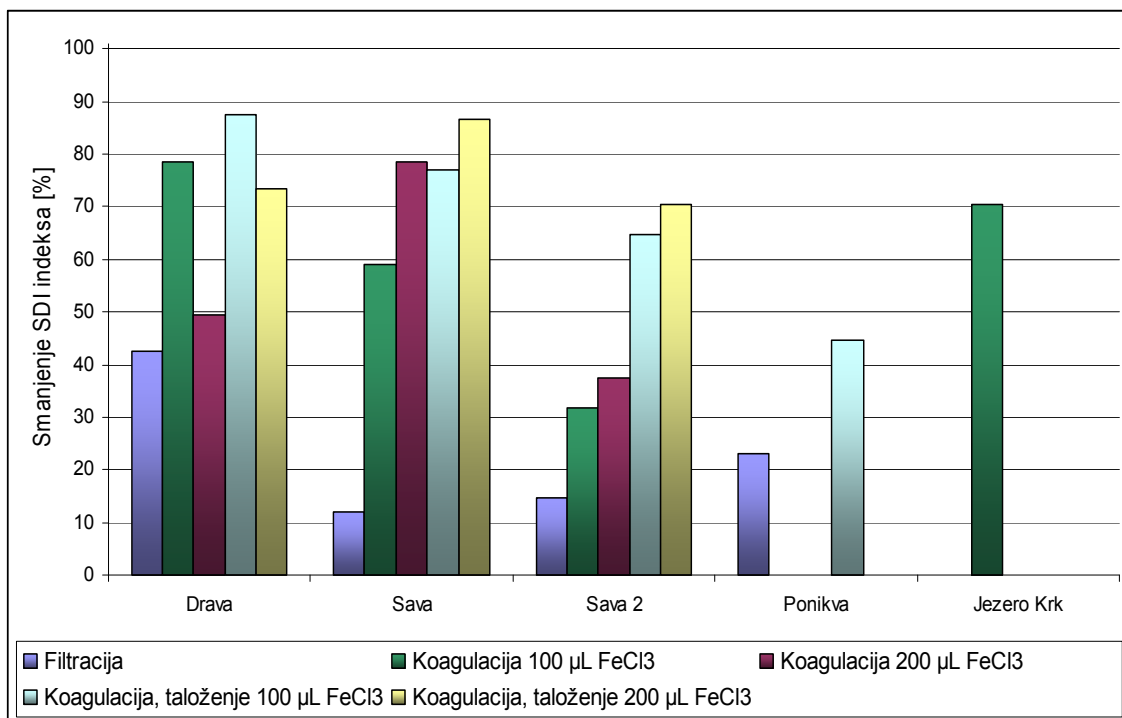
Dijagram 4. Smanjenje sadržaja suspendiranih tvari za svaku od voda



### 4.2.3. Smanjenje SDI indeksa

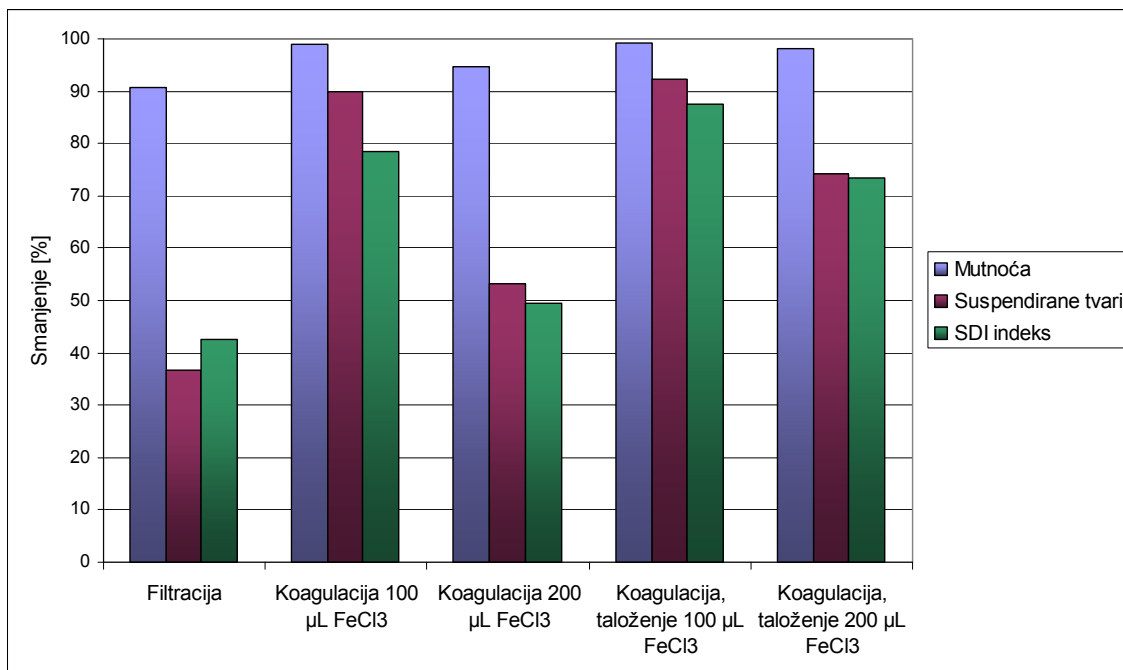


Dijagram 5. Smanjenje SDI indeksa ovisno o predobradi

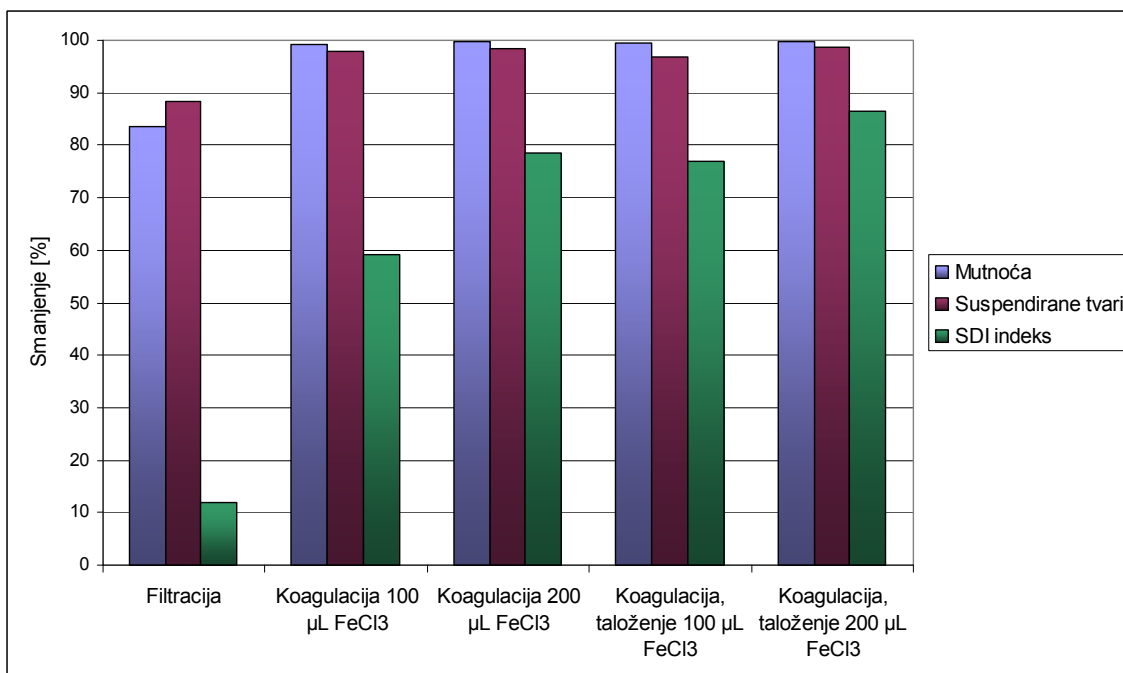


Dijagram 6. Smanjenje SDI indeksa za svaku od voda

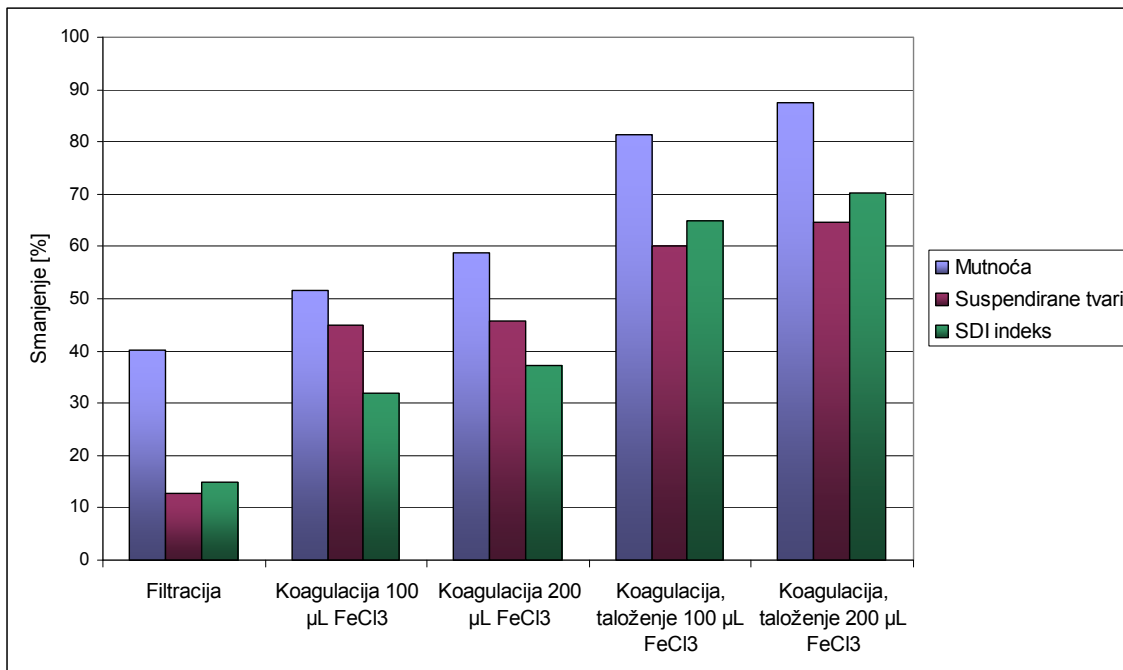
### 4.3. Međusobni odnosi mjerenih veličina



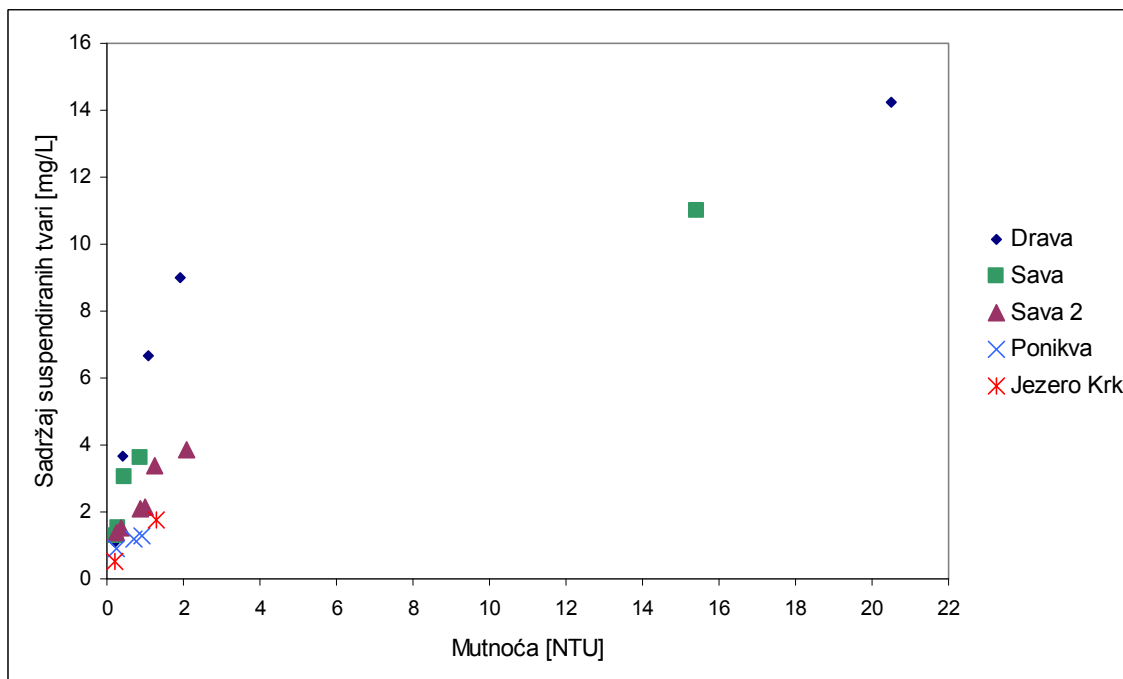
Dijagram 7. Odnosi mjerenih veličina Drava



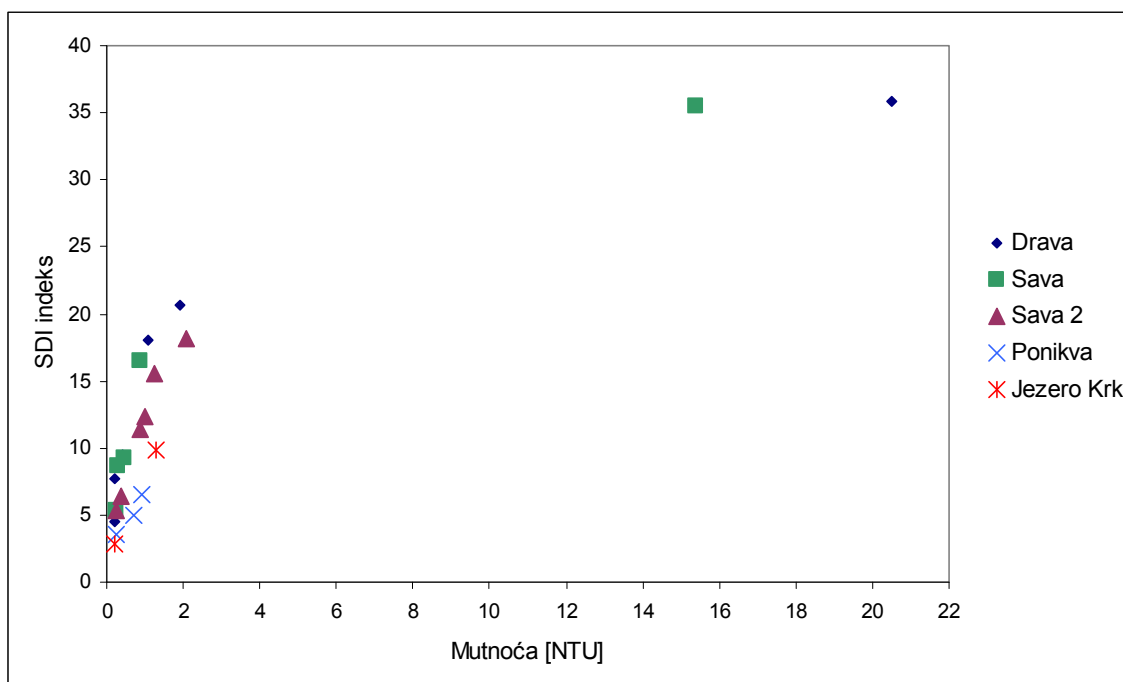
Dijagram 8. Odnosi mjerenih veličina Sava



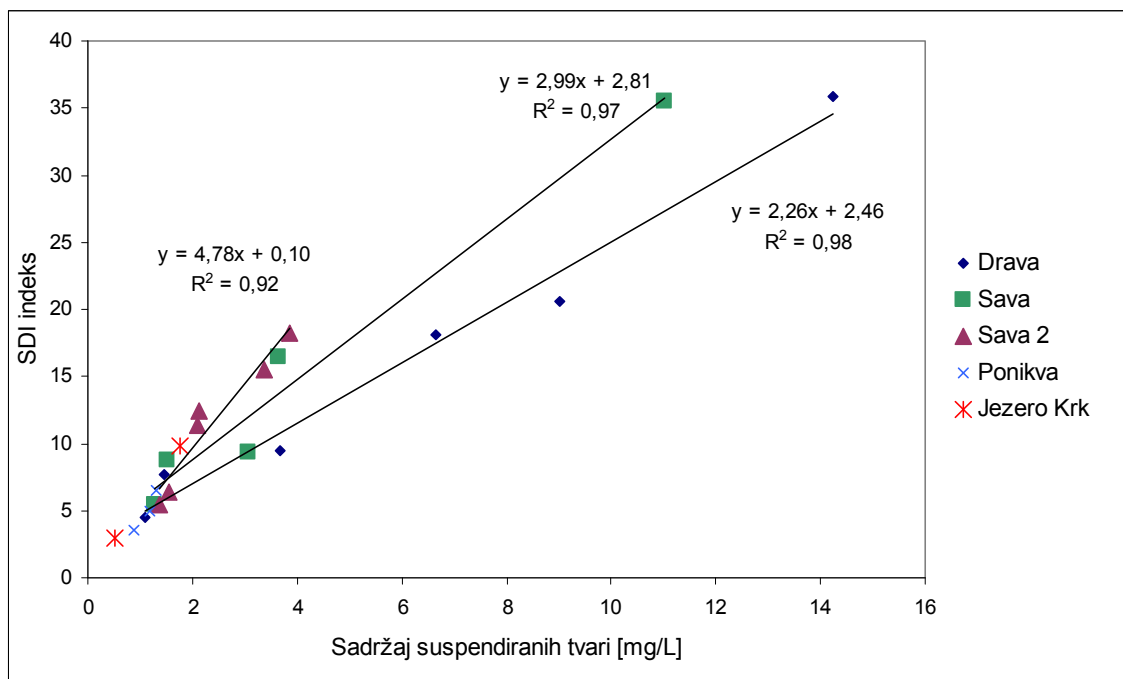
Dijagram 9. Odnosi mjerenih veličina Sava 2



Dijagram 10. Odnos sadržaja suspendiranih tvari i mutnoće



Dijagram 11. Odnos SDI indeksa i mutnoće



Dijagram 12. Odnos SDI indeksa i sadržaja suspendiranih tvari

## 5. ZAKLJUČAK

Ovo je ispitivanje koncipirano tako da se nakon brojnih mjerenja analiza rezultata može vršiti u dva smjera. Jedan smjer se odnosi na utjecaj određenog postupka predobrade na svojstva vode, a drugi na međusobni odnos mjerenih veličina.

### **Analiza rezultata s obzirom na vrstu predobrade:**

Ako se usredotočimo na SDI indeks kao relevantan parametar u ovom ispitivanju vidljivo je da efikasnost svakog od provedenih postupaka predobrade značajno ovisi o vrsti vode. (Dijagram 5.)

Efikasnost filtracije najveća je kod Drave te iznosi 42% što je znatno više u odnosu na Savu ili Ponikvu.

Uzrok ovakvog odstupanja krije se u strukturi suspendiranih čestica koja je različita za svaku od voda.

Za efikasnost postupka filtracije ključna je veličina suspendiranih čestica.

Veoma sitne čestice prolaze između zrnaca pijeska, te uzrokuju čepljenje membrane budući da je veličina pora membrane za SDI test svega 0,45  $\mu\text{m}$ .

Iz navedenog se zaključuje da je stupanj disperzije Save i Ponikve mnogo veći u odnosu na Dravu, te izravna filtracija za njih ne daje zadovoljavajuće rezultate.

U vidu povećanja veličine suspendiranih čestica koriste se postupci koagulacije i flokulacije.

Ovi postupci daju bolje rezultate u odnosu na izravnu filtraciju, ali su vidljiva znatna odstupanja s obzirom na primjenu doze koagulanta od 100 i 200  $\mu\text{L}$   $\text{FeCl}_3$ . (Dijagram 6.)

Drava daje 30% bolje rezultate u slučaju primjene doze od 100  $\mu\text{L}$   $\text{FeCl}_3$ , dok za istu dozu Sava daje 20% lošije rezultate.

Ova razlika nameće nužnost optimiranja doze koagulanta za pojedinu vrstu vode koja se namjerava obrađivati ovim postupkom.

Ako se ovi postupci koriste u kombinaciji sa taloženjem ostvaruje se dodatno povećanje efikasnosti od oko 10%, te se osjetljivost na različite doze koagulanta upola smanjuje. (Dijagram 6.)

### **Međusobni odnos mjerenih veličina:**

Ako usporedimo promjene mjerenih veličina, uočavamo da pojedini postupak predobrade različito djeluje na svaku vodu i na svaku od veličina.

Usporedbom promjene mjerenih veličina za Dravu, zamjećujemo znatno odstupanje promjene mutnoće od promjene sadržaja suspendiranih tvari i SDI indeksa. (Dijagram 7.)

Ovi rezultati potvrđuju činjenicu da vode veoma male mutnoće mogu imati visoki SDI indeks. (Npr. morska voda)

Kada ove dvije veličine usporedimo na zasebnom dijagramu, uočavamo prethodno spomenuti nelinearni odnos. (Dijagram 11.)

Krivulje ovisnosti ovih dviju veličina približno su logaritamskog oblika.

Za SDI indeks i sadržaj suspendiranih tvari odnos je poprilično linearan za svaku od ispitanih voda. (Dijagram 12.)

Koeficijent nagiba pravca je različit za svaki uzorak vode, jer potencijal čepjenja membrane ovisi o strukturi suspendiranih tvari, koja je različita i specifična za svaku vodu.

Upravo zbog ove činjenice nemoguće je izravno međusobno preračunavanje ovih veličina, već se pri projektiranju sustava moraju neovisno izmjeriti za tu vodu koju se namjerava obrađivati membranskim sustavom.

## 6. LITERATURA

- [1.] <http://www.watertech.com>
- [2.] <http://www.lenntech.com>
- [3.] Asano, T. „Water Reuse, Metcalf & Eddy“, New York, 2007.
- [4.] <http://www.pharma.hr>
- [5.] Baker, R. „Membrane Technology and Applications, John Wiley & Sons“, Chichester, 2004.