Utjecaj procesnih parametara na uklanjanje arsena i mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom

Kvaternik, Vesna

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, FACULTY OF FOOD TECHNOLOGY / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:109:768329

Rights / Prava: Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International/Imenovanje-Nekomercijalno-Bez prerada 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

REPOZITORIJ PTFOS PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK dabar

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Food Technology Osijek

zir.nsk.hr

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

PREHRAMBENO-TEHNOLOŠKI FAKULTET OSIJEK

Vesna Kvaternik

UTJECAJ PROCESNIH PARAMETARA NA UKLANJANJE ARSENA I MANGANA IZ VODE KOAGULACIJOM I FLOKULACIJOM

DIPLOMSKI RAD

Osijek, ožujak, 2021.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

DIPLOMSKI RAD

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Prehrambeno-tehnološki fakultet Osijek
Zavod za primijenjenu kemiju i tehnologiju
Katedra za kemiju i ekologiju
Franje Kuhača 20, 31000 Osijek, Hrvatska

Diplomski sveučilišni studij Procesno inženjerstvo

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti
Znanstveno polje: Prehrambena tehnologija
Nastavni predmet: Tehnologija vode i obrada otpadnih voda
Tema rada je prihvaćena na (6) redovitoj sjednici Fakultetskog vijeća Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek u akademskoj godini 2019./2020., održanoj dana 30. travnja 2020.
Mentor: izv. prof. dr. sc. Mirna Habuda-Stanić
Pomoć pri izradi: dr.sc. *Željka Romić*

Utjecaj procesnih parametara na uklanjanje arsena i mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom

Vesna Kvaternik, 0113139884

Sažetak: Arsen, dobro poznat po svojoj toksičnosti, prisutan je u prirodnim vodama u mnogim područjima svijeta, pa tako i u podzemnim vodama istočne Hrvatske. Osim toksičnosti spojeva arsena, posebno arsenita, arsen stvara i veliki ekološki problem te je nužna obrada sirove vode prije distribucije. Također, karakteristika podzemnih voda istočne Hrvatske su i povećane koncentracije mangana, organskih tvari, željeza i amonijaka. Prisutnost mangana u vodi ne predstavlja veliki zdravstveni rizik za potrošača, no u velikim količinama negativno utječe na organoleptička svojstva vode. Najčešće primjenjivana metoda obrade vode je koagulacija i flokulacija, pri čemu dolazi do destabilizacije, aglomeriranja i taloženja čestica suspendiranih ili otopljenih tvari. Uspješnost koagulacije i flokulacije ovisi o vrsti koagulanta te njegovoj koncentraciji. U ovom radu ispitana je mogućnost uklanjanja arsena i mangana metodom koagulacije i flokulacije ovisno o vrsti uzorka sirove vode, temperaturi vode te koncentraciji doziranog koagulanta. Ispitivanje je provedeno uzorcima aerirane podzemne vode grada Osijeka, uzorcima vode rijeke Drave te njihovim mješavinama. Obrada vode provedena je uz predoksidaciju uzoraka s $KMnO_4$ te doziranjem koagulanta $FeCl_3$ i flokulanta polielektrolita Aquaflock 2530. Uz mjerenje početne i završne koncentracije arsena i mangana, učinak obrade određen je praćenjem vrijednosti i koncentracija suspendiranih tvari, boje, vodljivosti i ukupne tvrdoće

Ključne riječi: podzemna voda, arsen, mangan, koagulacija i flokulacija

Rad sadrži: 86 stranica
32 slika
29 tablica
18 literaturnih referenci

Jezik izvornika: hrvatski

Sastav Povjerenstva za ocjenu i obranu diplomskog rada i diplomskog ispita:

1.	prof. dr. sc. Lidija Jakobek Barron	predsjednik
2.	izv. prof. dr. sc. Mirna Habuda-Stanić	član-mentor
3.	izv. prof. dr. sc. Natalija Velić	član
4.	izv. prof. dr. sc. Dajana Gašo-Sokač	zamjena člana

Datum obrane:

Rad je u tiskanom i elektroničkom (pdf format) obliku pohranjen u Knjižnici Prehrambeno-tehnološkog fakulteta Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

GRADUATE THESIS

University Josip Juraj Strossmayer in Osijek
Faculty of Food Technology Osijek
Department of Applied Chemistry and Ecology
Subdepartment of Chemistry and Ecology
Franje Kuhača 20, HR-31000 Osijek, Croatia

Graduate program Process Engineering

Scientific area: Biotechnical sciences
Scientific field: Food technology
Course title: Water Technology and Wastewater Treatment
Thesis subject was approved by the Faculty of Food Technology Osijek Council at its session no. VI held on 30 April 2020
Mentor: *Mirna Habuda-Stanić*, PhD, associate prof.
Technical assistance: *Željka Romić*, PhD

The Effect of Operating Conditions on the Removal of Arsenic and Manganese from Water by Coagulation and Flocculation

Vesna Kvaternik, 0113139884

Summary: Arsenic, well known for its toxicity, is present in natural waters in many parts of the world, including the groundwater of eastern Croatia. In addition to the toxicity of arsenic compounds, especially arsenite, arsenic also creates a major environmental problem and it is necessary to treat raw water before distribution. Also, the characteristics of groundwater in eastern Croatia are increased concentrations of manganese, organic matter, iron and ammonia. The presence of manganese in water does not pose a major health risk to the consumer, but in large quantities it has detrimental effect on the organoleptic properties of water. The most commonly used method of water treatment is coagulation and flocculation, which destabilizes, agglomerates and precipitates particles of suspended or dissolved substances. The success of coagulation and flocculation depends on the type of coagulant and its concentration. In this work, the possibility of arsenic and manganese removal by coagulation and flocculation method depending on the type of raw water sample, water temperature and concentration of dosed coagulant was investigated. The test was performed with samples of aerated groundwater of the city of Osijek, water samples of the Drava River and their mixtures. Water treatment was performed with pre-oxidation of samples with $KMnO_4$ and dosing of $FeCl_3$ coagulant and polyelectrolyte Aquaflock 2350 flocculant**.**

Key words: groundwater, arsenic, manganese, coagulation and flocculation

Thesis contains: 86 pages
32 figures
29 tables
18 references

Original in: Croatian

Defense committee:

1. *Lidija Jakobek Barron*, PhD, full prof. — chair person
2. *Mirna Habuda-Stanić*, PhD, associate prof. — supervisor
3. *Natalija Velić*, PhD, associate prof. — member
4. *Dajana Gašo-Sokač*, PhD, associate prof. — stand-in

Defense date:

Printed and electronic (pdf format) version of thesis is deposited in Library of the Faculty of Food Technology Osijek, Franje Kuhača 20, Osijek.

Sadržaj

1. UVOD 1

2. TEORIJSKI DIO 3

2.1. ARSEN U PODZEMNIM VODAMA ISTOČNE HRVATSKE 4

2.2. MANGAN U PODZEMNIM VODAMA ISTOČNE HRVATSKE 5

2.3. VODOOPSKRBNI SUSTAV GRADA OSIJEKA 7

2.4. POSTUPCI UKLANJANJA ARSENA IZ VODE 8

2.4.1. Koagulacija i flokulacija 8

2.4.2. Metoda ionske izmjene 11

2.4.3. Adsorpcijske metode 12

2.4.4 Membranske metode 13

3. EKSPERIMENTALNI DIO 15

3.1. ZADATAK 16

3.2. MATERIJALI I METODE 16

3.2.1. Otopine i kemikalije 16

3.2.2. Uzorci površinske i podzemne voda grada Osijeka 17

3.2.3. Mjerni uređaji eksperimentalnog rada 21

3.3. UKLANJANJE ARSENA I MANGANA IZ VODE KOAGULACIJOM I FLOKULACIJOM 21

3.3.1. Metoda određivanja arsena 23

3.3.2. Metoda određivanja mangana 23

3.4. ODREĐIVANJE PROCESNIH PARAMETARA POVRŠINSKE I PODZEMENE VODE KOAGULACIJOM I FLOKULACIJOM 244

3.4.1 Mjerenje mutnoće 24

3.4.2. Mjerenje boje 24

3.4.3. Mjerenje vodljivosti 25

3.4.4. Određivanje ukupne tvrdoće 25

3.4.5. Određivanje suspendiranih tvari 26

4. REZULTATI I RASPRAVA..... 27

4.1. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UKLANJANJE ARSENA I MANGANA PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE 28

4.2. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAV VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UČINKOVITOST UKLANJANJA SUSPENDIRANIH TVARI PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE.....43

4.3. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UČINKOVITOST UKLANJANJA BOJE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE 53

4.4. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA VODLJIVOST PRI OBRADI VODE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE.....62

4.5. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UKUPNU TVRDOĆU PRI OBRADI VODE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE 72

5. ZAKLJUČCI 83

6. LITERATURA 86

Popis oznaka, kratica i simbola

EDTA Etilen-diamin-tetraoctena kiselina

MF Mikrofiltracija

M.D.K. Maksimalno dopuštena koncentracija

NF Nanofiltracija

RO Reverzna osmoza

UT Ultrafiltracija

1. UVOD

Glavni izvor vode za ljudsku potrošnju su podzemne vode. Kakvoća podzemnih voda ovisi o geološkim procesima, kao što su erozija tla, otapanje minerala te vulkanska aktivnost. Također, kakvoća voda ovisi i o fizikalnim i kemijskim te mikrobiološkim značajkama vodonosnika i njihove neposredne podine.

Podzemne vode istočne Hrvatske imaju povećane koncentracije željeza, amonijaka, organskih tvari, mangana i arsena te zbog toga ne zadovoljavaju standarde zdravstvene ispravnosti vode za ljudsku potrošnju.

Najveći problem u preradi podzemne vode grada Osijeka predstavljaju povišene koncentracije arsena. Njegova toksičnost i kancerogenost predstavlja značajan zdravstveni i ekološki problem diljem svijeta. Učinkovite metode za uklanjanje arsena i mangana iz vode za ljudsku potrošnju su taložne metode, metode ionske izmjene, adsorpcijske i membranske metode. Najzastupljenija metoda za obradu vode za piće je taložna metoda koja se zasniva na procesu koagulacije i flokulacije. Učinkovitost uklanjanja arsena, kao i njegova toksičnost, ovisi o obliku arsena u kojem je prisutan u vodi. Oksidacijom trovalentnog arsenita u peterovalentni arsenat povećava se učinkovitost uklanjanja arsena jer se spojevi arsenata lakše izdvajaju iz vode.

U ovom radu ispitano je uklanjanje arsena i mangana iz površinske vode crpilišta Pampas (rijeka Drava) te iz podzemne vode vodocrpilišta Vinogradi procesom koagulacije i flokulacije.

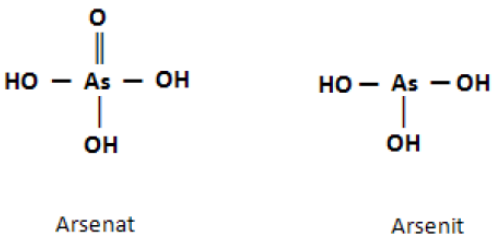
Istraživanja provedena u sklopu ovog diplomskog rada usmjerena su k određivanju optimalne temperature, kemijskog sastava i koncentracije koagulanta s ciljem postizanja što bolje kakvoće izlazne vode za ljudsku potrošnju.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. ARSEN U PODZEMNIM VODAMA ISTOČNE HRVATSKE

Arsen je 20. najrasprostranjeniji element u Zemljinoj kori i široko je rasprostranjen u cijeloj prirodi u obliku različitih organskih i anorganskih spojeva. Također, arsen je prisutan i u namirnicama poput mesa, ribe, žitarica, voća, povrća i vode za ljudsku potrošnju, a najznačajniji put unosa anorganskog arsena u ljudski organizam je voda za ljudsku potrošnju, dok su najčešći izvor organskog arsena školjke i ribe (Habuda-Stanić, 2011.). Pojava arsena u prirodi je posljedica erozije tla i ispiranja minerala (Song i sur., 2014.). Različita antropološka djelovanja, poput primjene herbicida i pesticida u poljoprivredi, taljenja ruda, odlaganja industrijskog kemijskog otpada, emisija plinova nastala sagorijevanjem fosilnih goriva i dr. rezultiraju povećanjem udjela arsena u podzemnim vodama (Romić, 2009.).

Ovisno o oksido-redukcijskim uvjetima, arsen se u prirodi javlja u četiri oksidacijska oblika arsin (-3), arsen (0), arsenit (+3) i arsenat (+5). Na **Slici 1** prikazane su strukturne formule peterovalentnog i trovalentnog arsena (Habuda-Stanić 2011.)



Slika 1. Strukturna formula peterovalentnog i trovalentnog arsena (Habuda-Stanić 2011.)

Arsen zbog svoje toksičnosti predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje. Oblik arsena i valencijsko stanje određuje razinu toksičnosti. Anorganski oblik arsena je toksičniji od organskog oblika, a arsenit je šezdesetak puta toksičniji od arsenata.

Arsen u podzemnoj vodi formira spojeve peterovalentnog arsenata i trovalentnog arsenita, ovisno o redoks potencijalu i pH vrijednosti. Spojevi trovalentnog arsenita su: H_3AsO_3, H_2AsO_3, $HAsO_3^{2-}$, AsO_3^{3-}, a spojevi peterovalentnog arsenata su: H_3AsO_4, $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$ i AsO_4^{3-} (Leist, 2000; Habuda-Stanić 2011.). U oksidacijskim uvjetima, kakvi su prisutni u površinskim vodama, dominantan je peterovalentni arsen, koji je prisutan uglavnom u oksianionskim

oblicima. Trovalentni arsen je u anoksičnim uvjetima termodinamički stabilan oblik (Jiang, 2001.). Spojevi peterovalentnog arsena prevladavaju u aerobnim uvjetima, dok trovalentni spojevi arsenita prevladavaju u umjereno reducirajućim anaerobnim uvjetima, poput podzemne vode (Viraraghavan i sur., 1999.).

Organski arsen se u prirodnim vodama pojavljuje u koncentracijama manjim od 1 mg/L te nije od velike važnosti u obradi vode za ljudsku potrošnju (Edwards, 1994.).

Arsen je u dubokim podzemnim vodama geološkog podrijetla. Habuda-Stanić i Kuleš su 2002. publicirali rad u kojem su naveli postojanje prekomjernih količina arsena u podzemnim vodama na pravcu Donji Miholjac, Valpovo, Čepin, Vinkovci i Andrijaševci i to u koncentracijama i iznad 500 μg/L. Istraživanjem koncentracije, specijacije i distribucije arsenovih spojeva u vodonosnicima osječkog crpilišta „Vinogradi“ utvrđena je koncentracija arsena iznad 240 μg/L te je utvrđeno da je u podzemnim vodama grada Osijeka dominantan trovalentni oblik anorganskog arsena (Romić, 2009., Habuda-Stanić, 2011.).

Kontaminacija podzemnih i površinskih voda arsenom predstavlja svjetski problem. U Bangladešu je preko 100 milijuna ljudi izloženo zdravstvenom riziku uslijed svakodnevne konzumacije vode za piće s prekomjernim količinama arsena. Također, u Sjedinjenim Američkim Državama više od 350 000 ljudi konzumira vodu koja sadrži više od 50000 μg/L arsena, dok ih se više od 2,5 milijuna opskrbljuje vodom koja ima koncentraciju arsena veću od 25000 μg/L (Song i sur., 2014.). Svjetska zdravstvena organizacija (WHO) je 1993. godine izdala preporuke za sniženje maksimalno dozvoljene koncentracije arsena u vodi za ljudsku potrošnju s tadašnjih 50 μg/L na 10 μg/L (Habuda-Stanić, 2011.). U Hrvatskoj, prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) maksimalno dozvoljena koncentracija arsena u vodi za ljudsku potrošnju iznosi 10 μg/L.

2.2. MANGAN U PODZEMNIM VODAMA ISTOČNE HRVATSKE

Mangan (Mn) je kemijski element 7. skupine elemenata periodnog sustava, atomske mase 54,93 i atomskog broja 25. U zemljinoj kori prema zastupljenosti zauzima 12. mjesto.

Prisutnost mangana u podzemnim vodama je puno češća u odnosu na površinske vode. Mangan, kao i arsen, unesen u organizam može uzrokovati štetne učinke po zdravlje ljudi, a znanstvena istraživanja ukazuju da kod unosa većih koncentracija mangana može doći do oštećenja neurološkog sustava. Uz navedeno, prisutnost mangana u vodi u većim količinama narušava i organoleptička svojstva vode uzrokujući neugodan okus vode te se taloži na vodovodnim cijevima što omogućava rast i razvoj bakterija (Romić, 2009.).

Mangan se lako otapa u razrijeđenim kiselinama, dok se u vodi vrlo sporo otapa. Pri višim temperaturama mangan reagira snažno s halogenidima, kisikom, dušikom, sumporom i ugljikom, a pri sobnoj temperaturi s nemetalima praktički ne reagira (Hem, 2005.).

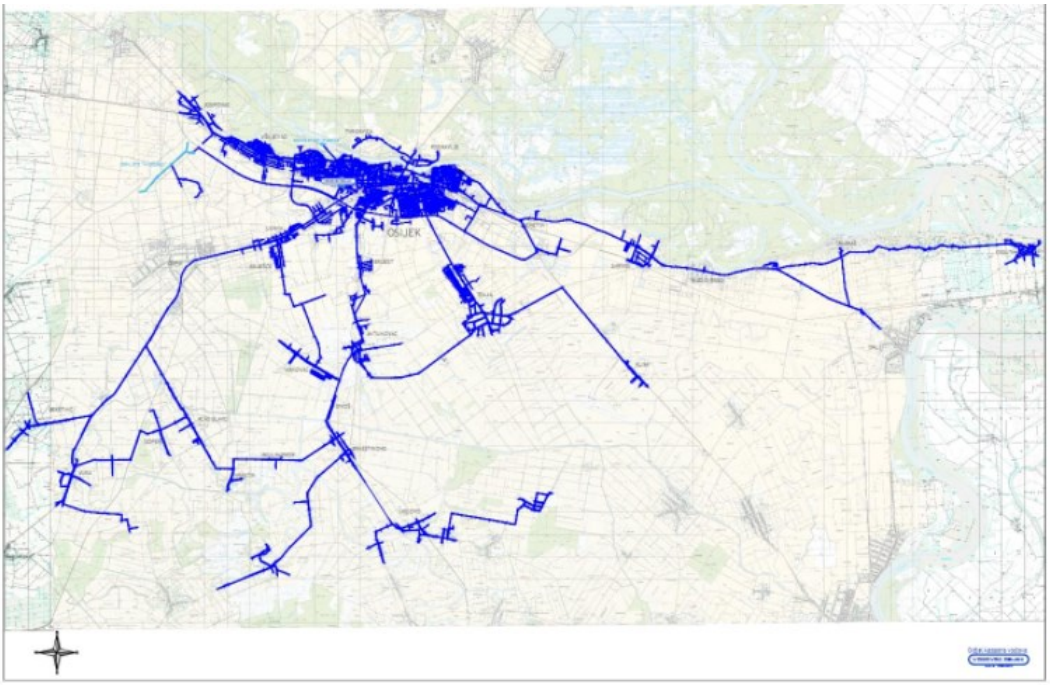
Obzirom na pH vrijednost i redoks potencijal, mangan se u vodama može pojaviti u tri oksidacijska stanja (Mn^{2+}, Mn^{3+}, Mn^{4+}). Mangan se u oksidiranom obliku MnO_2 u vodama pojavljuje kada je koncentracija kisika u vodi povišena i takav oblik mangana je netopljiv a njegova koncentracija u vodi je mala. Najdominantniji oblik mangana je Mn^{2+} koji nastaje pri reduktivnim uvjetima, dok je najnestabilniji oblik Mn^{3+}(Hem, 2005.).

Uklanjanje mangana iz vode provodi se putem oksidacije pri čemu Mn^{2+} oksidira u Mn^{4+} te se istaloži u obliku manganova dioksida. U cilju oksidacije mangana, u vodu se dozira $KMnO_4$, klor ili preparati na bazi klora (Lončarić, 2010.).

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) maksimalno dozvoljena koncentracija mangana iznosi 50 µg/L.

2.3. VODOOPSKRBNI SUSTAV GRADA OSIJEKA

Vodoopskrbni sustav grada Osijeka, kojim upravlja isporučitelj vodne usluge Vodovod Osijek d.o.o., obuhvaća 741 km vodovodne mreže i više od 37 000 mjernih mjesta za očitavanje potrošnje vode (**Slika 2**) (https://vodovod.com/vodne-usluge/vodoopskrba/).



Slika 2. Vodoopskrbni sustav grada Osijeka

Vodoopskrbne zone na području Osječko-baranjske županije su: Đakovo, Našice, Donji Miholjac, Đurđenovac, Belišće, Valpovo, Čepin, Osijek, Darda, Dalj i Beli Manastir.

Na području županije postoje 24 vodocrpilišta od kojih je 14 vodocrpilišta javno, a 10 lokalno. Na 23 vodocrpilišta zahvaća se podzemna voda, a na preostalim crpilištima zahvaća se površinska voda. Vodozahvat površinske vode nalazi se na rijeci Dravi.

Crpilište „Vinogradi“ nalazi se na udaljenosti od 10 km od grada Osijeka i najveće je crpilište u Republici Hrvatskoj gdje se podzemna voda crpi iz 18 zdenaca dubine od oko 150 m.

Površinska i podzemna voda se daljnje obrađuju u Vodovodu Osijek kako bi se osigurala zdravstvena ispravnost vode za piće i sigurnost potrošača (Kralj, 2017.).

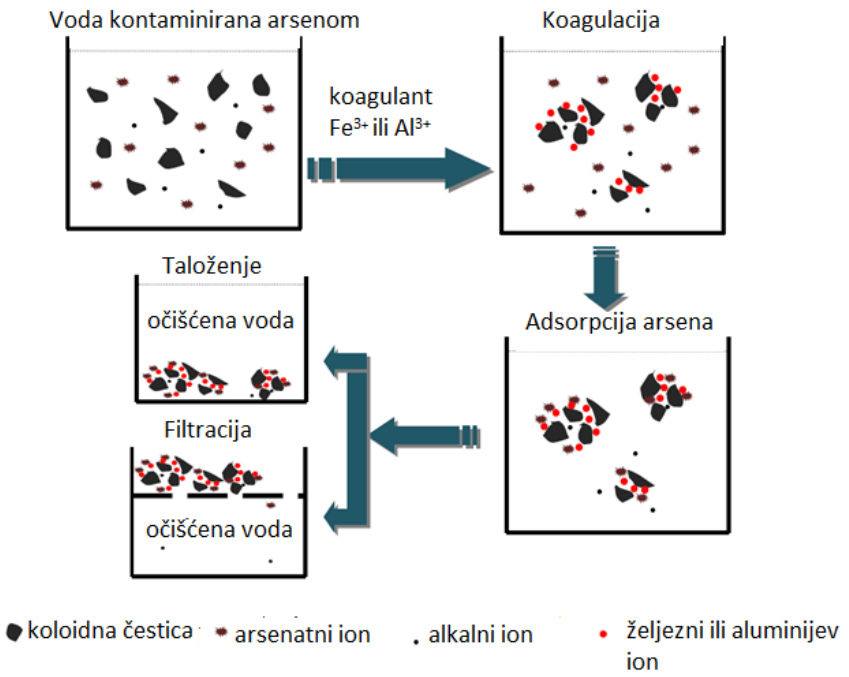
2.4. POSTUPCI UKLANJANJA ARSENA IZ VODE

2.4.1. Koagulacija i flokulacija

Najčešća taložna metoda koja se primjenjuje u procesima prerade voda je metoda koagulacije i flokulacije s filtracijom. Navedenom metodom se uklanjaju otopljeni koloidi i suspendirane tvari promjenom njihovih fizikalnih i/ili kemijskih svojstava pri čemu se koloidi i suspendirane tvari pretvaraju u flokule koje se filtracijom lako uklanjaju iz vode (Habuda-Stanić, 2011.).

Suspendirane i otopljene nepoželjne sastojke sirove vode karakterizira uglavnom negativni električni površinski naboj i male dimenzije. Takav naboj čini čestice izrazito stabilnima u vodenom mediju jer molekule vode, koje ih okružuju, posjeduju suprotni naboj. Upravo zbog toga osnovni cilj koagulacije je destabilizacija i aglomeracija suspendiranih i otopljenih tvari. U tu se svrhu dodaju kemijski reagensi odnosno koagulanti. Njihova uloga je smanjiti negativan površinski naboj čestice, tj. neutralizirati površinski naboj nakon čega otopljene čestice počinju aglomerirati u veće čestice ili flokule (Habuda-Stanić, 2011.)

Taložni proces se sastoji od dviju faza. Prva faza je destabilizacija i neutralizacija koloidnih čestica, odnosno koagulacija, dok u drugoj fazi tijekom sporog miješanja koagulantom neutraliziranih čestica uslijed flokulacije čestice aglomeriraju i talože se (Medverec Knežević, 2019.). Shematski prikaz uklanjanja arsena iz vode koagulacijom i flokulacijom prikazan je na **Slici 3**.



Slika 3. Shematski prikaz uklanjanja arsena iz vode procesom koagulacije i floakulacije, (Song i sur., 2014.)

Fizikalno-kemijski postupak, kojim se koloidno dispergirane tvari u vodi ili otopini dodavanjem sredstava za flokulaciju (flokulanta), spajaju u krupne, lako filtrirajuće flokule koje se filtracijom uklanjaju je proces flokulacije (Degremont, 1976). Flokulacija ne može nastupiti bez koagulacije, odnosno taloženje čestica, a samim procesom koagulacije ne možemo odstraniti sve koloidne tvari iz vode (Foschio 2010.).

Učinkovitost obrade vode procesom koagulacije i flokulacije najviše ovisi o izboru i količini koagulacijskog sredstva. Zbog velikog električnog naboja najčešće se koriste soli aluminija (aluminijev(III) sulfat $Al_2(SO_4)_3$, natrijev aluminat, $NaAlO_2$) i soli željeza (željezov (III) klorid, $FeCl_3$, željezov(II) sulfat, $FeSO_4$) (Habuda-Stanić, 2011.). Navedeni koagulanti neutraliziraju naboj koloidnih čestica hidrolizirajući u vodi pri čemu pospješuju taloženje tih istih čestica jer uslijed hidrolize nastaju H^+ ioni, SO_4^{2-} ili Cl^- ioni i volumniozni talozi Fe ili Al – hidroksida (Romić, 2008; Lytle i sur., 2005.; Pal i sur., 2007.).

Proces uklanjanja arsena koagulacijom i flokulacijom sastoji se iz 3 glavne faze:

1. precipitacije – nastaju netopljive molekule $Fe(AsO_4)$ ili $Al(AsO_4)$ koje se talože,

2. koprecipitacije – topljivi spojevi arsena uklapaju se u rastuće flokule aluminijevog odnosno željeznog hidroksida,
3. adsorpcije – topljivi spojevi arsena elektrostatski se vežu na površinu netopljivih metalnih hidroksida (Edwards, 1994).

Djelomičnom hidrolizom željezovih i aluminijevih soli u vodi započinje uklanjanje arsena pri čemu oslobođeni H^+ ioni, ioni SO_4^{2-} i Cl^- neutraliziraju nabijene koloidne čestice, a na površini voluminiziranih taloga aluminijevih i željezovih hidroksida elektrostatski se vežu topljivi spojevi arsena (Habuda-Stanić, 2011).

Vezanje arsena se može prikazati slijedećim kemijskim jednadžbama (1,2):

$$= Fe - OH + H_2AsO_4^- \leftrightarrows Fe - H_2AsO_4 + H_2O \quad (1)$$

$$= Al - OH + H_2AsO_4^- \leftrightarrows Al - H_2AsO_4 + H_2O \quad (2)$$

Najznačajniji parametri u procesu uklanjanja arsena iz vode koagulacijom i flokulacijom su: pH vrijednost sirove vode, vrsta i količina koagulacijskog sredstva, početna koncentracija i oksidacijski oblik arsena te prisutnost drugih tvari u vodi. Koagulanti na bazi aluminijevih soli najbolji učinak postižu u području pH vrijednosti 5,5 i 7, dok se koagulanti na bazi željezovih soli mogu primjenjivati u pH području od 4 do 9. Istraživanjem je dokazano da željezovi koagulanti pri pH 6-8 postižu najbolju učinkovitost uklanjanja arsena. Također je dokazano da molekule $Al(OH)_3$ pri nižim vrijednostima pH poprimaju neutralni naboj u odnosu na $Fe(OH)_3$. Nadalje, istraživanja su pokazala da povećanjem količine željezovih i aluminijevih koagulanata, uz optimalnu pH vrijednosti, značajno povećava udio uklonjenog arsena. Optimalna doza željezovih koagulanata je između 20-25 mgFe/L dok je kod aluminijevih koagulanata vrijednost znatno veća i iznosi 40 mgAl/L (Habuda-Stanić, 2011).

Elektrostatski naboj spojeva arsenita i arsenata znatno utječe na učinak proces uklanjanja. Neutralni spojevi trovalentnog arsena se slabo vežu na površinu metalnih hidroksida što čini utjecaj pH vrijednosti izraženijim. U ioniziranom obliku se nalaze spojevi peterovalentnog arsena te je time olakšano njihovo vezanje na molekule hidroksida stoga je utjecaj pH vrijednosti slabiji na proces uklanjanja peterovalentnog arsena nego na trovalentni oblik (Romić, 2009.).

Upravo zbog toga se provodi oksidacija arsena, prije doziranja koagulanta, pri čemu neutralni reducirani spojevi trovalentnog arsena prelaze u oksidirani peterovalentni oblik prikazana jednadžbom (3). Najčešća se oksidacija provodi pomoću: ozona, klora, kalijeva permanganata, hipoklorita, vodikovog peroksida, manganovih oksida i Fentonovog reagensa (vodikov peroksid/Fe^{2+}) (Romić, 2009.).

$$AsO_3^{3-} - 2e^- + H_2O \leftrightarrow AsO_4^{3-} + 2H^+ \quad (3)$$

Doziranjem flokulanata, tj. makromolekula neutralnog, pozitivnog ili negativnog naboja, moguće je povećati uspješnost uklanjanja arsena metodom koagulacije i flokulacije. Flokulanti u malim količinama značajno pospješuju aglomeraciju nastalih flokula, a najčešće se primjenjuju poliakrilamidni sintetički flokulanti (Habuda-Stanić, 2011.).

Istraživanjem je dokazano da koagulant $FeCl_3$ ima najbolji učinak pri uklanjanju spojeva arsena koji približno iznosi više od 95% dok se primjenom koagulanta $Al_2(SO_4)_3$ postiže do 30% uklanjanja arsena. Najučinkovitiji oksidans za uklanjanje arsena je $KMnO_4$ (95%) (Habuda-Stanić, 2011.).

Pozitivna strana ovog procesa je ekonomičnost te izbjegavanje stvaranja dezinfekcijskih nusprodukata, dok s druge strane loša karakteristika ovog procesa je stvaranje flokulacijskog mulja koji sadrži visoke udjele arsena te ga je nužno zbrinuti kao toksični otpad (Habuda-Stanić i sur. 2013).

2.4.2. Metoda ionske izmjene

Ionska izmjena je fizikalno-kemijski postupak izmjene stehiometrijski ekvivalentne količine iona između krute (ionskog izmjenjivača) i tekuće faze (dobavne struje sirove vode) pri čemu ne dolazi do trajne izmjene kemijskog sastava krute faze (Romić, 2019.).

Ionski izmjenjivači mogu biti anorganskog ili organskog podrijetla, odnosno prirodni ili umjetni. Njihov kemijski sastav ostaje nepromijenjen dok u strukturi sadrže fiksirane pozitivne ili negativne električne naboje kroz koje difundiraju ioni (Medverec Knezović, 2019.).

Najbolja izmjenjivačka svojstva od prirodnih tvari pokazale su različite vrste zeolita, dok se sintetički ionski izmjenjivači najčešće proizvode na bazi stirena i divinil benzena koji su zapravo kruti oblik kiselina, baza i soli (Kalajdžić, 2012.).

Kao i kod većine tehnologija, učinak separacije arsenovih spojeva metodom ionske izmjene ovisi o oksidacijskom obliku arsena, pH vrijednosti, koncentraciji arsena u dobavnoj struji, selektivnosti ionskog izmjenjivača prema određenim ionima i vrsti izmjenjivačke smole (Habuda-Stanić, 2011).

Za uklanjanje arsena koriste se jako bazične ionske smole, kao što su različiti derivati vinil-benzilklorida. Optimalno pH područje za uklanjanje arsena je između 6,5 i 9. Najbolji učinak ove metode je postignut kod uklanjanja protoniziranih spojeva peterovalentnog arsena jer neutralni trovalentni spojevi arsena prolaze kroz izmjenjivač (Romić, 2009.).

Povećana koncentracija sulfata i trovalentnog željeza u vodi ima negativan utjecaj na uklanjanje arsena. Naime, arsen u takvoj vodi tvori kompleksne spojeve što sprječava vezanje arsena na ionski izmjenjivač. S druge strane, smanjenje arsena više od 90% od početne koncentracije u vodi, postignuto je primjenom modificiranih oblika ionskih izmjenjivača, odnosno zasićenjem izmjenjivača s željezovim kompleskima (Romić, 2009.).

Nedostatak metode je visok udio arsena u otpadnoj vodi.

2.4.3. Adsorpcijske metode

Uklanjanje arsena i mangana adsorpcijskom metodom temelji se na interakciji adsorbensa (čvrsta tvar) i adsorbata (tekuća tvar, tj. molekule plina ili otopljene tvari iz otopine). Uspješnost adsorpcijskog procesa ovisi o aktivnoj specifičnoj površini adsorbensa na kojoj je vezan adsorbat.

U obradi otpadne vode metodom adsorpcije najčešće se upotrebljavaju granulirani adsorpcijski materijali poput aktivnog ugljena, prirodnih i sintetičkih zeolita, različitih komercijalno dostupnih filtarskih medija modificiranih željezovim oksidom, biosorbensa i dr. Aktivni ugljen može biti u obliku granula, praha ili peletni oblik, a najčešće korištene sirovine su antracit, drvo, treset, kokosov orah i drugi slični materijali. Vrsta primijenjenog aktivnog

ugljena, pH vrijednosti i ukupna koncentracija arsena i mangana u vodi su čimbenici o kojima ovisi uspješnost procesa (Habuda-Stanić, 2011.).

Prednost metode je jednostavnost primjene adsorpcijskih materijala u vidu kolona koje se lako mogu postavit na kraju svakog tehnološkog procesa obrade vode dok relativno nizak kapacitet predstavlja nedostatak ove metode (Habuda- Stanić,2011.).

2.4.4 Membranske metode

Membranske metode sve više dominiraju u procesima obrade pitkih i otpadnih voda zbog svojih tehnoloških prednosti te time smanjuju zastupljenost taložne metode, odnosno koagulacije i flokulacije (Medverec Knežević, 2019.).

Osnova svih membranskih procesa je membrana koja predstavlja međufazu između dviju faza, tj. definira se kao tanki sloj koji odvaja dva fluida. Pogonska sila, koja omogućuje transport iz jednog fluida u drugi, je razlika- tlakova, koncentracije, električnog potencijala i temperature. Prolaskom ulazne otopine kroz poroznu membranu, kao rezultat povišenog tlaka, nastaju dvije struje. Struja koja prolazi kroz membranu i time dovodi do smanjenja koncentracije otopljenih tvari naziva se permeat. Retentat ili koncentrat je naziv druge struje, u kojoj se povećava koncentracija otopljenih tvari te se dio ulazne otopine zadržao na membrani.

Membrane se razlikuju veličinom pora i jačinom primijenjenog tlaka, prema kojima se dijele u četiri membranska procesa **(Tablica1**): mikrofiltracija (MF), ultrafiltracija (UF), nanofiltracija (NF) i reverzna osmoza (RO).

Tablica 1 Podjela tlačnih procesa

Membranski proces	Veličina pora (nm)	Tlak (bar)
Mikrofiltracija (MF)	> 100	< 1,0
Ultrafiltracija (UF)	5-100	1,0-5,0
Nanofiltracija (NF)	0,5-5	5,0-10
Reverzna osmoza (RO)	0,1-1	10-100

Reverzna osmoza i nanofiltracija, uz prethodnu oksidaciju, se najčešće upotrebljavaju za uklanjanje arsena. Rezultati istraživanja su pokazali da se primjenom RO pri tlaku od 400 pri uklanja 99% spojeva peterovalentnog arsena dok se primjenom NF uklanja 95% spojeva peterovalentnog i 75% trovalentnog arsena. Nadalje, istraživanja pokazuju da se kombinacijom niskotlačnih membranskih procesa s koagulacijskim procesom, kod MF metode uklonilo 95% trovalentnog arsena, a UF metodom najviše 63% arsena (Habuda-Stanić, 2011.).

Izbor membranskog procesa za obradu vode za piće najviše ovisi o kakvoći sirove vode. Učinkovitost uklanjanja arsena iz vode ovisi o naboju spojeva arsena, vrsti i materijalu membrane, temperaturi, pH vrijednosti, jačini primijenjenog tlaka te udjelu drugih anorganskih i organskih tvari u sirovoj vodi (Habuda-Stanić, 2011.).

Prednost membranskih procesa je jednostavnost tehnologije, lakoća održavanja, mogućnost odabira membrane, ekonomičnost, sustav samopročišćavanja, čvrsta i otporna konstrukcija i ekološka prihvatljivost (Košutić, 2019.).

Nedostatak ove metode su visoki pogonski troškovi te visoke koncentracije arsena u otpadnoj vodi.

3. EKSPERIMENTALNI DIO

3.1. ZADATAK

Zadatak ovog rada je utvrditi utjecaj procesnih parametara na učinkovitost uklanjanja arsena i mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom. Učinkovitost će biti ispitana u ovisnosti o vrsti sirove vode (podzemna voda, površinska voda) početnim koncentracijama arsena i mangana, mutnoći i temperaturi sirove vode. Uz navedeno, pratit će se promjene i sljedećih parametara kakvoće vode: suspendirane tvari, boja, provodljivost i ukupna tvrdoća vode, pri čemu će se koristiti uzorci podzemne vode s osječkog vodocrpilišta Vinogradi, dok će se površinska voda, uzorci vode rijeke Drave, uzeti na lokaciji Pampas. Ispitivanja će se provesti pomoću Jar-testa, a promjena parametara pratit će se pomoću analitičkih uređaja.

3.2. MATERIJALI I METODE

U ovom radu korištena je podzemna bunarska voda s crpilišta Vinogradi i površinska voda s vodocrpilišta Pampas na rijeci Dravi.

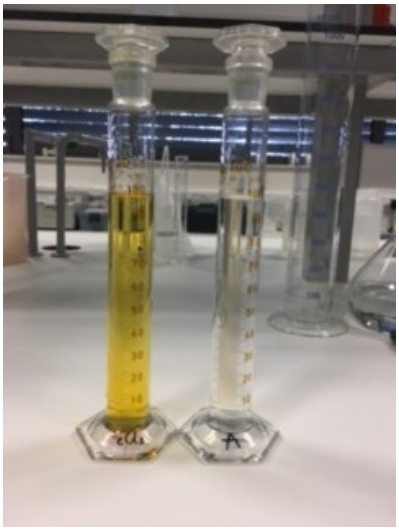
3.2.1. Otopine i kemikalije

Tijekom ovog rada, u cilju što uspješnije koagulacije i flokulacije, korištene su slijedeće otopine:

- otopina željeznog klorida $FeCl_3$
- otopina kalijeva permanganata
- otopina polielektolita Aquaflock 2350

Otopina koagulanta, $FeCl_3$, pripremljena je na način da se 1 ml koagulanta doda u 100 mL vode (**Slika 4**).

Otopina polielektrolita dobije se odvagom 0,1 g polielektrolita Aquaflock 2530 koji se doda u 200 mL vode (**Slika 4**).



Slika 4. Prikaz koagulanta $FeCl_3$ (lijevo) i polielektrolita Aquaflock 2530 (desno)

3.2.2. Uzorci površinske i podzemne voda grada Osijeka

Površinska voda se crpi na vodocrpilištu Pampas na rijeci Dravi te služi kao rezervno izvorište vode za potrebe grada Osijeka kapaciteta 350 L/s. Aktivira se u slučaju potrebe za dopunjavanjem razlike između ukupne potrošnje vodoopskrba sustava grada Osijeka i zahvaćene količine vode s vodocrpilišta podzemne vode Vinogradi ili u slučaju intervencije na primarnom crpilištu (https://vodovod.com/vodne-usluge/vodoopskrba/).

U **Tablici 2** prikazane su vrijednosti fizikalnih i kemijskih parametara površinske vode grada Osijeka.

Tablica 2 Fizikalni i kemijski parametri površinske vode (uzorci vode rijeke Drave)

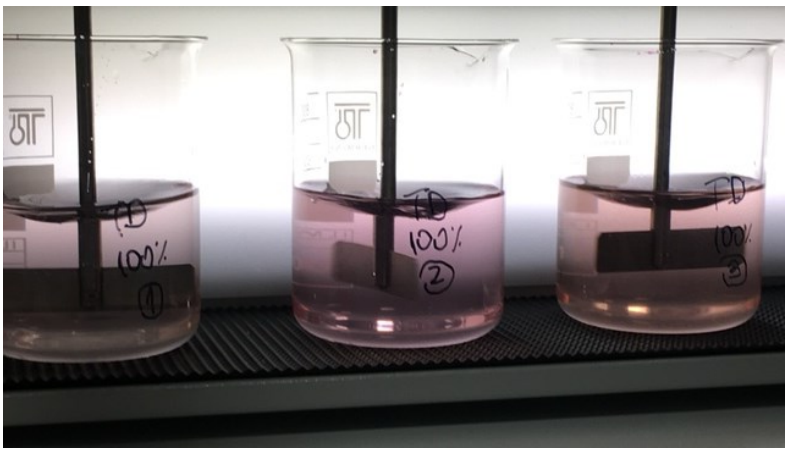
Parametar	Jedinica	Vrijednost
Temperatura	°C	10
Mutnoća	° NTU	3,76
Boja	° PtCo skale	33
Suspendirane tvari	mg/l	7
Provodljivost	µS/cm	220

Ukupna tvrdoća	$CaCO2$ mg/l	255,89
Arsen	As µg/l	0,714
Mangan	Mn µg/l	68

Uzorak površinske vode je rijeka Drava koja mijenja svoja mikrobiološka te fizikalno-kemijska svojstva tijekom godine. Eksperimentalni rad je proveden tijekom zimskog vremena, pri čemu je mikrobiološko stanje rijeke Drave izuzetno dobro u odnosu na ljetni period. Upravo zbog toga jedan uzorak Drave je zamućen s infuzorijskom zemljom.

Uzorci površinske vode:

I. čista rijeka Drava (**Slika 5**)
II. mutna rijeka Drava (**Slika 6**)



Slika 5. Prikaz uzorka čiste rijeke Drave na Jar-testu



Slika 6. Prikaz uzorka zamućene Drave

Podzemne vode su sve vode koje se nalaze ispod površine tla u zoni zasićenja i u izravnom dodiru s površinom tla ili podzemnim slojem (NN 153/2009). Grad Osijek podzemnu vodu crpi na vodocrpilištu Vinogradi iz osamnaest bunara čija je dubina između 111 i 164 m, a nalazi se desetak kilometara zapadno od grada Osijeka. Karakteristika podzemnih voda istočne Hrvatske, tako i grada Osijeka, su povećane koncentracije željeza, amonijaka, organskih tvari, mangana i arsena stoga se voda prije distribucije mora preraditi kako bi bila zdravstveno-ispravna voda za piće. Upravo zbog toga sirova podzemna voda iziskuje obradu, a obrađuje se metodom koagulacije i filtracije. Obrada vode u pogonu započinje postupkom aeracije, u aeracijskom bazenu, pri čemu dolazi do izdvajanja plinovitih komponenti iz vode (H_2S) te oksidacije spojeva željeza, mangana i arsena što omogućuje lakše izdvajanje istih iz vode (Habuda-Stanić, 2011.).

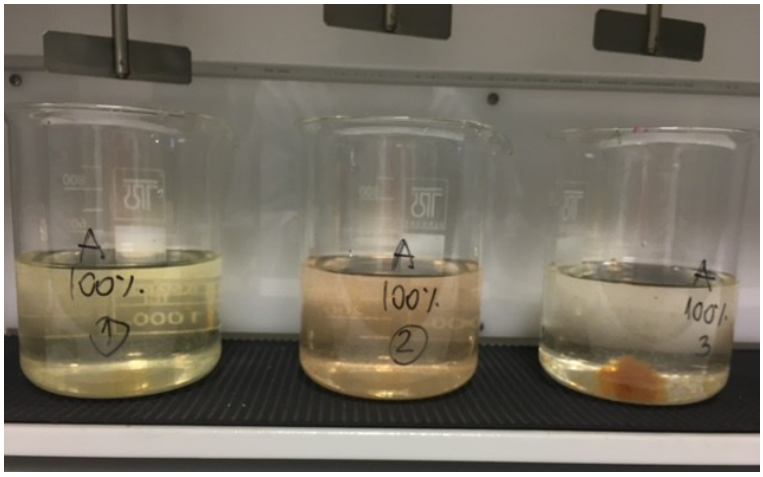
U **Tablici 3** prikazane su vrijednosti fizikalnih i kemijskih parametara aerirane podzemne vode grada Osijeka

Tablica 3 Fizikalni i kemijski parametri podzemne vode

Parametar	Jedinica	Vrijednost
Temperatura	°C	16
Mutnoća	° NTU	7,25
Boja	° PtCo skale	72
Miris	-	na H_2S

Suspendirane tvari	mg/l	2
Provodljivost	µS/cm	780
Ukupna tvrdoća	$CaCO_2$ mg/l	372,85
Arsen	As µg/l	202,36
Mangan	Mn µg/l	120

Uzorak podzemne vode je aerirana sirova voda sa crpilišta Vinogradi u različitim omjerima sa čistom i zamućenom Dravom. Na **Slici 7** prikazan je uzorak 100% -tne aerirane vode nakon provedbe Jar-testa.



Slika 7. Prikaz uzorka sa 100% udjelom aerirane vode

U ovom eksperimentalnom radu učinak uklanjanja arsena i mangana je ispitan kroz devet uzoraka sirove vode prikazanih u **Tablici 4**, pri temperaturama 10,5 ˚C, 18 ˚C, 24 ˚C i 30 ˚C.

Tablica 4 Prikaz svih uzoraka korištenih u eksperimentalnom radu

	AERIRANA VODA	**ČISTA RIJEKA DRAVA**	**MUTNA RIJEKA DRAVA**
Uzorak 1	100%		
Uzorak 2		100%	
Uzorak 3			100%
Uzorak 4	70%	30%	

Uzorak 5	70%		30%
Uzorak 6	30%	70%	
Uzorak 7	30%		70%
Uzorak 8	50%	50%	
Uzorak 9	50%		50%

3.2.3. Mjerni uređaji eksperimentalnog rada

U eksperimentalnom dijelu rada korišteni su slijedeći uređaji:

- Jar-test
- Konduktometar
- Spektrofotometar
- Uređaj za voltametrijsko određivanje arsena u vodi Computrace 757 VA, Metrohm
- Turbidimetar

3.3. UKLANJANJE ARSENA I MANGANA IZ VODE KOAGULACIJOM I FLOKULACIJOM

Jedan od prvih zadataka eksperimentalnog rada su Jar-testiranja sirove vode, navedenih uzoraka (**Tablica 4**) volumena 500 ml. Početne fizikalno-kemijske karakteristike takve vode prikazane su u **Tablici 2** i **Tablici 3**.

Jar-test se provodio u uređaju koji je opremljen sa setom od četiri čaše i mješačima s veličinom lopatica 1x5 cm koje okreće pogonski motor. Nakon odmjeravanja 500 mL uzorka u laboratorijske čaše, podešavana je temperatura na vrijednosti od 10,5, 18, 24 i 30 ˚C . Temperatura uzoraka podešena je zagrijavanjem uzoraka na termostatskoj miješalici ili hlađenjem u hladnjaku. Kada je temperatura podešena uzorci su spremni za Jar-testiranje.

Jar-testiranje, koje simulira koagulaciju i flokulaciju, se sastojalo od tri faze.

U prvoj fazi je pri brzini miješanja od 150 okr/min, doziran je oksidans 1%- tne otopine $KMnO_4$ u koncentraciji od 0,05 mL.

Nakon 10 sekundi započinje druga faza doziranjem različitih koncentracija koagulanta $FeCl_3$ (**Slika 4**) pri istom broju okretaja. U prvoj čaši je dodana koncentracija od 0,7 ml, u drugoj 1 ml i u trećoj 1,5 ml. Vrijeme trajanja ove faze odnosno vrijeme miješanja je 20 sekundi.

Treća faza započinje dodatkom pomoćnog flokulacijskog sredstva, odnosno polielektrolita Aquaflock 2530 (**Slika 4**) u koncentraciji 0,01 mL, a brzina miješanja se smanjuje na 30 okr/min tijekom 7 minuta.

Završetkom Jar-testiranja uzorci su ostavljeni da odstoje 20-30 minuta dok ne dođe do taloženja flokula **(Slika 8**) ,a zatim su istaložene flokule uklonjene vakuum filtracijom (**Slika 9**). Filtracija je provedena kroz filter papir veličine pora 0,45 µm koji je karakterističan za mikrofiltracijske (MF) membrane.

U dobivenim filtratima određivani su sljedeći parametri: ukupni arsen, mangan, suspendirane tvari, boja, provodljivost, ukupna tvrdoća i mutnoća.



Slika 8. Prikaz taloga nastalih nakon obrade uzoraka



Slika 9. Prikaz vakuum filtracije

3.3.1. Metoda određivanja arsena

Ukupna koncentracija arsena određena je pomoću voltametrijskog uređaja Methrom 757 VA Computrace (Application Bulletinl 416/1 e, 2003) s bočno postavljenom rotirajućom zlatnom elektrodom metodom anodne striping volametrije (ASV). Koncentracija arsena određivana je u 10 mL uzorka zakiseljenog s 10 mL 30% HCl.

3.3.2. Metoda određivanja mangana

PAN metoda uz dodatak askorbinske kiseline, alkalnog cijanida i 0,1% PAN reagensa koristila se za određivanje mangana. Očitanja su provedena na 560 nm na aparatu UV/VIS spektrofotometar Lambda 20, Perkin Elmer. Provjera rada aparata je vršena svakodnevno sa standardom mangana koncentracije 50 µg Mn/L (Carlo Erba).

3.4. ODREĐIVANJE PROCESNIH PARAMETARA POVRŠINSKE I PODZEMENE VODE KOAGULACIJOM I FLOKULACIJOM

3.4.1 Mjerenje mutnoće

Mjerenje mutnoće uzoraka provodilo se pomoću laboratorijskog turbidimetra model 2100 P (**Slika 10**), Hach. Provjera rada turbidimetra izvršena je svakodnevno sa standardom za mutnoću 5,34^{o} NTU (Test kit Hach, Cat.No. 24641-05)



Slika 10. Uređaj turbidimetar

3.4.2. Mjerenje boje

Boja uzoraka vode određivana je na laboratorijskom spektrofotometru proizvođača Hach DR/2000 (**Slika 11**) primjenom platina-kobalt metode na 455 nm. Očitane vrijednosti iskazane su stupnjevima Pt-Co skale, a provjera aparata je izvršena svakodnevno pripremljenim standardima od 10 i 30 Pt-Co skale.



Slika 11. Spektrofotometar model DR/2000, Hach

3.4.3. Mjerenje vodljivosti

Određivanje vodljivosti uzoraka je rađeno na konduktometru Mettler Toledo SevenEasy (**Slika 12**). Rezultati vodljivosti izraženi su u µS/cm. Vodljivost je recipročna vrijednost otpora u omima, mjerena između dviju suprotnih strana kocke jednoga kubičnog centimetra vodene otopine pri određenoj temperaturi. Na vodljivost utječe temperatura koja varira oko 2% za 1˚C (Kuleš i Habuda-Stanić. 2000.).



Slika 12. Prikaz uređaja konduktometar

3.4.4. Određivanje ukupne tvrdoće

Određivanje ukupne tvrdoća provedeno je titracijskom metodom s otopinom EDTA (etilen-diamin-tetraoctena kiselina). Jedinica za tvrdoću vode je stupanj tvrdoće 1 ˚dH, a predstavlja tvrdoću vode koja u jednoj litri sadrži 10 mg CaO ili ekvivalentnu količinu 7,19 mg MgO (Kuleš i Habuda-Stanić, 2000.).

U uzorak vode doda se pipetom otopina pufera i par kapi indikatorske otopine ili praškasti indikator. Odmah nakon toga slijedi titracija sa 0,01 M otopinom EDTA te se titrira sve dok ne dođe do promjene boje iz vinsko crvene u plavu boju (Habuda-Stanić i sur., 2012.).

Rezultat tvrdoće vode ovisi o količini kalcijevih i magnezijevih soli u vodi, a može biti: vrlo tvrda, tvrda, umjereno tvrda, meka ili vrlo meka voda (Kuleš i Habuda-Stanić 2000.).

3.4.5. Određivanje suspendiranih tvari

Mjerenje suspendiranih tvari početnih i završnih uzoraka vode provodilo se na laboratorijskom uređaju proizvođača Hach, model DR/2000 (**Slika 11**).

Pokazatelj „suspendirane tvari“ izražava se u količini suspendiranih tvari u jedinici obujma vode (mg/dm^3 , g/m^3). Suspendirane tvari u vodi mogu biti anorganskog i organskog porijekla, a u ovisnosti o topljivosti topljive (za čestice manje od 0,45 µm) i netopljive (za čestice veće od 0,45 µm).

4. REZULTATI I RASPRAVA

4.1. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UKLANJANJE ARSENA I MANGANA PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE

U dobivenim filtratima, nakon jar-testiranja i membranske filtracije, određena je koncentracija uklonjenog arsena i mangana ovisno o temperaturi i kemijskom sastavu vode te dodanoj koncentraciji koagulanta. Rezultati učinkovitosti uklanjanja arsena prikazani u **Tablicama 5-8**, a učinkovitosti uklanjanja mangana u **Tablicama 9-12**.

Tablica 5 Učinkovitost uklanjanja arsena koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 10,5 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST As(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE As(µg/L)	% UKLONJENOG ARSENA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	201,3	34,65	82,79
	20		33,87	83,17
	30		32,74	83,74
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	0,63	0	100
	20		0	100
	30		0	100
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	0,72	0	100
	20		0	100
	30		0	100
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	127,8	5,60	95,62
	20		5,79	95,47
	30		3,31	97,72
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	127,4	26,49	79,20
	20		13,30	89,56
	30		5,91	95,36
	15	69,6	2,46	96,47

Uzorak 6 (30% aerirana voda + 70% čista Drava)	20		1,0	98,56
	30		1	98,56
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	67	3,43	94,88
	20		0,12	99,82
	30		0	100
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	97,8	6,20	93,66
	20		3,68	96,24
	30		2,97	96,96
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	98,1	10,35	89,45
	20		6,75	93,12
	30		3,77	96,16

Tablica 6 Učinkovitost uklanjanja arsena koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 18 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST As(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE As(µg/L)	% UKLONJENOG ARSENA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	189,33	49,56	73,82
	20		49,11	74,06
	30		43,33	77,11
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	0,39	0	100
	20		0	100
	30		0	100
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	0,41	1,32	100
	20		0	100
	30		0	100
	15	126,7	6,12	95,17

Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	20		6,29	95,04
	30		6,25	95,07
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	123,6	21,42	82,67
	20		21,87	82,31
	30		21,39	82,69
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	71,5	5,21	92,71
	20		5,34	92,53
	30		4,17	94,17
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	69	4,87	92,42
	20		5,38	92,20
	30		3,26	95,28
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	96,2	8,23	91,44
	20		8,31	91,36
	30		9,45	90,18
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	91,4	8,79	90,38
	20		6,98	92,36
	30		6,87	92,48

Tablica 7 Učinkovitost uklanjanja arsena koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 24 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST As(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE As(µg/L)	% UKLONJENOG ARSENA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	194,32	42,68	78,04
	20		39,86	79,49
	30		37,23	80,84

Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	0,73	0	100
	20		0,21	71,23
	30		0,27	63,01
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	0,61	0,08	86,89
	20		0	100
	30		0,16	73,77
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	125,3	7,98	93,63
	20		7,76	93,81
	30		5,71	95,44
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	128,3	32,45	74,71
	20		17,94	86,02
	30		9,45	92,63
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	70,9	5,39	92,40
	20		5,19	92,68
	30		4,77	93,27
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	72,0	5,13	92,88
	20		3,97	94,49
	30		2,45	96,60
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	95,23	7,19	92,45
	20		6,11	93,58
	30		4,99	94,76
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	93,8	10,71	88,58
	20		7,88	91,60
	30		4,13	95,60

Tablica 8 Učinkovitost uklanjanja arsena koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 30 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST As(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE As(µg/L)	% UKLONJENOG ARSENA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	200,3	49,56	75,26
	20		49,11	75,48
	30		43,33	78,37
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	0,35	0	100
	20		0	100
	30		0	100
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	0,58	0	100
	20		0	100
	30		0	100
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	128,9	6,83	94,70
	20		7,34	94,31
	30		6,89	94,65
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	128,5	31,76	75,28
	20		21,65	83,15
	30		20,49	84,05
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	71,3	6,32	91,14
	20		5,76	91,92
	30		6,02	91,56
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	71,4	7,89	88,95
	20		8,89	87,55
	30		7,26	89,83
	15	98,5	12,56	87,25

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		12,78	87,03
	30		12,50	87,31
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	94,8	13,67	85,58
	20		14,68	84,51
	30		13,75	85,50

U prikazanim **Tablicama 5-8** početna koncentracija arsena u većini uzoraka prije obrade vode koagulacijom i flokulacijom je daleko iznad M.D.K. vrijednosti koja iznosi 10 µg/L.

Postotak uklonjenog arsena nakon obrade vode koagulacijom i flokulacijom je u rasponu od 63% do 100%, odnosno najniži postotak je postignut kod Uzorka 2 (čista Drava) pri temperaturi 24 ^{o}C te dozi koagulanta 30 mg/L.

Uzorak 2 (100% čista Drava) i Uzorak 3 (100% mutna Drava) imaju najmanju početnu koncentraciju arsena stoga dobivena koncentracija arsena u vodi nakon obrade koagulacijom i flokulacijom u skladu sa zakonskom M.D.K. vrijednošću. Na svim temperaturama, nakon obrade, samo Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda) prelazi dozvoljenu koncentraciju arsena u vodi, a Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava) prelazi dozvoljenu granicu samo pri temperaturi od 30 ^{o}C dok kod temperatura 10,5 ^{o}C i 24 ^{o}C prelazi M.D.K. pri dozama koagulanta od 15 mg/L.

Visoka učinkovitost postignuta je pri obradi Uzorka 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava) jer je postotak uklonjenog arsena na svim ispitanim temperaturama bio u rasponu od 94% do 98% i u granicama dopuštene vrijednosti.

Najuspješnije uklanjanje arsena iz vode nakon obrade, na svim temperaturama, postignuto je pri dozi koagulanta od 30 mg/L.

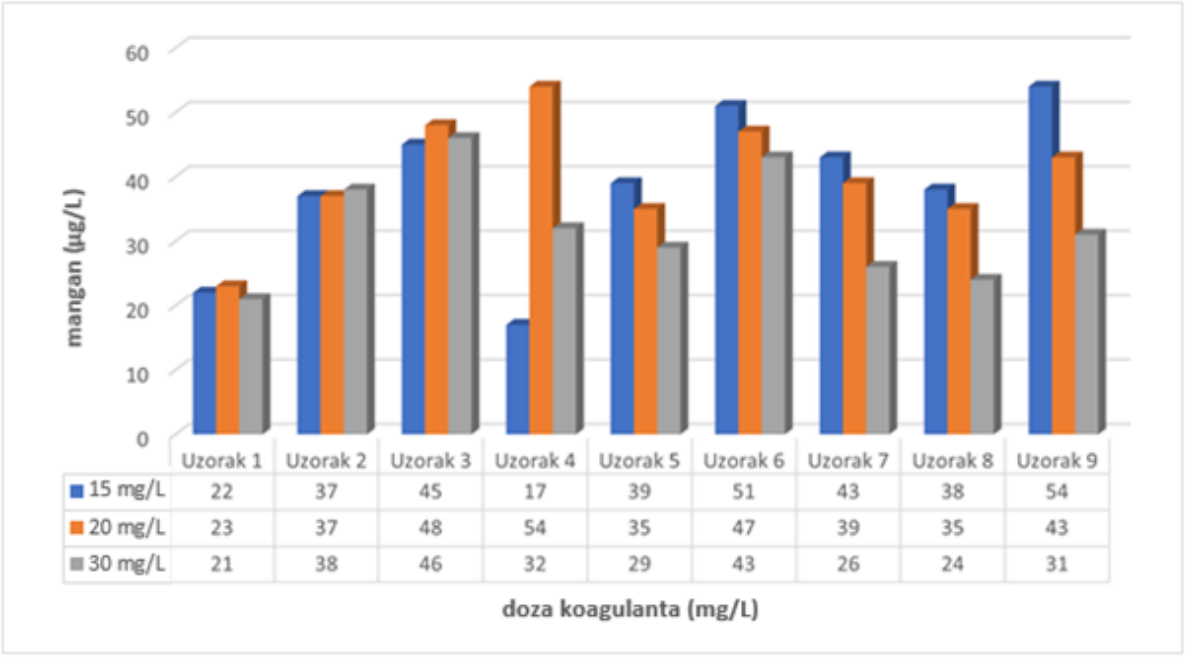
Obzirom na kemijski sastav vode najbolji rezultati su postignuti pri obradi uzoraka s rijekom Dravom (Uzorak 2 i Uzorak 3), a najlošiji rezultati pri obradi uzorka 100 % aerirane podzemne vode (Uzorak 1). Ovisno o početnoj vrijednosti arsena najbolji rezultati su postignuti kod

omjera 70% aerirana podzemna voda i 30% rijeka Drava i to pri dozama koagulanta od 15 mg/L, na temperaturi 18 ^{o}C i 30 ^{o}C, i od 30 mg/L na temperaturi 10,5 ^{o}C i 24 ^{o}C.

Tablica 9 Učinkovitost uklanjanja mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 10,5 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST Mn(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE Mn(µg/L)	% UKLONJENOG MANGANA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	101	22	78,22
	20		23	77,23
	30		21	79,21
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	48	37	22,92
	20		37	22,92
	30		38	20,83
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	172	45	73,84
	20		48	72,09
	30		46	73,26
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	83	17	79,52
	20		54	34,94
	30		32	61,45
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	77	39	49,35
	20		35	54,54
	30		29	62,34
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	61	51	16,40
	20		47	22,95
	30		43	29,51
	15	61	43	29,51

Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	20		39	36,07
	30		26	57,38
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	68	38	44,12
	20		35	48,53
	30		24	64,71
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	117	54	53,85
	20		43	63,25
	30		31	73,50



Slika 13. Grafički prikaz vrijednosti uklonjenog mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom u ovisnosti o količini dodanog koagulanta pri temperaturi 10,5 ^{o}C

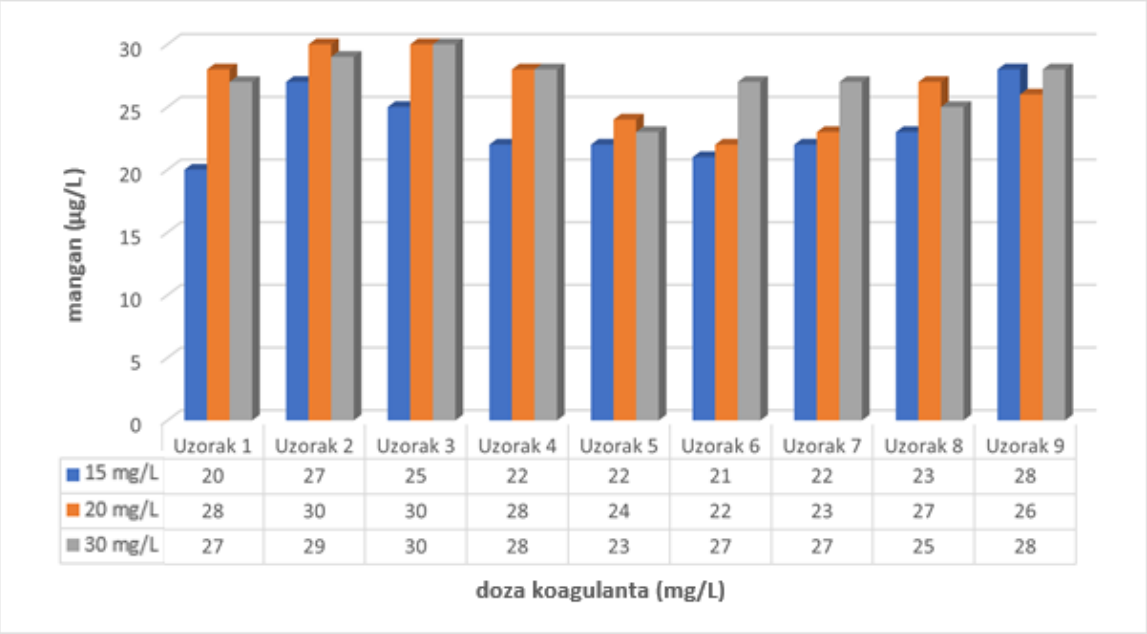
Kao što je vidljivo na **Slici 13** gotovo svi ispitivani uzorci nakon obrade sadrže koncentraciju mangana u granici M.D.K. vrijednosti (50 µm/L) iako su početne koncentracije bile iznad dopuštene vrijednosti.

U Uzorcima 1, 2, 3 i 4 najveći učinak je postignut pri doziranju koagulanta od 15 mg/L dok u preostalim Uzorcima 5, 6, 7, 8 i 9 najučinkovitija doza koagulanta bila doza od 30 mg/L. Po kemijskom sastavu vode najmanja koncentracija mangana nakon obrade zabilježena je pri obradi Uzorka 1 (100% aerirana podzemna voda), a najveća koncentracija utvrđena je kod uzoraka mutne Drave (Uzorak 3) te uzorka koji je bio omjer 30% aerirane podzemne vode i 70% čiste Drava (Uzorak 6).

Tablica 10 Učinkovitost uklanjanja mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 18 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST Mn(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE Mn(µg/L)	% UKLONJENOG MANGANA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	105	20	80,95
	20		28	73,33
	30		27	74,29
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	49	27	44,90
	20		30	38,78
	30		29	40,82
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	153	25	83,66
	20		30	80,39
	30		30	80,40
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	80	22	72,50
	20		28	65,00
	30		28	65,00
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	74	22	70,27
	20		24	67,57
	30		23	68,92

Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	58	21	63,79
	20		22	62,07
	30		27	53,45
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	60	22	63,33
	20		23	61,67
	30		27	55,00
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	66	23	65,15
	20		27	59,10
	30		25	62,12
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	118	28	76,27
	20		26	77,97
	30		28	76,27



Slika 14. Grafički prikaz vrijednosti uklonjenog mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom u ovisnosti o količini dodanog koagulanta pri temperaturi 18 ^{o}C

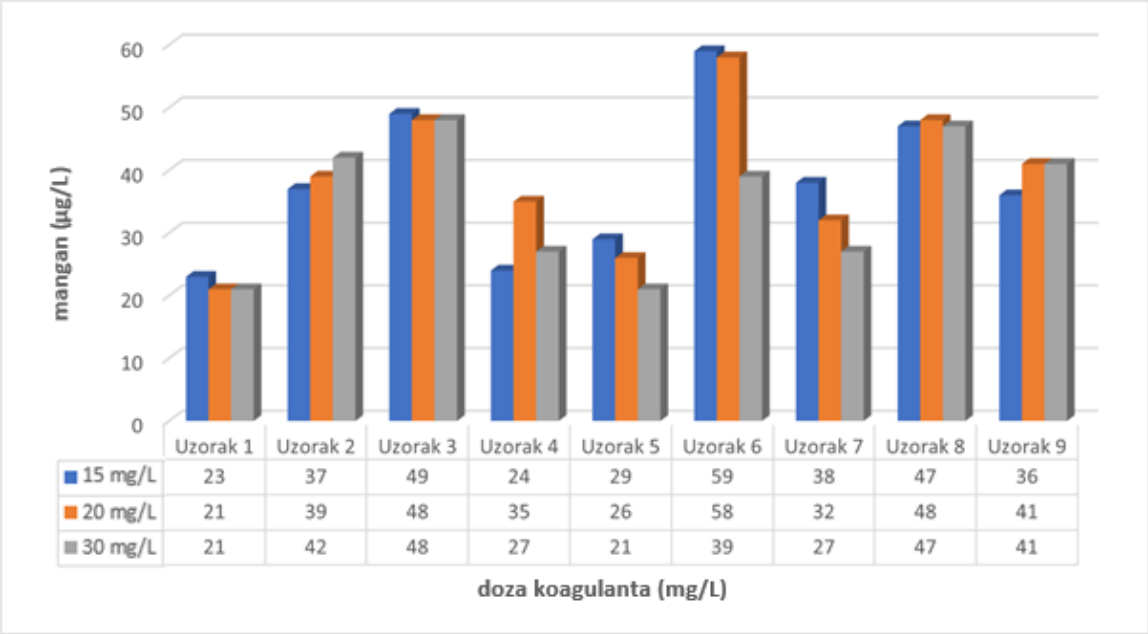
Iz grafičkog prikaza (**Slika 14**) vidljivo je da svi obrađeni uzorci na temperaturi od 18 ^{o}C imaju vrijednost mangana u dozvoljenim granicama (50 µg/L). Vrijednost rezidualne koncentracije mangana nakon obrade svih uzoraka je u rasponu 20-30 µg/L.

Kao najuspješnija doza koagulanta pokazala se doza $FeCL_3$ od 15 ppm.

Tablica 11 Učinkovitost uklanjanja mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 24 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST Mn(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE Mn(µg/L)	% UKLONJENOG MANGANA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	119	23	80,67
	20		21	82,35
	30		21	82,35
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	43	37	13,95
	20		39	9,30
	30		42	2,33
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	125	49	60,80
	20		48	61,60
	30		48	61,60
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	82	24	8,84
	20		35	57,32
	30		27	67,07
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	79	29	63,29
	20		26	67,09
	30		21	73,42
	15	60	59	1,67

Uzorak 6 (30% aerirana voda + 70% čista Drava)	20		58	3,33
	30		39	35,00
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	62	38	38,71
	20		32	48,39
	30		27	56,45
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	60	47	21,67
	20		48	20,00
	30		47	21,67
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	109	36	66,97
	20		41	62,39
	30		41	62,39



Slika 15. Grafički prikaz učinkovitosti uklanjanja mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 24 ^{o}C

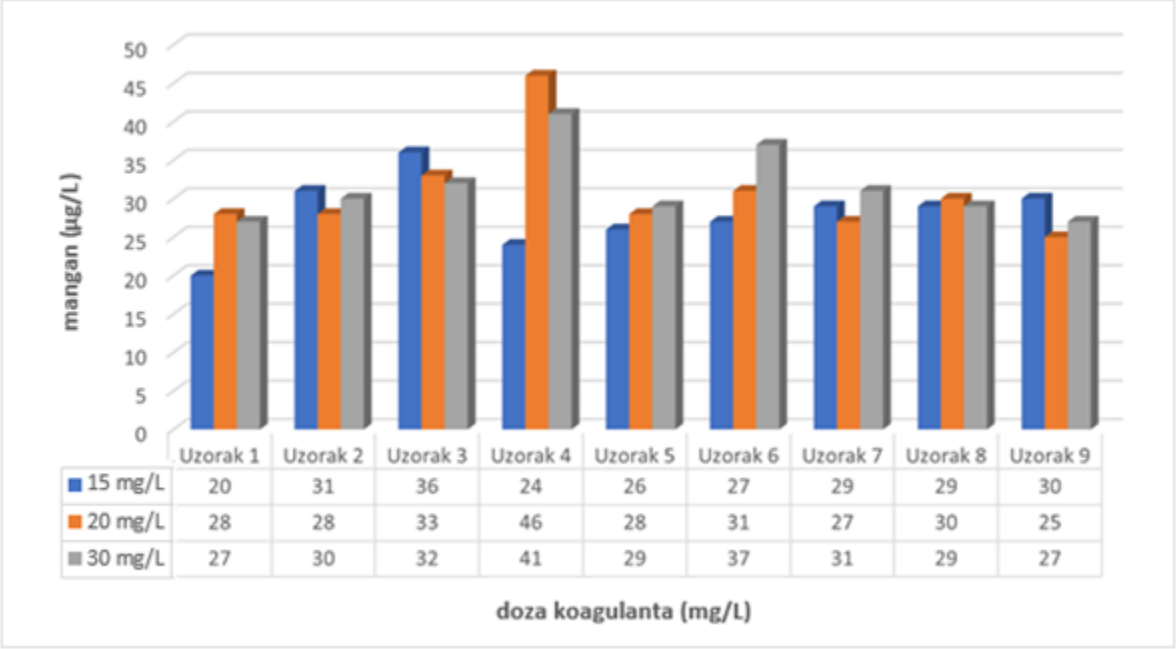
Nakon obrade vode na temperaturi 24 ^{o}C većina uzoraka sadržavala je mangan u dozvoljenim koncentracijama. Izuzetak je bio Uzorak 6, dok su koncentracije mangana u Uzorku 3 i Uzorku 8 bile na granici M.D.K. vrijednosti.

Najbolji rezultati pri uklanjanju mangana su postignuti kod uzoraka s aeriranom podzemnom vodom (Uzorak 1, Uzorak 4, Uzorak 5 i Uzorak 7).

Tablica 12 Učinkovitost uklanjanja mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 30 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST Mn(µg/L)	KOLIČINA NAKON OBRADE Mn(µg/L)	% UKLONJENOG MANGANA
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	98	20	79,59
	20		28	71,43
	30		27	72,45
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	43	31	27,91
	20		28	34,88
	30		30	30,23
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	138	36	73,91
	20		33	76,09
	30		32	76,81
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	80	24	70,00
	20		46	42,50
	30		41	48,75
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	73	26	64,38
	20		28	61,64
	30		29	60,27

Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	57	27	52,63
	20		31	45,61
	30		37	35,09
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	58	29	50,00
	20		27	53,45
	30		31	46,55
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	70	29	58,57
	20		30	57,14
	30		29	58,57
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	112	30	73,21
	20		25	77,68
	30		27	75,90



Slika 16. Grafički prikaz uklonjenog mangana iz vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 30 ^{o}C

Rezultati analiza obrađenih uzoraka vode na temperaturi 30 ^{o}C (**Slika 16**) pokazuju da su svi uzorci imali završnu koncentraciju mangana u skladu s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017). Najučinkovitije uklanjanje mangana postignuto je pri obradi Uzorka 1 (100% aerirana podzemna voda) dok je kod uzoraka s različitim omjerom aerirane podzemne vode i uzoraka vode rijeke Drave, najbolji učinak postignut pri doziranju koagulanta od 15 mg/L.

4.2. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAV VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UČINKOVITOST UKLANJANJA SUSPENDIRANIH TVARI PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE

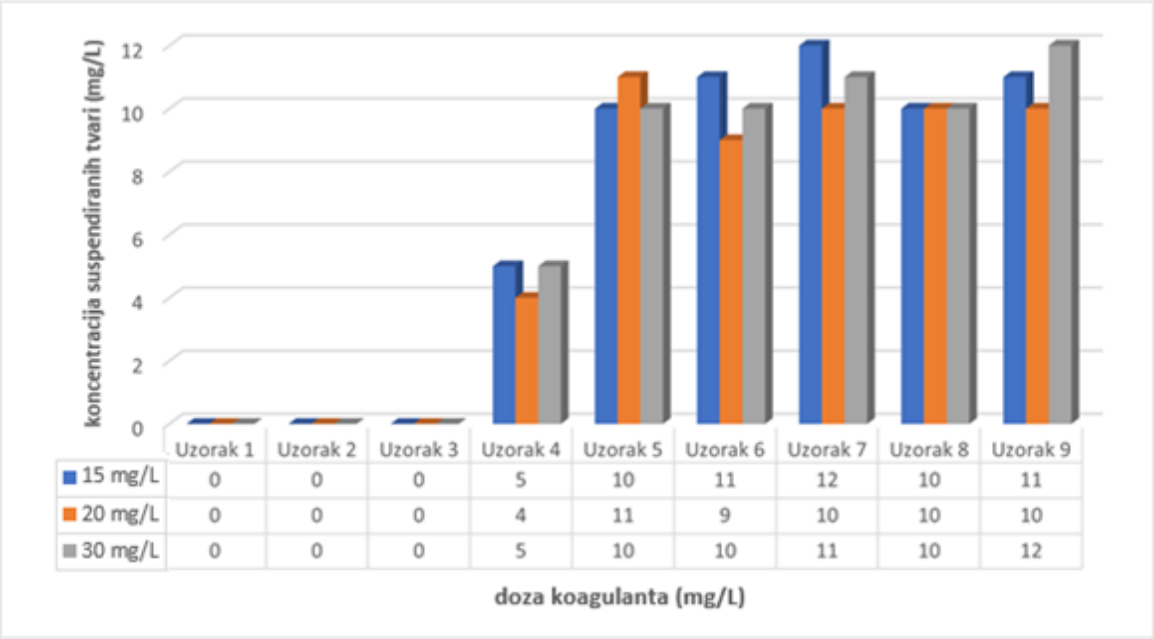
Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari metodom koagulacije i flokulacije iz uzoraka aerirane podzemne vode i uzoraka vode rijeke Drave ispitana je jar-testom te membranskom filtracijom, a količina suspendiranih tvari određena je pomoću spektrofotometra. Uzorci vode su obrađeni na temperaturama 10,5 ^{o}C, 18 ^{o}C, 24 ^{o}C i 30 ^{o}C. . Vrijednosti dobivenih rezultata prikazani su u **Tablicama 13-16**.

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) M.D.K. vrijednost za suspendirane tvari u vodi za ljudsku potrošnju iznosi 10 mg/L.

Tablica 13 Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 10,5 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	2	0
	20		0
	30		0
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	4	0
	20		0
	30		0
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	198	0
	20		0
	30		0
	15	2	5

Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	20		4
	30		5
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	61	10
	20		11
	30		10
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	3	11
	20		9
	30		10
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	137	12
	20		10
	30		11
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	4	10
	20		10
	30		10
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	87	11
	20		10
	30		12



Slika 17. Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 10,5 ^{o}C

Koncentracije suspendiranih tvari u početnim uzorcima podzemne aerirane vode i površinske vode rijeke Drave, pri temperaturi 10 ^{o}C, kreće se od 2 do 198 mg/L. Najveću početnu koncentraciju ima Uzorak 3 (100% mutna Drava), a najmanju Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda) i Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava).

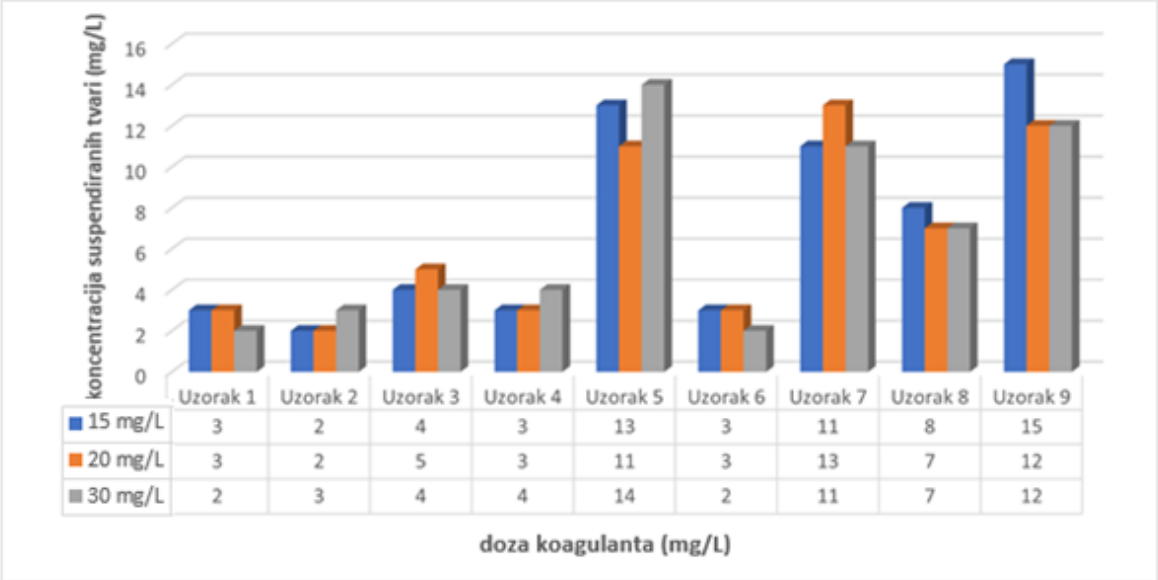
Nakon obrade vode, procesom koagulacije i flokulacije, najveći učinak uklanjanja suspendiranih tvari postignuti su obradom Uzoraka 1, 2 i 3 iako je Uzorak 3 imao najveću početnu vrijednost suspendiranih tvari. Uzorak 4 u odnosu na Uzorak 1, 2 i 3 ima povećane vrijednosti suspendiranih tvari, ali su u granici M.D.K. vrijednosti dok količina suspendiranih tvari u Uzorku 5, 6, 7, 8 i 9 prelazi M.D.K. vrijednost od 10 mg/L.

Tablica 14 Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 18 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)

Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	2	3
	20		3
	30		2
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	5	2
	20		2
	30		3
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	182	4
	20		5
	30		4
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	3	3
	20		3
	30		4
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	58	13
	20		11
	30		14
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	2	3
	20		3
	30		2
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	128	11
	20		13
	30		11
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	3	8
	20		7
	30		7
	15	90	15
	20		12

Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	30		12



Slika 18. Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 18 ^{o}C

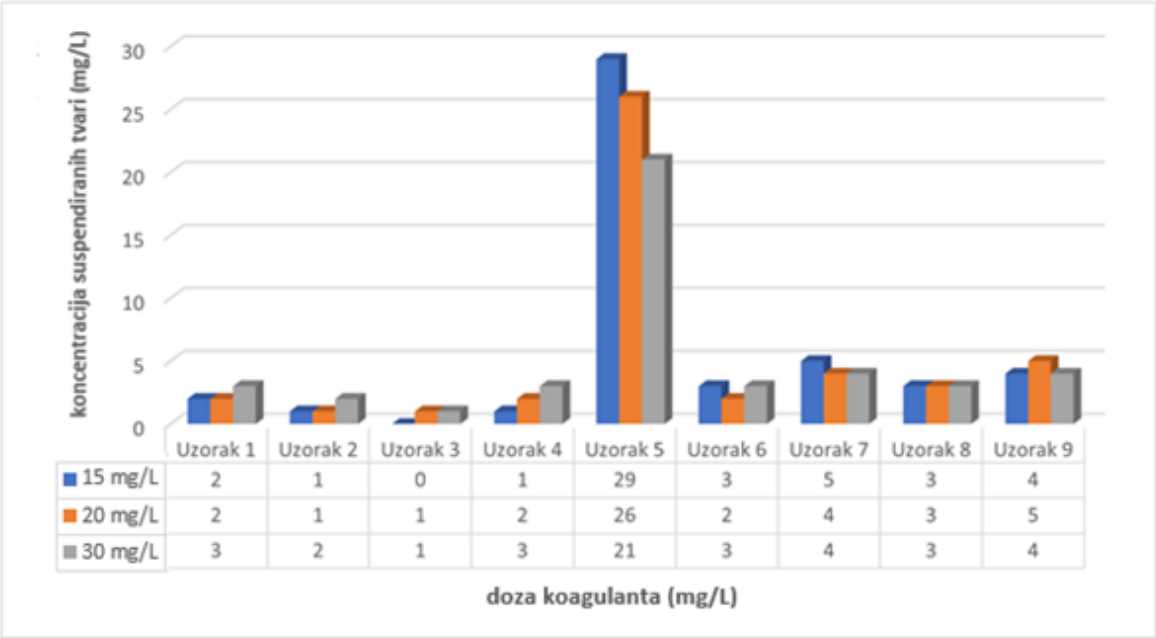
Početne vrijednosti suspendiranih tvari u obrađivanim uzorcima pri temperaturi 18 ^{o}C kretale su se od 2 do 182 mg/L. Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda) i Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava) imaju najmanju koncentraciju suspendiranih tvari, dok je Uzorak 3 (100% mutna Drava) najvišu koncentraciju suspendiranih tvari.

Kako je Uzorak 3 (100% mutna Drava) imao najveću vrijednost, svi uzorci koji su dobiveni miješanjem s mutnom Dravom, (Uzorci 5, 6 i 9) i nakon obrade su imali prekoračenu M.D.K vrijednost suspendiranih tvari (10 mg/L). Obradom uzoraka na temperaturi od 18 ^{o}C Uzorci 1, 2, 3, 4, 6 i 8 zadovoljavali su odredbe Pravilnik o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017).

Tablica 15 Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 24 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	1	2
	20		2
	30		3
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	4	1
	20		1
	30		2
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	172	0
	20		1
	30		1
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	2	1
	20		2
	30		3
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	61	29
	20		26
	30		21
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	3	3
	20		2
	30		3
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	139	5
	20		4
	30		4
	15	3	3

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		3
	30		3
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	87	4
	20		5
	30		4



Slika 19. Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 24 ^{o}C

Pri temperaturi 24 ^{o}C, početne koncentracije uzoraka iznose od 1 do 172 mg/L. Također najveću početnu koncentraciju suspendiranih tvari, pri navedenoj temperaturi, ima mutna Drava (Uzorak 3).

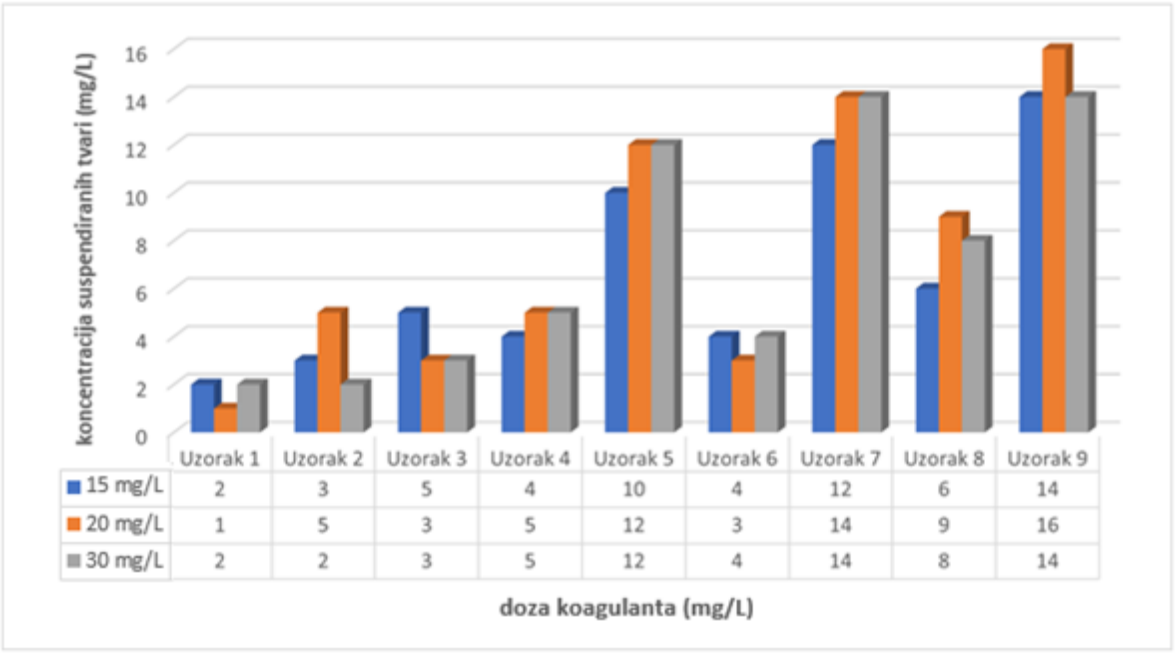
Obrada vode pri temperaturi od 24 ^{o}C pokazuje zadovoljavajuće rezultate, a svi uzorci, osim Uzorak 5, su bili u skladu M.D.K. vrijednosti (10 mg/L) i s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju

te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017).

Tablica 16 Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 30 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST SUSPENDIRANIH TVARI (mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	1	2
	20		1
	30		2
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	5	3
	20		5
	30		2
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	183	5
	20		3
	30		3
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	2	4
	20		5
	30		5
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	59	10
	20		12
	30		12
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	2	4
	20		3
	30		4
	15	138	12

Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	20		14
	30		14
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	4	6
	20		9
	30		8
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	84	14
	20		16
	30		14



Slika 20. Učinkovitost uklanjanja suspendiranih tvari procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 30 ^{o}C

Najvišu početnu koncentraciju suspendiranih tvari od 183 mg/L imali su uzorci mutne Drave, stoga svi uzorci koji su sadržavali mutnu Dravu (Uzorak 5, 7 i 9) imali su povećanu vrijednost suspendiranih tvari.

Obradom uzoraka vode na temperaturi od 30 ^{o}C kod Uzoraka 1, 2, 3, 4, 6 i 8 postignuta je manja vrijednost suspendiranih tvari od M.D.K. vrijednosti, dok su vrijednosti suspendiranih tvari kod preostalih uzoraka, bez obzira na koncentraciju dodanog koagulanta, bile iznad M.D.K vrijednosti (10 mg/L).

Rezultati obrade svih uzoraka ukazuju da je mutna Drava, pa tako i mješavine mutne Drave i aerirane podzemne vode, najzahtjevnija sirovina za preradu vode za piće.

Velike količine ukupnih suspendiranih tvari u površinskim vodama povećavaju temperaturu vode te smanjuju razinu otopljenog kisika. Naime suspendirane čestice apsorbiraju veću količinu topline sunčevog zračenja od molekula vode.

Također, povećane koncentracije čestica u vodi uzrokuju povećanu mutnoću vode i promjenu boje te neupotrebljivost vode za piće (Kuleš i Habuda-Stanić 2000.).

Aerirana podzemna voda i bistra dravska posjeduju niske početne koncentracije suspendiranih tvari te je obrada vode jednostavnija i učinkovitija.

Najbolji rezultati uklanjanja suspendiranih tvari, procesom koagulacije i flokulacije, su postignuti pri temperaturi 24 ^{o}C.

4.3. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UČINKOVITOST UKLANJANJA BOJE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE

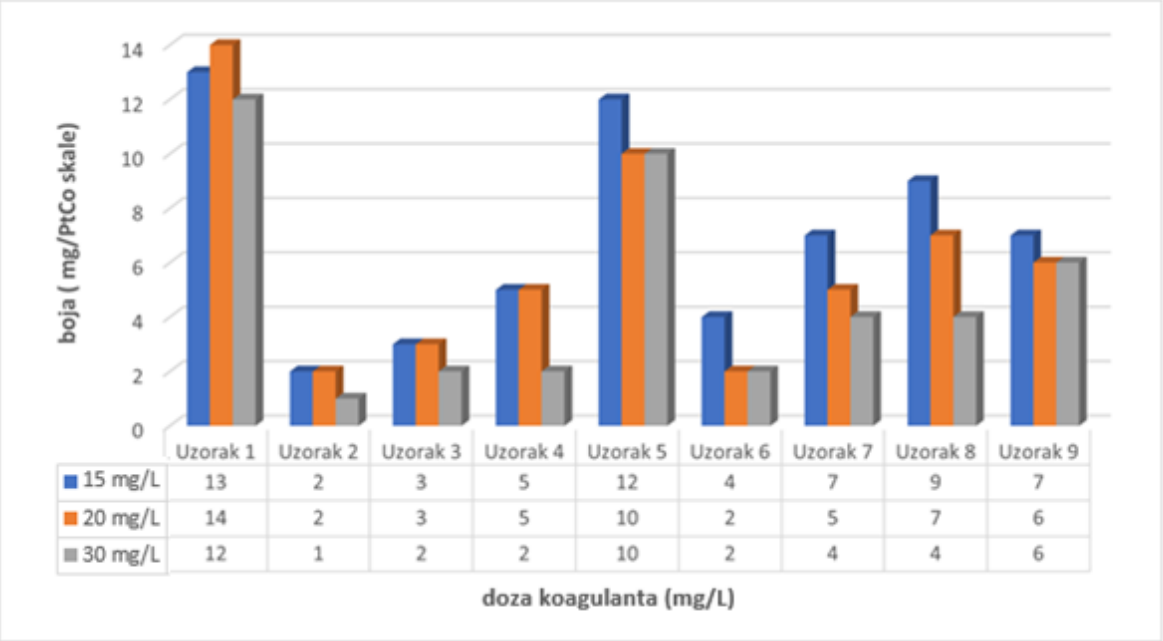
Učinkovitost uklanjanja boje metodom koagulacije i flokulacije u uzorcima aerirane podzemne vode i uzorcima vode rijeke Drave ispitana je jar-testom te membranskom filtracijom pri čemu je boja određivana spektrofotometrom (**Slika 11**). Uzorci vode su obrađeni na temperaturama 10,5 ^{o}C, 18 ^{o}C, 24 ^{o}C i 30 ^{o}C. Dobiveni rezultati su prikazani u **Tablicama 17-20** te grafičkim prikazima na **Slikama 21-24**.

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) M.D.K. vrijednost za boju vode za ljudsku potrošnju iznosi 20,0 mg/PtCo skale.

Tablica 17 Učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 10,5 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	79	13
	20		14
	30		12
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	37	2
	20		2
	30		1
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	162,3	3
	20		3
	30		2
	15	60	5

Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	20		5
	30		2
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	100	12
	20		10
	30		10
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	41	4
	20		2
	30		2
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	127	7
	20		5
	30		4
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	51	9
	20		7
	30		4
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	120	7
	20		6
	30		6



Slika 21. Grafički prikaz učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 10,5 ^{o}C

Obradom uzoraka na temperaturi 10,5 ^{o}C smanjena je početna vrijednost boje u vodi kod svih uzoraka, odnosno svi uzorci nakon obrade imali su vrijednost boje u dozvoljenim koncentracijama prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017).

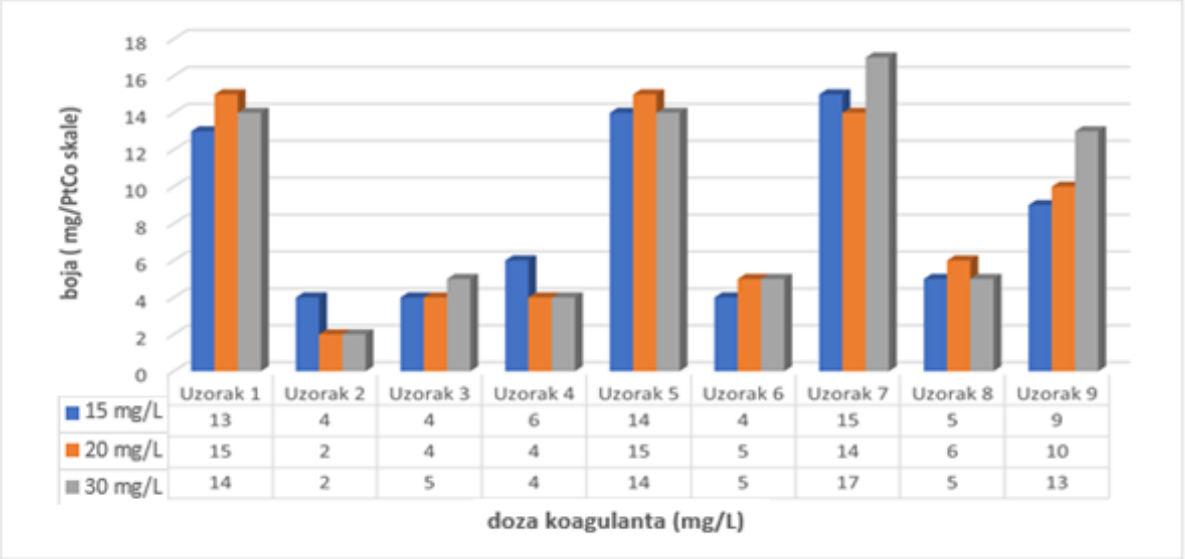
Također iz grafičkog prikaza (**Slika 21**) može se uočiti da Uzorak 2, 3, i 6 imaju vrijednosti boje ispod 5 mg/PtCo skale, dok je pri obradi Uzorka 1 postignuta najslabija učinkovitost uklanjanja.

Uzorci aerirane podzemne vode posjeduju više vrijednosti boje vode nego uzorci rijeke Drave. Kao najuspješnija doza koagulanta pokazala se doza od 30 mg/L.

Tablica 18 Učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 18 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	73	13
	20		15
	30		14
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	31	4
	20		2
	30		2
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	157,2	4
	20		4
	30		5
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	61	6
	20		4
	30		4
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	102	14
	20		15
	30		14
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	40	4
	20		5
	30		5
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	122	15
	20		14
	30		17
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	48	5
	20		6
	30		5

Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	118	9
	20		10
	30		13



Slika 22. Grafički prikaz učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 18 ^{o}C

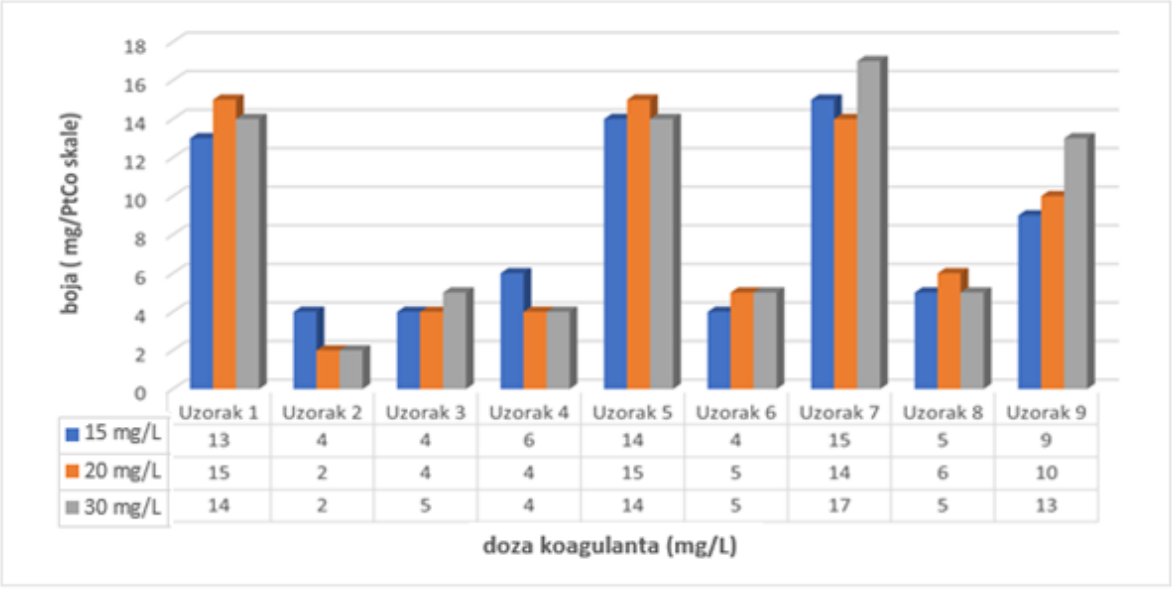
Početna vrijednost boje kod svih neobrađenih uzoraka vode prekoračuje M.D.K vrijednost (20 mg/PtCo skale), dok nakon obrade uzoraka na temperaturi 18 ^{o}C svi uzorci imali su dopuštenu vrijednost boje, kao što je vidljivo na **Slici 22**.

S aspekta kemijskog sastava vode, najbolja učinkovitost uklanjanja boje postignuta je pri obradi Uzorka 2 (čista dravska voda) iako u omjerima s aeriranom podzemnom vodom se obradom postižu zadovoljavajući rezultati (Uzorak 4, 6 i 8). Kao najpovoljniji uzorak za uklanjanje boje pokazala se mješavina dravske i aerirane podzemne vode Uzorak 4 dobiven mješanjem 70% aerirane i 30% čiste dravske vode.

Tablica 19 Učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 24 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	68	14
	20		13
	30		10
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	40	2
	20		1
	30		1
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	173,5	2
	20		3
	30		2
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	63	4
	20		5
	30		4
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	102	7
	20		6
	30		7
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	46	3
	20		2
	30		2
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	131	5
	20		5
	30		4
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	47	7
	20		7
	30		8

Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	121	9
	20		8
	30		6



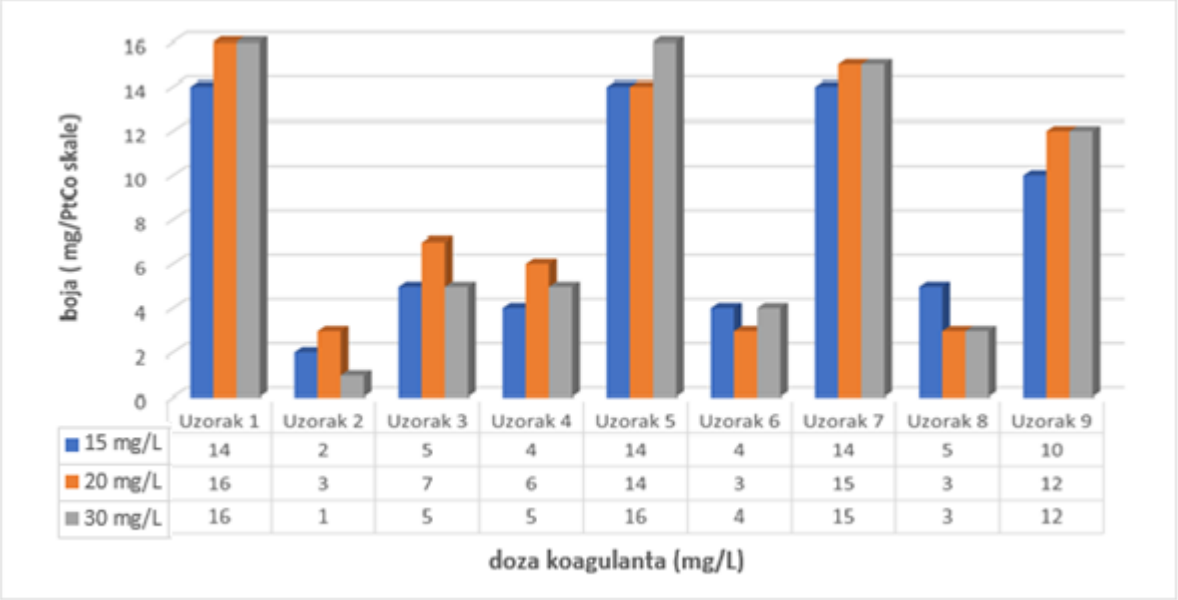
Slika 23. Grafički prikaz učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 24 ^{o}C

Pri obradi uzoraka na temperaturi 24 ^{o}C, svi uzorci su imali vrijednost boje manju od MDK vrijednosti (20 mg/Pt skale), a visoka učinkovitost pri uklanjanju boje postignuta je pri obradi čiste i mutne dravske vode (Uzorak 2 i 3). Najbolji učinak je postignut pri obradi na temperaturi od 24 ^{o}C postignut je pri omjeru sastava vode od 30% aerirane podzemne vode i 70% čiste Drave (Uzorak 6).

Tablica 20 Učinkovitost uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 30 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST BOJE (mg/PtCo skale)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	83	14
	20		16
	30		16
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	33	2
	20		3
	30		1
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	170,1	5
	20		7
	30		5
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	64	4
	20		6
	30		5
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	97	14
	20		14
	30		16
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	39	4
	20		3
	30		4
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	129	14
	20		15
	30		15
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	54	5
	20		3
	30		3

Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	118	10
	20		12
	30		12



Slika 24. Grafički prikaz učinkovitosti uklanjanja boje procesom koagulacije i flokulacije pri temperaturi 30 ^{o}C

Izmjerene vrijednosti boje kod svih uzoraka vode nakon obrade vode na temperaturi 30 ^{o}C, bile su u skladu s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017). Najveće vrijednosti boje nakon obrade imali su uzorci aerirane podzemne vode (Uzorak 1) te aerirana podzemna voda u kombinaciji sa zamućenom Dravom (Uzorak 5, 7 i 9), kao što je prikazano na **Slici 24**.

4.4. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA VODLJIVOST PRI OBRADI VODE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE

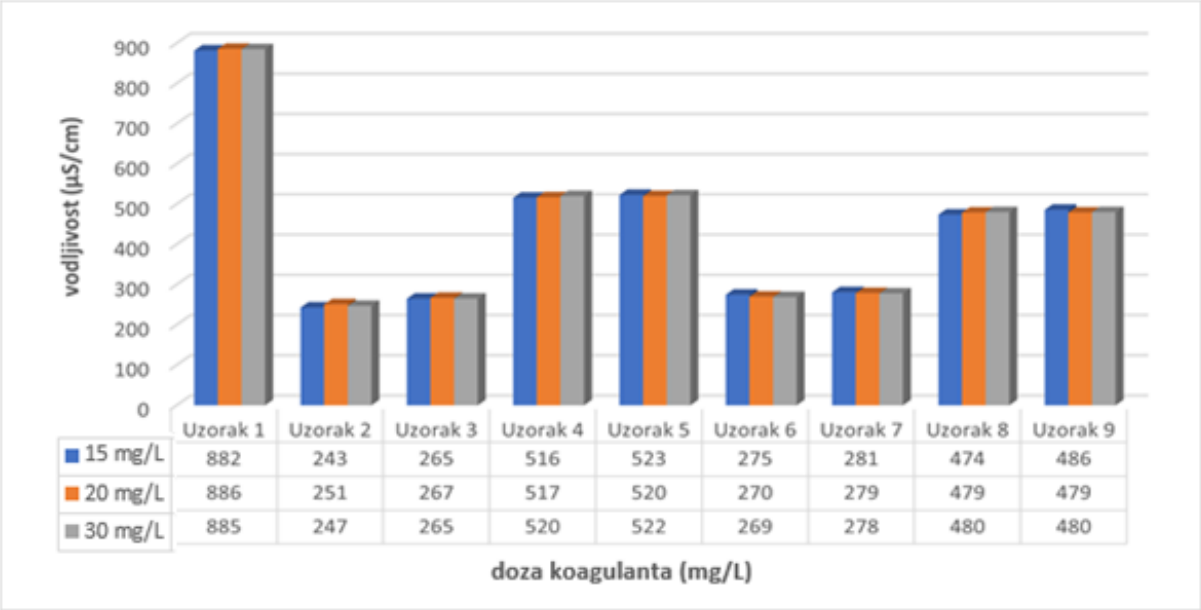
Utjecaj obrade vode metodom koagulacije i flokulacije te temperature, kemijskog sastava i koncentracije koagulanta na vodljivost pri obradi uzoraka aerirane podzemne vode i uzoraka vode rijeke Drave te njihovih mješavina ispitana je jar-testom te membranskom filtracijom pri čemu je vrijednost vodljivosti određivana konduktometrom (**Slika 12**). Uzorci vode su obrađeni na temperaturama 10,5 ^{o}C, 18 ^{o}C, 24 ^{o}C i 30 ^{o}C, a rezultati prikazani u **Tablicama 21-24** i **Slikama 25-28**.

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) M.D.K. vrijednost za vodljivost vode za ljudsku potrošnju iznosi 2500 µS/cm /20 ^{o}C.

Tablica 21 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na vodljivost pri temperaturi 10,5 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	823	882
	20		886
	30		885
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	275	243
	20		251
	30		247
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	223	265
	20		267
	30		265
	15	621	516
	20		517

Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	30		520
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	611	523
	20		520
	30		522
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	612	275
	20		270
	30		269
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	619	281
	20		279
	30		278
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	511	474
	20		479
	30		480
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	510	486
	20		479
	30		480



Slika 25. Grafički prikaz učinkovitosti obrade vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 10,5 ^{o}C na vodljivost

Kao što se vidi na **Slici 25** vrijednost vodljivosti svih uzoraka nakon obrade vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 10,5 ^{o}C bile su u skladu s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017), no i početne vrijednosti vodljivosti uzoraka su također bile u granicama M.D.K. vrijednosti.

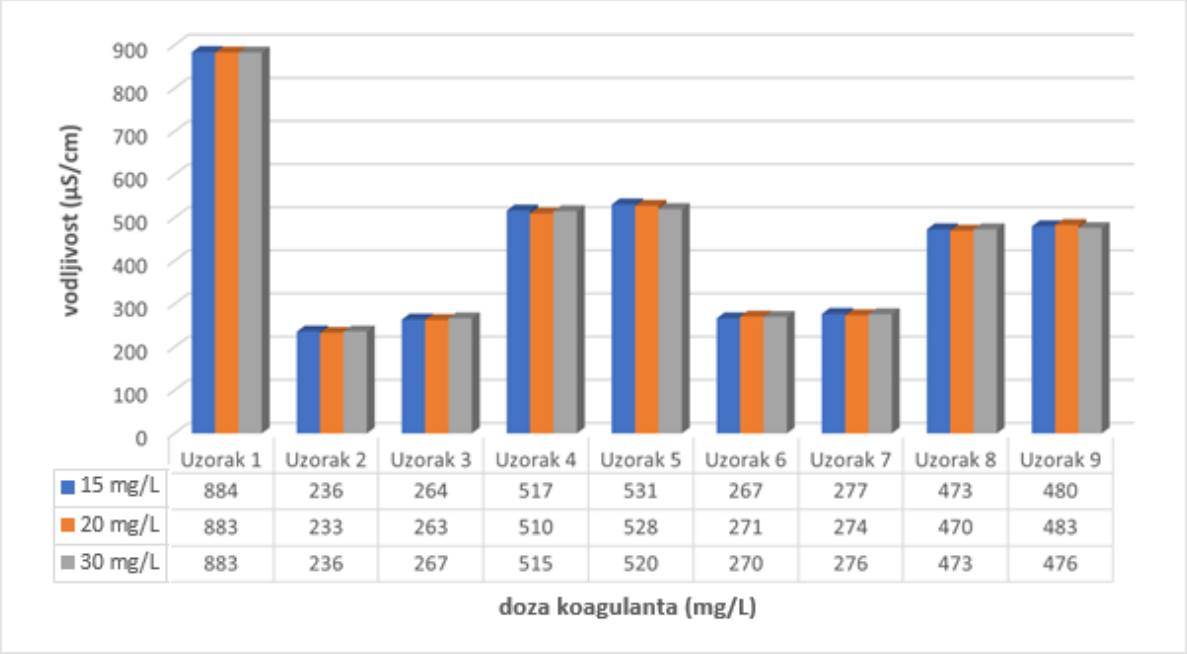
Najveće vrijednosti nakon obrade ispitivanih uzoraka vode zabilježeni su pri obradi 100%-tne aerirane podzemne vode (Uzorak 1) dok su ostali uzorci površinske i zamućene vode rijeke Drave su imali znatno bolju učinkovitost uklanjanja vodljivosti (Uzorak 2, 3, 6 i 7). Obradom uzoraka dobivenih miješanjem 30% aerirane podzemne vode i 70% čiste vode rijeke Drava (Uzorak 6), te miješanjem 30% aerirane podzemne vode i 70% zamućene vode rijeke Drave (Uzorak 7) postignuto je najveće sniženje vodljivosti.

Obradom ispitivanih uzoraka vode na temperaturi 10,5 ^{o}C, utjecaj doze koagulanta na učinkovitost uklanjanja vodljivosti kod svih uzoraka je bio približno jednak.

Tablica 22 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na vodljivost pri temperaturi 18 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	820	884
	20		883
	30		883
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	279	236
	20		233
	30		236
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	229	264
	20		263
	30		267
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	623	517
	20		510
	30		515
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	615	531
	20		528
	30		520
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	610	267
	20		271
	30		270
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	621	277
	20		274
	30		276
	15	516	473

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		470
	30		473
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	523	480
	20		483
	30		476



Slika 26. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi 18 ^{o}C na vodljivost

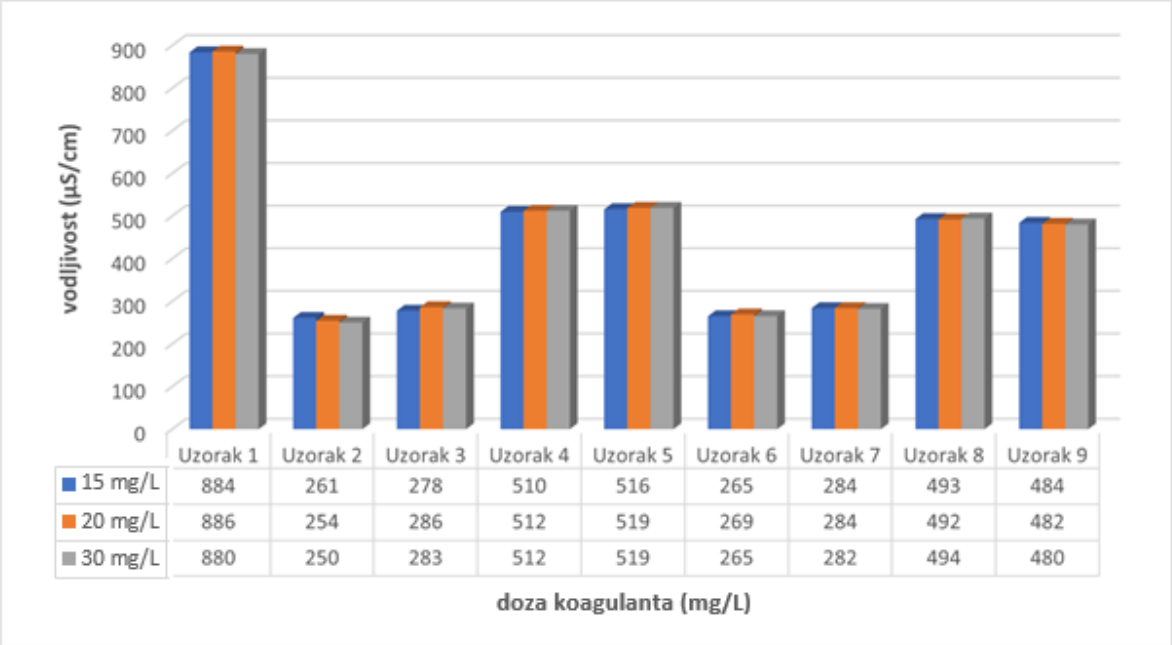
Iz grafičkog prikaza na **Slici 26** vidimo da su dobiveni rezultati obrađenih uzoraka na temperaturi od 18 ^{o}C u skladu s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017). Kao i kod obrade uzoraka na temperaturi od 10,5 ^{o}C najvišu vrijednost vodljivosti posjeduje aerirana podzemna voda (Uzorak 1) stoga uzorci koji u mješavini sadrže 50% ili 70% aerirane podzemne vode (Uzorak 4, 5, 8 i 9) imali su veću vodljivost u odnosu na uzorke s većim udjelom bistre ili

zamućene vode rijeke Drave (Uzorak 2, 3, 6 i 7). Količina dodanog koagulanta na učinkovitost smanjenja vodljivosti prilikom obrade je jednaka kod svih doza, odnosno bitnija odstupanja nisu zabilježena.

Tablica 23 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na vodljivost pri temperaturi 24 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	828	884
	20		886
	30		880
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	275	261
	20		254
	30		250
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	224	278
	20		286
	30		283
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	623	510
	20		512
	30		512
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	632	516
	20		519
	30		519
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	627	265
	20		269
	30		265
	15	624	284

Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	20		284
	30		282
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	512	493
	20		492
	30		494
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	518	470
	20		473
	30		475



Slika 27. Grafički prikaz učinkovitosti obrade vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi od 24 ^{o}C na vodljivost

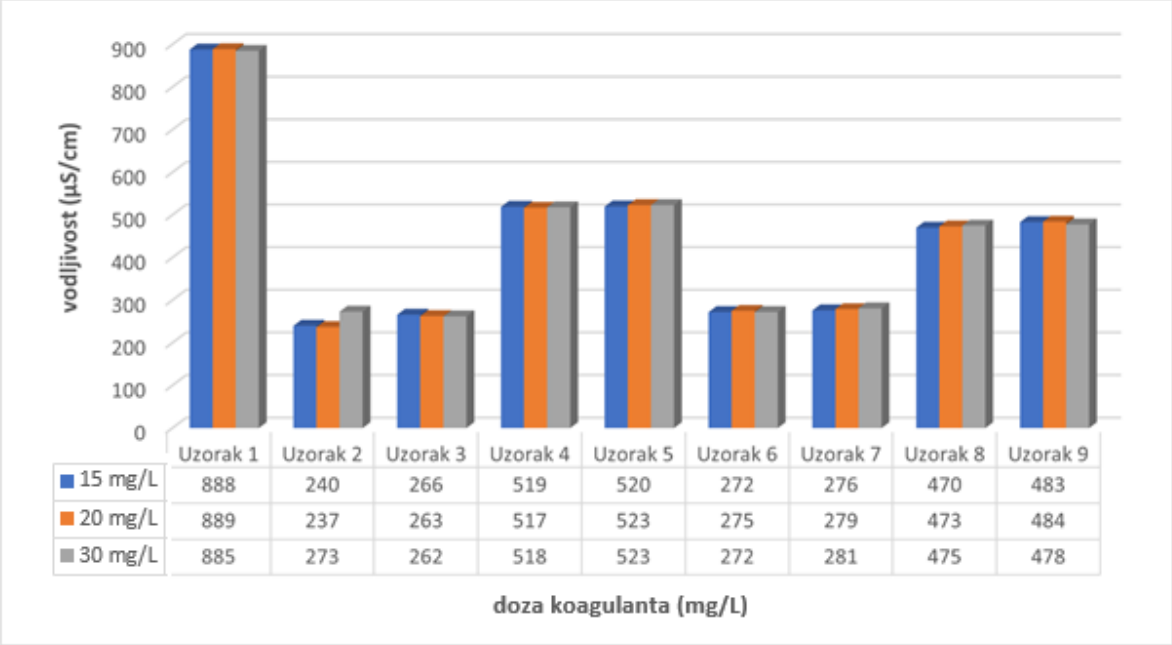
Obradom uzoraka na temperaturi od 24 ^{o}C dobivene vrijednosti vodljivosti su također u skladu s Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017). Utjecaj kemijskog sastava vode i temperature

od 24 ^{o}C na učinkovitost smanjenja vodljivosti je jednaka kao i kod temperatura 10,5 ^{o}C i 18 ^{o}C. Najmanju vrijednost vodljivosti nakon obrade imali su uzorci s bistrom i zamućenom dravskom vodom dok su uzorci s podzemnom vodom imali najvišu vodljivost.

Tablica 24 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na vodljivost pri temperaturi 30 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST VODLJIVOSTI (µS/cm)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	423	888
	20		889
	30		885
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	283	240
	20		237
	30		237
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	228	266
	20		263
	30		262
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	619	519
	20		517
	30		518
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	619	520
	20		523
	30		523
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	625	272
	20		275
	30		272
	15	623	276
	20		279

Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	30		281
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	509	470
	20		473
	30		475
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	509	483
	20		484
	30		478



Slika 28. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom pri temperaturi od 30 ^{o}C na vodljivost

Obradom uzoraka vode na temperaturi od 30 ^{o}C nastavlja se isti trend kao i pri obradi uzoraka na temperaturama 10,5 ^{o}C, 18 ^{o}C i 24 ^{o}C. Uspješnost smanjenja vodljivosti u odnosu na početnu vrijednost je najznačajnija kod Uzorka 6 (30% aerirana podzemna voda i 70% bistra voda Drava). **Slika 28** također ukazuje da količina dodanog koagulanta na učinkovitost

smanjenja vodljivosti prilikom obrade vode je jednaka kod svih doza, odnosno značajnija odstupanja nisu zabilježena.

4.5. UTJECAJ TEMPERATURE, KEMIJSKOG SASTAVA VODE I KONCENTRACIJE KOAGULANTA NA UKUPNU TVRDOĆU PRI OBRADI VODE PROCESOM KOAGULACIJE I FLOKULACIJE

Utjecaj temperature, kemijskog sastava vode i doze koagulanta na ukupnu tvrdoću obrađene vode procesom koagulacije i flokulacije određen je titrimetrijskom metodom s 0,01 M otopinom EDTA (etilen-diamin-tetraoctena kiselina). Obrada uzoraka je provedena na temperaturama 10,5 ^{o}C, 18 ^{o}C, 24 ^{o}C i 30 ^{o}C, a rezultati prikazani u **Tablicama 26-29** i grafičkim prikazima **Slika 29-32**.

Prema Pravilniku o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (NN 125/2017) M.D.K. vrijednost ukupne tvrdoće vode nije definirana.

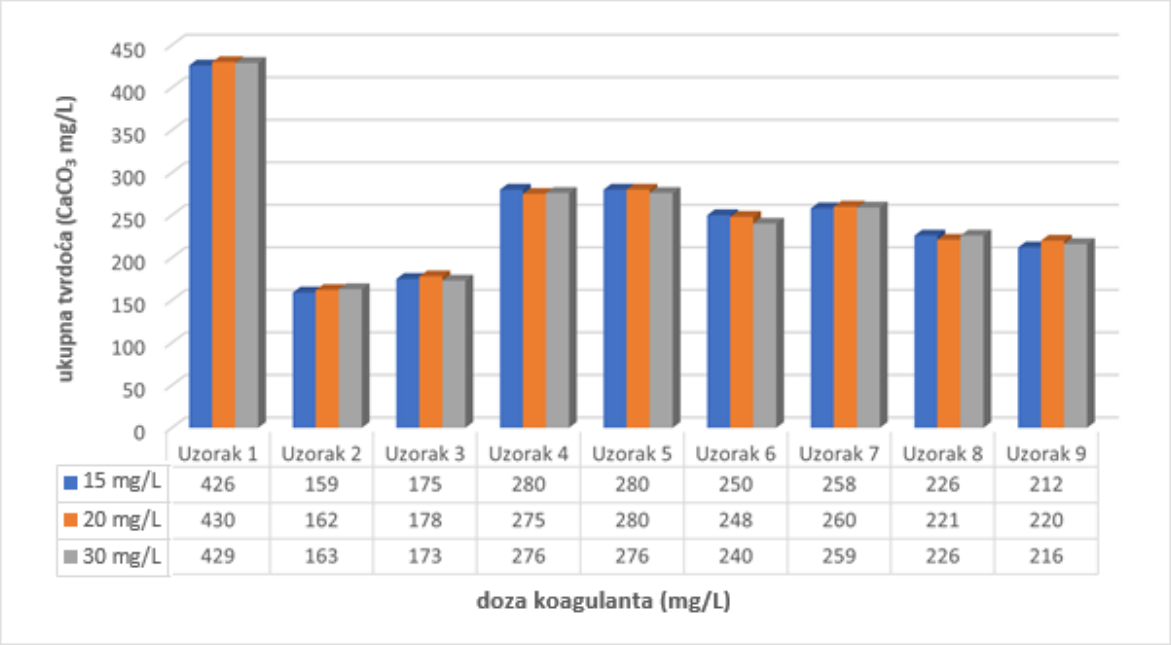
Obzirom da prema smjernicama WHO nema određenih granica za ukupnu tvrdoću vode vezanih za zdravlje svakako treba pripazit na tvrdoću vode. Naime, jako tvrda voda može potrošačima biti odbojna zbog specifičnog okusa. S druge strane istraživanja su utvrdila da se ne preporuča niti konzumacija meke vode zbog lošeg utjecaja na ravnotežu minerala u organizmu (https://www.varkom.hr/stranica/tvrdoce). Podjela vode prema tvrdoći vode:

- Meka < 71,4 mg/L $CaCO_3$
- Lagano tvrda 71,4-142,8 mg/L $CaCO_3$
- Umjereno tvrda 142,8-321,4 mg/L $CaCO_3$
- Tvrda 321,4-535,7 mg/L $Caco_3$
- Jako tvrda > 535,7 mg/L $CaCO_3$

Tablica 25 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 10,5 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	480,4	426
	20		430
	30		429
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	251,3	159
	20		162
	30		163
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	207,3	175
	20		178
	30		173
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	378,9	280
	20		275
	30		276
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	374	280
	20		280
	30		276
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	376,8	250
	20		248
	30		240
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	369,9	258
	20		260
	30		259
	15	373,8	226

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		221
	30		226
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	368,8	212
	20		220
	30		216



Slika 29. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 10,5 ^{o}C

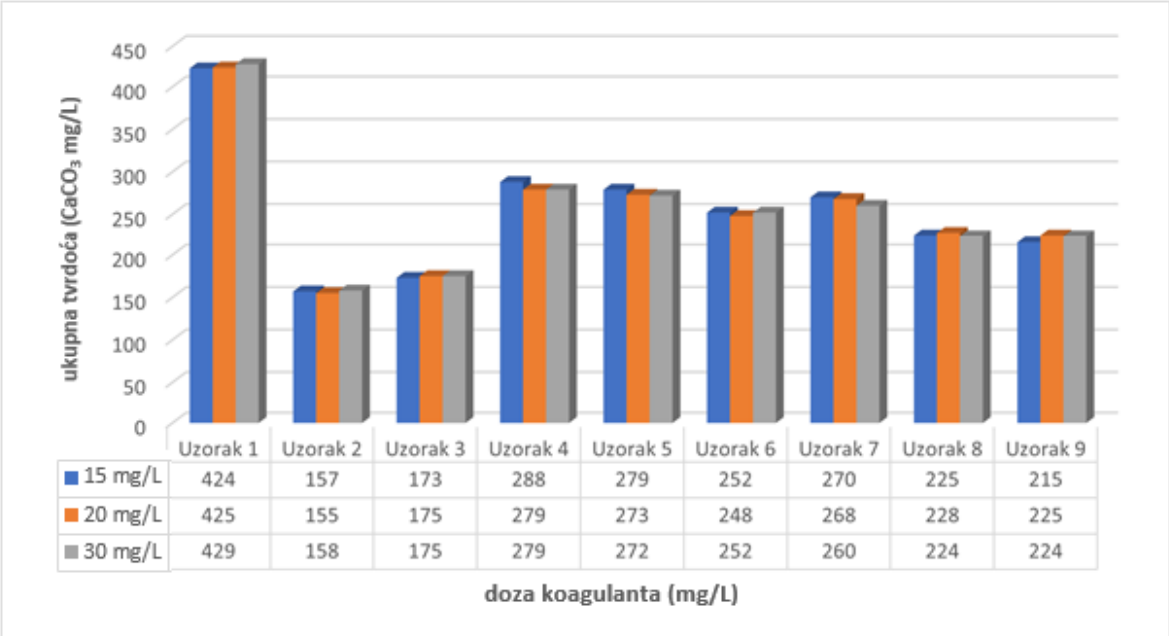
Početna vrijednost ukupne tvrdoće ispitivanih uzoraka vode na temperaturi 10,5 ^{o}C kretala se od 251,3 do 480,4 mg/L $CaCO_3$, dok je nakon obrade vrijednost bila od 430 do 159 mg/L $CaCO_3$. Obradom uzoraka došlo je do smanjenja ukupne tvrdoće vode, odnosno tvrdoća vode u obrađenim uzorcima bila je umjereno tvrda osim u Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda).

Kao što prikazuje **Slika 29** utjecaj doze koagulanta na smanjenje ukupne tvrdoće je jednak pri svakom doziranju.

Tablica 26 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 18 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	485,2	424
	20		425
	30		429
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	242,7	157
	20		155
	30		158
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	218,8	173
	20		175
	30		175
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	381,2	288
	20		279
	30		279
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	368,5	279
	20		273
	30		272
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	383,8	252
	20		248
	30		252
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	369,3	270
	20		268
	30		260
	15	382,6	225

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		228
	30		224
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	371,5	215
	20		225
	30		224



Slika 30. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 18 ^{o}C

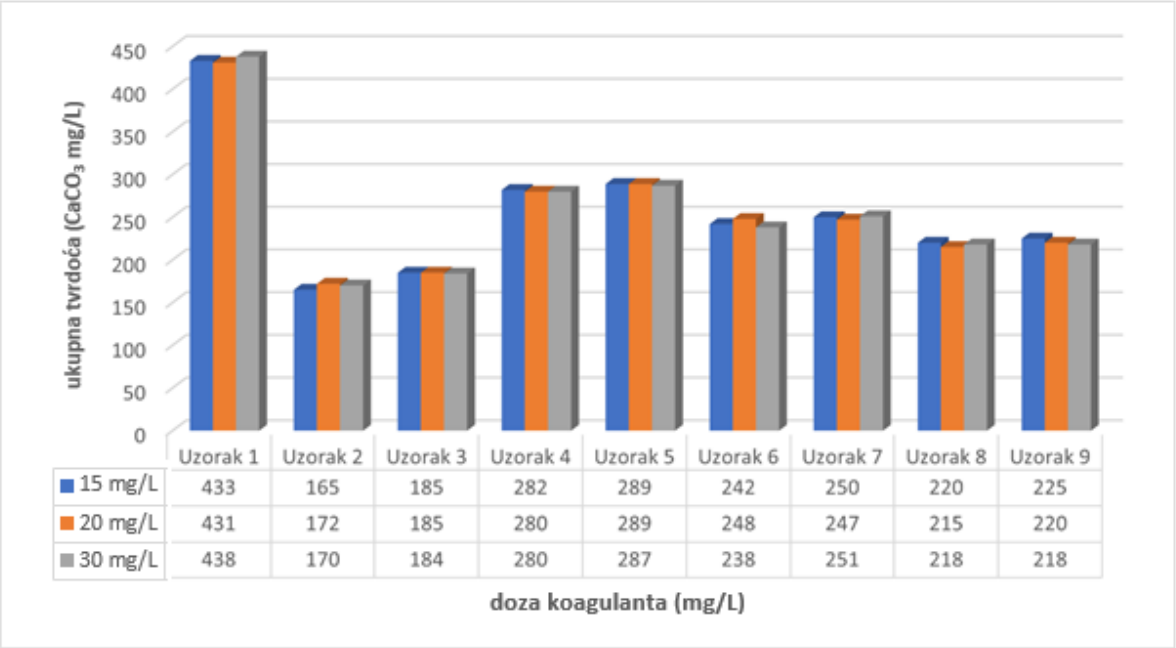
Početna vrijednost uzoraka na temperaturi 18 ^{o}C kretala se od 485,2 do 383,8 mg/L $CaCO_3$, dok je nakon obrade vrijednost bila od 429 do 155 mg/L $CaCO_3$. Obradom uzoraka smanjena je tvrdoća vode, odnosno tvrdoća vode u obrađenim uzorcima bila je umjereno tvrda osim kao i u prethodnom setu pri obradi Uzorka 1 (100% aerirana podzemna voda).

Slika 30 također prikazuje i da je utjecaj doze koagulanta na smanjenje ukupne tvrdoće jednak pri svakom doziranju.

Tablica 27. Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 24 °C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)
Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	473,2	433
	20		431
	30		438
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	239,6	165
	20		172
	30		170
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	196,31	185
	20		185
	30		184
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	381,6	282
	20		280
	30		280
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	367,2	289
	20		289
	30		287
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	364	242
	20		248
	30		238
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	363,7	250
	20		247
	30		251
	15	372,5	220

Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	20		215
	30		218
Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	15	362,1	225
	20		220
	30		218



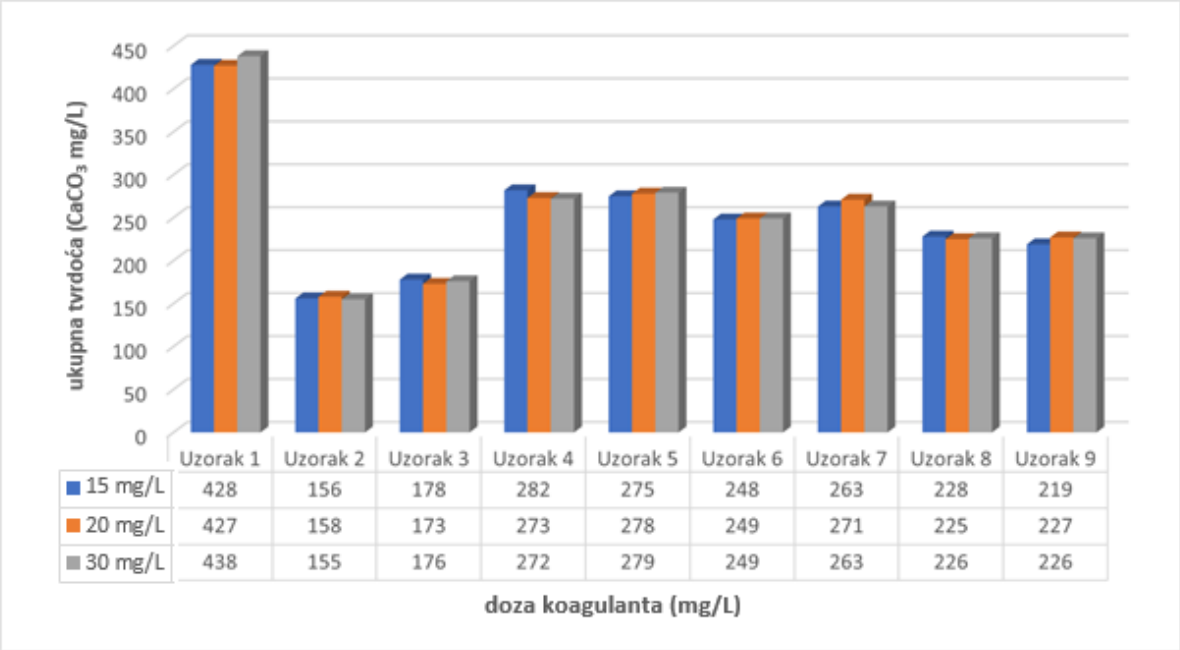
Slika 31. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 24 ^{o}C

Tablica 28 Utjecaj obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 30 ^{o}C

UZORCI	KONCENTRACIJA KOAGULANTA (mg/L)	POČETNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)	ZAVRŠNA VRIJEDNOST UKUPNE TVRDOĆE ($CaCO_3$ mg/L)

Uzorak 1 (100% aerirana podzemna voda)	15	477,3	428
	20		427
	30		438
Uzorak 2 (100% čista Drava)	15	243,2	156
	20		158
	30		155
Uzorak 3 (100% mutna Drava)	15	198,2	178
	20		173
	30		176
Uzorak 4 (70% aerirana podzemna voda + 30% čista Drava)	15	379,1	282
	20		273
	30		272
Uzorak 5 (70% aerirana podzemna voda + 30% mutna Drava)	15	370,5	275
	20		278
	30		279
Uzorak 6 (30% aerirana podzemna voda + 70% čista Drava)	15	375	248
	20		249
	30		249
Uzorak 7 (30% aerirana podzemna voda + 70% mutna Drava)	15	370,3	263
	20		271
	30		263
Uzorak 8 (50% aerirana podzemna voda + 50% čista Drava)	15	376,4	228
	20		225
	30		226
	15	371,5	219
	20		227

Uzorak 9 (50% aerirana podzemna voda + 50% mutna Drava)	30		226



Slika 32. Grafički prikaz utjecaja obrade vode koagulacijom i flokulacijom na ukupnu tvrdoću pri temperaturi 30 ^{o}C

Analizom uzoraka obrađenim na temperaturama 24 ^{o}C i 30 ^{o}C dobiveni su slične vrijednosti ukupne tvrdoće za sve obrađene uzorke. Također, obradom vode na navedenim temperaturama vrijednost tvrdoće vode se smanjila na vrijednost umjereno tvrde vode (**Tablice 28-29**). Nadalje, izuzetak je ponovno uočen pri obradi Uzorka 1 (100% aerirana podzemna voda), kao i pri nižim temperaturama, koji nakon obrade i dalje ima tvrdu vodu.

Kao što prikazuju **Slike 31-32** i pri višim temperaturama utjecaj doze koagulanta na smanjenje ukupne tvrdoće je jednak pri svakom doziranju.

5. ZAKLJUČCI

Iz dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Metodom koagulacije i flokulacije u procesu obrade vode ispitivanih uzoraka podzemne i površinske vode, postignuto je učinkovito uklanjanje arsena i mangana. Iznimno učinkovitim se pokazala obrada mješavine podzemne i površinske vode u omjeru 70% aerirana podzemna voda i 30% bistra dravska voda, pri temperaturi 10,5 ^{o}C i dozi koagulanta od 30 mg/L, pri čemu je koncentracija arsena smanjena s početnih 127,8 µg/L na 3,31 µg/L što iznosi 97,72% uklonjenog arsena. Najveći postotak uklonjenog arsena u vodi nakon obrade, na svim temperaturama, postignut je pri dozi koagulanta od 30 mg/L.
- S obzirom na kemijski sastav vode, općenito su najbolji rezultati postignuti pri obradi uzoraka vode rijeke Drave, dok su najlošiji rezultati postignuti sa 100%-tnom aeriranom podzemnom vodom grada Osijeka.
- Najveći postotak uklonjenog mangana postignut je pri obradi vode na temperaturi od 18 ^{o}C i dozi koagulanta od 15 mg/L, gdje je vrijednost mangana smanjena s početnih 153 µg/L na 25 µg/L, odnosno uklonjeno je 83,66% mangana. Nakon obrade svih uzoraka vode, najmanja vrijednost mangana zabilježena je pri obradi uzorka sa 70% aerirane podzemne vode grada Osijeka i 30% bistre dravske vode, pri temperaturi 10,5 ^{o}C i dozi koagulanta od 15 mg/L.
- Pri određivanju utjecaja temperature i kemijskog sastava vode na uklanjanje suspendiranih tvari, najbolji rezultati su postignuti pri temperaturi 24 ^{o}C, gdje je samo uzorak sa 70% aerirane podzemne vode grada Osijeka i 30% zamućene površinske vode rijeke Drave imao prekoračenje M.D.K. vrijednosti. Najučinkovitija obrada postignuta pri temperaturi 24 ^{o}C postignuta je pri obradi mješavine 70% aerirane podzemne vode i 30% bistre vode rijeke Drave. Mutna Drava zbog velikih početnih koncentracija suspendiranih tvari je zahtjevnija sirovina za obradu vode za piće u odnosu na podzemnu vodu i bistru površinsku vodu rijeke Drave.
- Obradom uzoraka procesom koagulacije i flokulacije, povišena vrijednost boje u svim uzorcima je smanjena na dopuštenu vrijednost. Najveću učinkovitost uklanjanja boje, i to čak preko 95%, pri svim temperaturama postignuto je pri obradi zamućenih uzoraka vode rijeke Drave. Najmanju vrijednost boje nakon obrade, pri svim temperaturama, imali su bistri uzorci vode rijeke Drave pri dozi koagulanta od 30

mg/L. Najučinkovitija obrada dobivena je pri obradi uzoraka dobivenih miješanjem 30% aerirane podzemne vode i 70% bistre vode rijeke Drave. Također, izvrsni rezultati postignuti su i pri obradi mješavine omjera 70% aerirane podzemne vode i 30% bistre vode rijeke Drave.

- Dobiveni rezultati za vodljivost su podjednaki pri svim temperaturama. Također, različite doze koagulanta nisu činile značajnije razlike u rezultatima unutar obrade svakog pojedinog uzorka. Uzorci aerirane podzemne vode grada Osijeka imali su najviše vrijednosti vodljivosti, a uzorci vode rijeke Drave manje vrijednosti vodljivosti.
- Promjena temperature i koncentracije koagulanta nije značajno utjecala na promjenu ukupne tvrdoće vode. Obradom uzoraka vode smanjena je tvrdoća vode s tvrde na umjerenu tvrde vode. Prema vrsti uzorka, najmanje smanjenje tvrdoće vode postignuto je pri obradi 100% aerirane podzemne vode grada Osijeka čija je ukupna tvrdoća iznosila od 424-438 $CaCO_3$ mg/L.
- Najbolja učinkovitost pri uklanjanju suspendiranih tvari i boje te smanjenju vodljivosti i ukupne tvrdoće postignuti su pri obradi mješavine od 70% aerirane podzemne vode grada Osijeka i 30% površinske vode rijeke Drave.
- Zbog iznimno dobre učinkovitosti postignute pri obrade metodom koagulacije i flokulacije, u pogonu tvrtke Vodovod-Osijek d.o.o. obrađivala se voda dobivena miješanjem 70% aerirane podzemne vode grada Osijeka i 30% površinske vode rijeke Drave.
- Optimalna temperatura za obradu svih ispitanih uzoraka vode pokazala se temperatura od 24 ^{o}C.

6. LITERATURA

Degremont G.: Tehnika prečišćavanja voda, Građevinska knjiga, Beograd, 1976.

Edwards M. 1994. Chemistry of Arsenic Removal during Coagulation and Fe-Mn Oxidation. *Journal of the American Water Works Association*, 86:64-78.

Habuda-Stanić M.: Uklanjanje aniona arsena iz podzemne vode na funkcionaliziranim adsorbensima. *Doktorski rad*, Prehrambeno-tehnološki fakultet u Osijeku, 2011.

Habuda-Stanić M., Kuleš M.: Arsen u vodi za piće, Zavod za kemiju, Prehrambeno tehnološki fakultet, Sveučilišta J.J. Strossmayera, 2002.

Hem J. D.: Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. University Press of the Pacific, Honolulu 2005

Kralj E.: Pokazatelji i indeksi kakvoće podzemnih i površinskih voda istočne Hrvatske. *Doktorska disertacija*, Prehrambeno-tehnološki fakultet u Osijeku, 2017.

Košutić K: Membranske tehnologije obrade voda. *Zbirka nastavnih tekstova*. Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2019.

Leist M., R. J. Casey, D. Caridi: The management of arsenic wastes: problems and prospects. *J.Hazard Mater*, 76(1):125-38, 2000.

Lytle D. A., Sorg T. J., Snoeyink V.I.: Optimizing arsenic removal during iron removal: Theoretical and practical considerations. *J. Water Supply Res Technol.-Aqua*, 54 (8) 545-560, 2005.

Medverec Knežević Z.: Utjecaj oksidacije na učinkovitost uklanjanja prekursora trihalometana iz vode koagulacijom i flokulacijom. *Doktorski rad*. Prehrambeno-tehnološki fakultet u Osijeku, 2019.

Pal P., Ahammad S. Z., Pattanayak A.: Removal of arsenic from drinking water by chemical precipitation-a modeling and simulation study of the physical-chemical processes. *Water Environment Research,* 79, 357-366, 2007.

Romić Ž.: Arsen u podzemnoj vodi osječkog vodocrpilišta i oksidacija arsenita pri kondicioniranju vode. *Doktorska disertacija*. Prehrambeno-tehnološki fakultet u Osijeku, 2009.

Smedley P. L., D. G. Kinniburg: A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, 17(5):517-568, 2002.

Song S., Gallegos-Garcia M.: Arsenic Removal from Water by the Coagulation Process. *The Role of Colloidal Systems in Environmental Protection*, 261-277, 2014.

Viraraghavan T., Subramanian K.S., Aruldoss J.A.: Arsenic in drinking water-problems and solutions. *Water Science Technology* 40 (2), 69–76., 1999.

https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2017_12_125_2848.html [17.12.2020.]

https://vodovod.com/vodne-usluge/vodoopskrba/ [12.11.2020.]

https://www.varkom.hr/stranica/tvrdoce [18.12.2020.]