

Uklanjanje mikročestica polietilena i polipropilena iz vode

Valek, Lorena

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:446499>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-17**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Lorena Valek

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET
KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Lorena Valek

UKLANJANJE MIKROČESTICA POLIETILENA I POLIPROPILENA IZ VODE

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada: prof. dr. sc. Tomislav Bolanča

Članovi ispitnog povjerenstva: prof. dr. sc. Tomislav Bolanča

doc. dr. sc. Dajana Kučić Grgić

dr. sc. Matija Cvetnić

Zagreb, rujan 2020.

Zahvaljujem svim profesorima Fakulteta jer su mi tijekom dosadašnjeg studiranja prenijeli znanja koja su uvelike olakšala izradu ovog rada, a posebno asistentu Matiji Cvetniću na pruženoj pomoći pri izradi završnog rada. Također, zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Tomislavu Bolanči i izv. prof. dr. sc. Šimi Ukiću na danim smjernicama i nesebičnoj pomoći.

Hvala mojim dragim kolegicama koje su svojim savjetima i slušanjem bile od iznimne pomoći tijekom pisanja ovog rada te mojim dugogodišnjim prijateljima i dečku na razumijevanju i nesebičnoj podršci.

Najveće hvala mojim roditeljima koji su mi omogućili neometano i bezbrižno obrazovanje. Veliko hvala mom bratu i sestri te ostatku moje obitelji koji su mi uvijek pružali bezuvjetnu podršku. Posebno hvala mojoj baki koja je uvijek bila dežurni slušatelj, savjetnik i tješitelj.

Ovaj rad je izrađen u sklopu projekta „Primjena naprednih tehnologija obrade voda za uklanjanje mikroplastike“(IP-2019-04-9661) Hrvatske zaklade za znanost na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu.

SAŽETAK

Sve veća proizvodnja i upotreba plastike, posebice polietilena i polipropilena, uzrokuje globalni problem uklanjanja mikročestica iz voda koji nastaju njihovom razgradnjom. S obzirom da one ne podliježu biorazgradnji njihova prisutnost nije zanemariva. Važnost uklanjanja istih leži u potencijalnoj toksičnosti za ljude te biljne i životinjske organizme, ali i ukupni ekosustav. Osim toga, zbog raznih kemikalija i aditiva koji se nalaze u njenom sastavu štetna je za okoliš te ga zagađuje. Teorijski se razmatra primjena već postojećih procesa koji su sastavni dio konvencionalnih ili naprednih tretmana obrade voda poput koagulacije i filtracije, uz promatranje učinka i elektrokoagulacije na uklanjanje mikroplastike iz voda.

Cilj ovog rada je dati teorijsku podlogu o metodama koje se eventualno mogu primijeniti za uklanjanje mikročestica polietilena i polipropilena iz vode te parametrima koji utječu na djelotvornost pojedinog procesa.

SUMMARY

The growing production and usage of plastics, especially polyethylene and polypropylene, causes the global problem of removing microparticles from water which arise by their degradation. Since they are not subject to biodegradation, their presence is not negligible. The importance of removing them lies in the potential toxicity to humans, plant and animal organisms, but also to the entire ecosystem. In addition, due to various chemicals and additives that are components of plastics, plastic waste is harmful to the environment and pollutes it. The application of already existing processes that are an integral part of conventional or advanced water treatments is theoretically considered, such as coagulation and filtration. The effect of electrocoagulation on the removal of microplastics from water is also observed.

The objective of this study is to provide a theoretical basis for a methods that can possibly be used to remove microparticles of polyethylene and polypropylene from water and the parameters that affect the efficiency of each process.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. TEORIJSKI DIO.....	3
2.1. VRSTE MIKROPLASTIKE.....	3
2.2. RAZGRADNJA MIKROPLASTIKE.....	4
2.3. POLIETILEN.....	4
2.3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	6
2.3.2. TOPLINSKA SVOJSTVA.....	6
2.3.3. KEMIJSKA SVOJSTVA.....	6
2.3.4. FIZIKALNA SVOJSTVA.....	7
2.3.5. ELEKTRIČNA SVOJSTVA.....	7
2.3.6. OPTIČKA SVOJSTVA.....	7
2.3.7. PRIMJENA.....	7
2.4. POLIPROPILEN.....	7
2.4.1. MEHANIČKA SVOJSTVA.....	8
2.4.2. TOPLINSKA SVOJSTVA.....	8
2.4.3. KEMIJSKA SVOJSTVA.....	8
2.4.4. FIZIKALNA SVOJSTVA.....	9
2.4.5. EELEKTRIČNA SVOJSTVA.....	9
2.4.6. OPTIČKA SVOJSTVA.....	9
2.4.7. PRIMJENA.....	9
2.5. UKLANJANJE MIKROPLASTIKE U TRETMANU OBRADJE PITKIH VODA.....	9
3. MOGUĆE METODE ZA UKLANJANJE MIKROPLASTIKE U VODAMA.....	11
3.1. KOAGULACIJA.....	11
3.1.1. UKLANJANJE MIKROPLASTIKE IZ VODE KOAGULACIJOM.....	11
3.1.1.1. Utjecaj vrste i koncentracije koagulantna.....	12
3.1.1.2. Utjecaj pH.....	14
3.1.1.3. Utjecaj koagulantnih dodataka.....	14
3.1.1.4. Utjecaj oblika mikročestica plastike.....	15
3.2. ELEKTROKOAGULACIJA.....	16

3.2.1.	IZVEDBA REAKTORA	19
3.2.2.	UKLANJANJE MIKROPLASTIKE IZ VODE ELEKTROKOAGULACIJOM ..	20
3.2.2.1.	Utjecaj pH.....	20
3.2.2.2.	Utjecaj provodnosti.....	21
3.2.2.3.	Utjecaj gustoće struje.....	22
3.3.	FILTRACIJA	23
3.3.1.	ULTRAFILTRACIJA.....	23
3.3.1.1.	Blokiranje membrana i membranski fluks.....	24
3.3.1.2.	Uklanjanje mikroplastike iz vode ultrafiltracijom.....	25
3.3.2.	PJEŠČANA FILTRACIJA	26
3.3.2.1.	Uklanjanje mikroplastike iz voda pješčanom filtracijom	27
3.3.3.	FILTRACIJA AKTIVNIM UGLJENOM	28
3.3.3.1.	Uklanjanje mikroplastike iz vode filtracijom aktivnim ugljenom.....	29
4.	ZAKLJUČAK.....	30
5.	LITERATURA	31

1. UVOD

Voda je neobnovljivi izvor, nužan za svakodnevno odvijanje života na Zemlji. Temelj je raznih industrija, gospodarstva u cijelosti te je izvor hrane i drugih dobara, ali je i nezamjenjiv čimbenik u rastu, razvoju i egzistenciji svakog čovjeka i ostalih živih bića te biljnih vrsta. Zbog neupitne važnosti vode potrebno je očuvati njene izvore te smanjiti različite vrste onečišćenja kojima je izložena i nekontroliranu svakodnevnu upotrebu¹.

Jedan od najvećih problema današnjice je eksponencijalno rastuća proizvodnja i potrošnja plastike u različite svrhe uz nepromišljeno odlaganje i zbrinjavanje iste. To uzrokuje probleme u okolišu te globalno narušava kvalitetu voda i predstavlja veliki izvor onečišćenja koji se danas još uvijek teško kontrolira. Raspadom plastike nastaju mikročestice, čestice manje od 5 milimetara, gotovo nevidljive golim okom, ali sveprisutne u zraku, tlu i u vodama. Uništavaju floru i faunu morskih, slatkovodnih i obalnih područja te vrlo lako ulaze u prehrambeni lanac ljudi koji ih unose u svoj organizam². Utjecaj mikroplastike na zdravlje ljudi danas još nije definiran, ali se s obzirom na razne štetne i potencijalno toksične spojeve koji se nalaze u sastavu plastike, on smatra štetnim³.

Plastika označava skup svih polimernih materijala koji se koriste u različitim oblicima, s određenim namjenskim svojstvima⁴. Poznatiji plastomeri su polietilen i polipropilen, linearne makromolekule s određenim povoljnim i nepovoljnim mehaničkim svojstvima koja određuju i ograničavaju njihovu upotrebu. Polietilen se koristi za izradu ambalažnih materijala poput boca za pohranu različitih potrošačkih proizvoda, folija i vreća te za izradu komponenti koje se upotrebljavaju u tekstilnim i građevinskim industrijama te u elektroindustriji⁵. Polipropilen također ima široku primjenu, a najčešće se upotrebljava kod raznih tipova namještaja i laboratorijskog posuđa te boca za pakiranje začina i higijenskih potrepština, a uz to je važan i u automobilske industriji. S obzirom na tako široku primjenu takvih materijala, bezbroj je načina na koji oni dospijevaju u vode diljem svijeta i uzrokuje globalni problem⁶.

Veličina ovog, svakodnevno rastućeg problema, potaknula je mnoga pitanja o mogućem rješenju i eventualnim metodama kojima bi se mikroplastika uklonila iz voda te poboljšala njena

kvaliteta. Potrebno je pronaći ekonomski povoljne i efikasne tehnologije koje će minimalno utjecati na okoliš te smanjiti potrebne resurse i vrijeme za pročišćavanje onečišćenih voda. Zbog karakterističnih svojstava plastičnih materijala potrebno je provesti niz ispitivanja i teorijskih promišljana kako bi se došlo do eventualno učinkovitog rješenja^{7,8}. Proučava se primjena procesa koagulacije i elektrokoagulacije zbog njihove jednostavne izvedbe i ekonomske prihvatljivosti. Osim navedenog promatra se djelotvornost raznih oblika filtracije koji se već primjenjuju u procesima obrade voda i razmatra njihova djelotvornost na uklanjanje mikroplastike.

2. TEORIJSKI DIO

Zbog sveprisutne upotrebe plastike u različite svrhe postoji nebrojeno mnogo načina na koje mikroplastika dospijeva u vode te ih na taj način zagađuje. S obzirom na tako rasprostranjeni problem teško je kontrolirati svaki izvor onečišćenja i reducirati ga. Posljednjih desetak godina dolazi do uzlaznog trenda rasta proizvodnje iste uz sve veću količinu plastike koju je potrebno pravilno pohraniti. Svjetska proizvodnja plastike za 2018. godinu dostigla je 360 miliona tona, dok je u Europi proizvedeno gotovo 62 miliona tona⁹.

2.1. VRSTE MIKROPLASTIKE

Dvije su vrste mikroplastike koje izazivaju polemiku u područjima očuvanja okoliša i svih svjetskih voda, a ovisno o njihovoj namjeni i načinu na koji one dospijevaju u okoliš to su primarna i sekundarna mikroplastika¹⁰.

Primarna mikroplastika je ona koja se u obliku malih čestica dodaje raznim proizvodima u procesima njihove izrade i proizvodnje te kao takva namjerno unosi u kružni protok onečišćenja iz kojeg ju je teško kasnije izdvojiti. Dodaje se raznim kozmetičkim proizvodima poput micelarnih voda, gelova za tuširanje, krema za lice i zubnih pasti prvenstveno zbog ekonomske koristi kozmetičke industrije. Osim toga, ona produžuje vijek trajanja samog proizvoda zbog njene teške razgradnje i nemogućnosti otapanja, a uz to olakšava dodavanje boja i sjaja u kozmetičke preparate. S obzirom na svakodnevnu primjenjivost takvih proizvoda, oni lako dospijevaju u kanalizacijske i odvodne sustave prolazeći kroz razne filtere zbog svoje veličine. Tako mikroplastika dospijeva do rijeka, potoka i otpadnih voda u kojima se ne razgrađuje zbog biološke nerazgradivosti te završava u brojnim drugim vodama te morima i oceanima. Glavni izvor primarne mikroplastike i najučestaliji oblik njene namjene je izrada sintetičke odjeće i tekstila čijim pranjem ona ulazi u odvodne sustave. Osim toga nastaje erozijom guma tijekom vožnje te kao nusprodukt industrijskih procesa u kojima dolazi do trošenja raznih plastomera^{10,11}.

Sekundarna mikroplastika nastaje kao posljedica razgradnje većih komada plastike, plastičnih potrošačkih materijala ili plastičnih otpadaka iz industrijskih pogona, biološkim, fizikalnim i kemijskim procesima koji se spontano odvijaju u okolišu. Zagađena su obalna

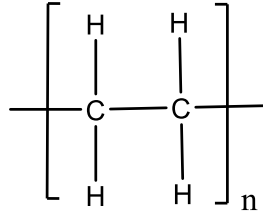
područja, površine voda, ali i njihove dubine. S obzirom da se plastika ne raspada već se razgrađuje ona je dugi niz godina izvor čestica mikroplastike koje putuju kroz tlo i u konačnici dolaze do vode ili su u direktnom kontaktu s njom. Zbog izloženosti suncu procesom fotodegradacije dolazi do fragmentacije plastike sve do vrlo sitnih, golom oku nevidljivih čestica. Tome pogoduju i procesi oksidacije, biorazgradnja te vremenski utjecaji, visoke temperature i njihove nagle promjene. Plastični materijali na taj način postaju krhkiji te je olakšana njihova degradacija¹⁰⁻¹².

2.2. RAZGRADNJA MIKROPLASTIKE

Procesima degradacije se narušava struktura polimera plastike te kao direktna posljedica toga dolazi do promjene njenih fizikalnih i kemijskih svojstava. To je proces kojim se značajno reducira prosječna molekulska masa polimera¹³. Poznato je da je plastika otporna na procese biorazgradnje, međutim treba uzeti u obzir činjenicu da je ona često mjesto kolonizacije raznih mikroorganizama, algi i bakterija. Djelovanje UV zračenja je manjeg intenziteta kod plastike koja se nalazi u vodi zbog manje prisutnosti kisika i djelomične zaštićenosti iste odštetnog zračenja¹⁴. Površinske morfološke promjene su uzrokovane mehaničkim silama poput sila smicanja ili abrazije te procesima oksidacijske razgradnje. Oksidacijska razgradnja, reakcija između polimera i kisika, je češća od toplinske zbog nedovoljno visokih temperatura u okolišu koja je nužna za značajniju toplinsku razgradnju. Razgradnja pod djelovanjem kisika se odvija na tankom površinskom sloju mikroplastike zbog nemogućnosti prodiranja kisika duboko u njenu strukturu. Time je spriječen znatan utjecaj UV zračenja u unutrašnjosti te se stvaraju male pukotine i oštećenja na samoj površini koje će u konačnici uzrokovati stvaranje mikročestica. S obzirom da se promatrani polimeri nalaze u čvrstom stanju pri relativno niskim temperaturama, brzina takvih reakcija je mala te je određena difuzijom kisika^{13,15}.

2.3. POLIETILEN

Polietilen je najučestaliji i najpoznatiji polimer današnjice, jednostavne je strukture, a sastoji se od ponavljajućih jedinica $-CH_2-CH_2-$ kako je prikazano na slici 1.¹⁶


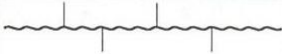

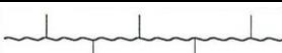



Slika 1. Ponavljajuća jedinica polietilena

Dakle, sastoji se od velikih molekula u obliku dugačkih niti koje čine linearnu makromolekulu. Međutim, one sadrže i određene kratkolančane i dugolančane bočne skupine čime se mijenjaju reološka i druga svojstva polietilena, smanjuje se gustoća polimera, a time se mijenja njegova namjena. Zbog toga se gubi predodžba o potpuno linearnoj makromolekuli i zamjenjuje se djelomično razgranatom strukturom. Polietilen lako kristalizira zbog svoje jednostavne strukture, a o odnosu amorfne i kristalne faze unutar makromolekule ovise temeljna svojstva plastičnog materijala. S obzirom da kristalna faza označava pravilnu strukturu visokog stupnja središtenosti, porastom broja bočnih skupina smanjuje se stupanj kristalnosti¹⁷.

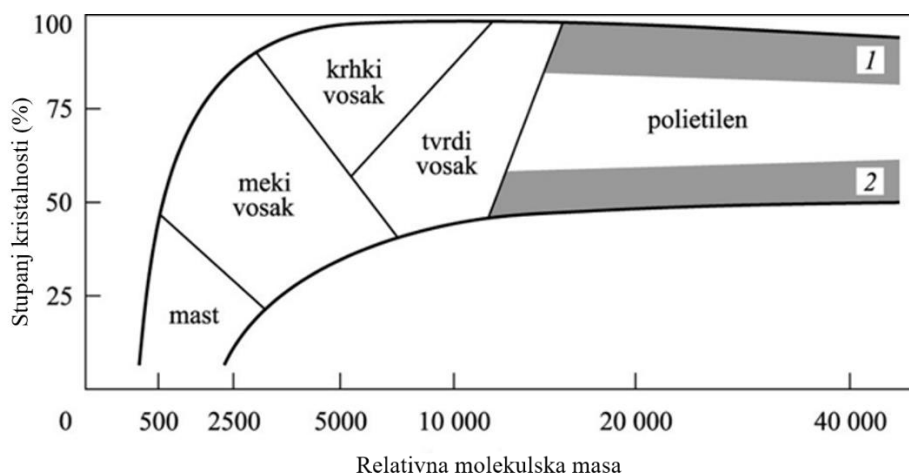
Na temelju svojstava (prvenstveno gustoće) i molekulne strukture razlikuje se više vrsta polietilena, a sama struktura je uvjetovana procesima proizvodnje. U tablici 1 su prikazane takve vrste i njihove strukture¹⁷.

Tablica 1. Shematski prikaz strukture i gustoće temeljnih vrsta polietilena¹⁷

Naziv	Kratica	Struktura	Gustoća (g cm ⁻³)
Polietilen visoke gustoće	PE-HD		0,941...0,960
Polietilen srednje gustoće	PE-MD		0,926...0,940
Polietilen niske gustoće	PE-LD		0,910...0,925
Linearni polietilen niske gustoće	PE-LLD		0,925...0,940
Polietilen vrlo niske gustoće	PE-VLD		< 0,910

2.3.1. MEHANIČKA SVOJSTVA

Polietilen je plastomer male čvrstoće, tvrdoće i krutosti te je žilav materijal velikog modula elastičnosti. Porastom kristalnosti tog učestalog polimera linearno raste puzanje. Dodavanjem bočnih skupina, raste gustoća samog materijala pri čemu se smanjuje udarna žilavost, a rastu prekidna čvrstoća i modul elastičnosti. Slika 2 prikazuje odnos molekulne mase, kristalnosti i vrste polietilena. Na navedena svojstva utječe i veličina i raspodjela molekulnih masa unutar makromolekule. Mehanička svojstva se razlikuju ovisno o vrsti polietilena. Široka raspodjela molekulnih masa unutar PE-LD omogućuje laku prerađljivost zbog karakteristične niske viskoznosti. PE-HD je komercijalna vrsta polietilena koja pri nižim temperaturama ima dobru elastičnost i udarnu žilavost zbog uske raspodjele molekulnih masa¹⁷.



Slika 2. Utjecaj molekulne mase i stupnja kristalnosti na konzistenciju polietilena (1. PE-HD, 2. PE-LD)¹⁷

2.3.2. TOPLINSKA SVOJSTVA

Zbog relativno niskog tališta (ovisno o vrsti) ograničena je komercijalna upotreba polietilena. Najveću temperaturu taljenja ima PE-HD i ona iznosi 132 °C – 135 °C dok je temperatura pri kojoj započinje omekšavanje materijala, temperatura mekšišta, niža i iznosi 127 °C. Talište PE-LD je na 112 °C, a temperatura mekšišta je na 85 °C. Dakle, temperature mekšišta ograničavaju primjenu polietilenskih proizvoda¹⁷.

2.3.3. KEMIJSKA SVOJSTVA

Kemijski je postojan prema mnogim kemikalijama i uljima uz iznimku oksidirajućih kiselina, malog broja ketona i halogenih elemenata. Pri sobnoj temperaturi se ne otapa ni u

jednom otapalu, a kao posljedica duljeg izlaganja istom javlja se proces bubrenja. Na temperaturama iznad 60 °C postepeno je topljiv u aromatskim ugljikovodicima poput ksilena i toluena. Ne reagira s vodom te je potpuno postojan na njen utjecaj. Najotporniji na utjecaj raznih otapala je PE-HD¹⁷.

2.3.4. FIZIKALNA SVOJSTVA

Polietilen izgara plavim plamenom sa žutim vrhom uz oslobađanje mirisa parafina. Pod djelovanjem ultraljubičastog zračenja postaje krhkiji te dolazi do razgradnje samog plastičnog materijala u procesima oksidacije ili pri povišenim temperaturama. Dodatkom čađe se inhibira proces fotooksidacije¹⁷.

2.3.5. ELEKTRIČNA SVOJSTVA

S obzirom da ne provodi struju djeluje kao dobar električni izolator¹⁷.

2.3.6. OPTIČKA SVOJSTVA

Optička svojstva polietilena prvenstveno ovise o debljini plastomera tj. o vrsti istog. On je plastomer nepotpune prozirnosti i voskastog izgleda. Najveću prozirnost posjeduje PE-LD, a najmanju PE-HD¹⁷.

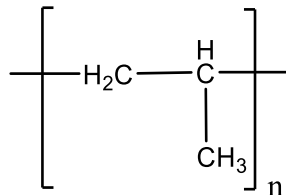
2.3.7. PRIMJENA

PE-LD i PE-LLD se koriste za izradu raznih oblika ambalaža za hranu, poljoprivrednih folija i nosivih vrećica, dok se PE-HD primjenjuje kod dječjih igračaka, boca s raznom namjenom i ambalaže za šampone. Tako velika i široko rasprostranjena upotreba polietilena u različite svrhe je moguća zbog velike sposobnosti modifikacije njegovih svojstava čime se proširuje mogućnost njegove primjene¹⁶.

2.4. POLIPROPILEN

Polipropilen je plastomer koji se sastoji od ponavljajuće jedinice $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ kako je prikazano na slici 3. S obzirom na usmjerenje metilnih skupina linearne makromolekule razlikujemo ataktnu, sindiotaktnu i izotaktnu konfiguraciju. Kod sindiotaktne strukture, stereo-ponavljane skupine zauzimaju suprotne konfiguracije, a u slučaju izotaktne strukture metilne skupine su postavljene u isti sterički položaj. Ataktna struktura je ona u kojoj nema stereo-ponavljanih jedinica te polipropilen s takvom konfiguracijom nema kristalnu strukturu. Što je udio izotaktne strukture u polipropilenu veći, vjerojatniji je i bolji proces kristalizacije što je

nužno za povoljna svojstva plastičnog materijala. To je posljedica formiranja spiralne, vijčane konformacije lanaca makromolekula. U industrijskim proizvodima izrađenim od izotaktnog polipropilena stupanj kristalnosti iznosi 60-70 %¹⁸.



Slika 3. Ponavljajuća jedinica polipropilena

2.4.1. MEHANIČKA SVOJSTVA

Polipropilen je polimer najmanje gustoće (0,90-0,91 g cm⁻³) po mnogim svojstvima sličan polietilenu visoke gustoće. Međutim, polipropilen karakterizira veća elastičnost i viša rastezna čvrstoća te tvrdoća. Svojstva ovise o veličini i raspodjeli molekulne mase unutar makromolekule, kako raste udio nižih molekulnih masa mijenja se tečljivost taljevine, ona raste, dok se udarna žilavost plastičnog materijala smanjuje. Nedostatak polipropilena u odnosu na polietilen je mala udarna čvrstoća i pojava pucanja, međutim taj problem je riješen procesom kopolimerizacije. Polipropilen s ataktnom konformacijom ima nešto lošija svojstva u odnosu na komercijalni izotaktni polipropilen. Razlikuje se po manjoj tvrdoći, gustoći i čvrstoći te drugim mehaničkim svojstvima¹⁸.

2.4.2. TOPLINSKA SVOJSTVA

Visoko talište polipropilena omogućava široko radno temperaturno područje u kojem ga je moguće primjenjivati. Talište iznosi od 160-170 °C , a smanjuje se porastom udjela ataktne konformacije. Ispod 0 °C on postaje krhak¹⁸.

2.4.3. KEMIJSKA SVOJSTVA

Polipropilen je plastomer koji podliježe oksidacijskoj razgradnji, posebno pri višim temperaturama zbog svoje nepostojanosti prema jakim oksidansima. Takvo ponašanje nastaje kao posljedica reaktivnog vodikovog atoma na terciarnom ugljikovom atomu ponavljanih jedinica. Ono se može inhibirati ili ukloniti dodavanjem malih količina antioksidansa poput

supstituiranih fenola i amina. Ne reagira s vodom, a postojan je i prema mazivima, anorganskim kemikalijama i organskim otapalima¹⁸.

2.4.4. FIZIKALNA SVOJSTVA

Zbog niske otpornosti na UV zračenje često se u polipropilen dodaje 2 % UV-stabilizatora, derivata hidrosibenzotriazola ili posebne vrste čađe čime on poprima svojstvo otpornosti prema ultraljubičastom zračenju. To omogućuje produljenje životnog vijeka materijala u odnosu na nemodificirani polipropilen¹⁸.

2.4.5. ELEKTRIČNA SVOJSTVA

S obzirom da su makromolekule polipropilena nepolarne, čisti polipropilen je izuzetan električni izolator¹⁸.

2.4.6. OPTIČKA SVOJSTVA

Polipropilen je proziran kristalasti plastomer¹⁸.

2.4.7. PRIMJENA

Široko rasprostranjena primjena polipropilena je posljedica njegove lake prerade te mogućnosti modifikacije i kopolimerizacije. Također, jedan je od najjeftinijih plastomera te se koristi u različitim područjima. Zbog dobrih zaštitnih svojstava, visoke čvrstoće i niskih troškova koristi se za izradu raznih ambalaža i pakiranja za potrošačke proizvode. Velika upotreba polipropilena javlja se u automobilskoj industriji, proizvodnji raznih oblika vlakana i tkanina te u drugim vrstama iste, ali i u medicini zbog visoke kemijske i bakterijske otpornosti¹⁹.

2.5. UKLANJANJE MIKROPLASTIKE U TRETMANU OBRADNE PITKE VODE

Pitka voda dolazi iz površinskih ili podzemnih voda. Voda namijenjena za piće, koja češće dolazi iz površinskih voda prolazi kroz tretman za njeno pročišćavanje, dok je podzemna voda općenito više kvalitetna jer se prirodno filtrira prolazeći kroz tlo i stijene. S obzirom da je u površinskim vodama nađena određena količina mikroplastike, važno je razumjeti kako tehnologije za njeno pročišćavanje utječu na uklanjanje iste²⁰.

Trenutno ne postoje metode ili tehnologije koje se primjenjuju u procesu pročišćavanja vode namijenjene za piće koje isključivo uklanjaju mikročestice plastike. Razlog tomu je nepostojeća norma ili zakonsko ograničenje koje bi odredilo maksimalnu dozvoljenu

koncentraciju mikroplastike u takvim vodama. Ipak, postoje već dugo primjenjivane tehnologije i procesi u tretmanima pročišćavanja voda koje predstavljaju potencijalu prepreku za nesmetan prolaz mikroplastike iz prirodnih voda u vode namijenjene za konzumaciju ljudi i svakodnevnu uporabu. Međutim, kad je riječ o raznim otpadnim vodama i njihovoj obradi važno je naglasiti da u tom području postoji primjena tehnologija koje nastoje ukloniti plastične polimere koji potječu od pranja sintetičke odjeće, sredstva za čišćenje i kozmetike te raznih drugih načina kojima takve čestice nastaju²¹. Mikročestice polietilena i polipropilena su najčešće upravo u takvim vodama²². S obzirom da je gustoća polietilena bliska gustoći prirodnih voda, čestice polietilena će se lakše suspendirati u vodi u odnosu na čestice polipropilena. To dovodi do većeg potencijalnog rizika u odnosu na plastiku koja će tijekom tretmana obrade voda taložiti²³.

Razvoj metoda za uklanjanje mikročestica plastike iz voda nailazi na vrlo malo postojećih istraživanja koja mogu služiti kao izvori, ali se oslanja na već postojeće metode obrade voda zbog sličnosti mikroplastike s prirodnim česticama. S obzirom na tretman obrade vode, one se mogu izdvajati na temelju gustoće, površinskog naboja ili veličine. Pri procjeni djelotvornosti i isplativosti određene tehnologija koja bi se mogla koristiti u svrhu uklanjanja mikročestica plastike javljaju se dva moguća pristupa:

- Mjerenje i poznavanje koncentracije mikroplastike na ulazu i izlazu u sustav pročišćavanja ili nakon određenog koraka tehnološke obrade
- Određivanje učinkovitosti procesa u kontroliranim uvjetima u laboratoriju²¹

3. MOGUĆE METODE ZA UKLANJANJE MIKROPLASTIKE U VODAMA

3.1. KOAGULACIJA

Koagulacija je proces nakupljanja manjih čestica i njihovog sjedinjavanja u veće nakupine. Flokulacijom sitne mikročestice tvore vidljive flokule i kao takve se lakše uklanjaju. Tijekom procesa se koloidno dispergirane čestice izdvajaju iz kapljevite faze i tvore agregate. Nakon što oni postignutu povoljnu veličinu i stabilnost slijedi sedimentacija. Koagulacija je tehnički važan proces koji se primjenjuje u tretmanu obrade vode u svrhu pročišćavanja iste od malih čestica koje inače sporo sedimentiraju i lako prolaze kroz razne filtere. Lakše se uklanjaju zbog stvaranja nakupina, međutim spontano to nije moguće zbog njihovih negativnih naboja i međusobnog odbijanja²⁴. Zbog velike djelotvornosti ovog procesa i učestale primjene u tretmanima obrade voda i pročišćavanja iste od raznih onečišćivala, razmatra se njegova primjena u području mikroplastike za njeno uklanjanje iz voda.

Da bi se stvorili agregati u otopinu koloidnih čestica se dodaju kemikalije koje sadrže pozitivne ione, najčešće ione aluminija ili željeza. Djelovanje koagulanta se može opisati s dva mehanizma. Prvi je opisan reakcijom kationa nastalih hidrolizom koagulanta i negativno nabijenim koloidnim česticama. Na taj način je postignuta neutralizacija naboja čestica koje se inače teško talože na dno. Privlačenjem suprotnih naboja, one tvore veće nakupine. Drugi mehanizam se odnosi na „zarobljavanje“ dispergiranih čestica u rastućem talogu hidroksida²⁵. Ako voda, koja okružuje tako stvorene nakupine, nakon toga nije čista znači da su zaostale čestice koje nisu neutralizirane te je potrebno dodati veću količinu koagulanta u takav uzorak²⁶.

3.1.1. UKLANJANJE MIKROPLASTIKE IZ VODE KOAGULACIJOM

Najčešće prisutni plastomer u vodama je polietilen, zbog njegovog svojstva lake suspenzije u vodi te su provedena istraživanja najčešće usmjerena k njegovom uklanjanju. Što su čestice plastičnih polimera manje one će se lakše ukloniti, a djelotvornost samog procesa će biti veća. Iako je metoda koagulacije pokazala određenu djelotvornost pri pročišćavanju voda za mikročestice polietilena, korištenjem soli željeza u takvom procesu u konačnici nisu postignuta velika iskorištenja. Međutim aluminijevim solima je postignuta djelomično veća učinkovitost.

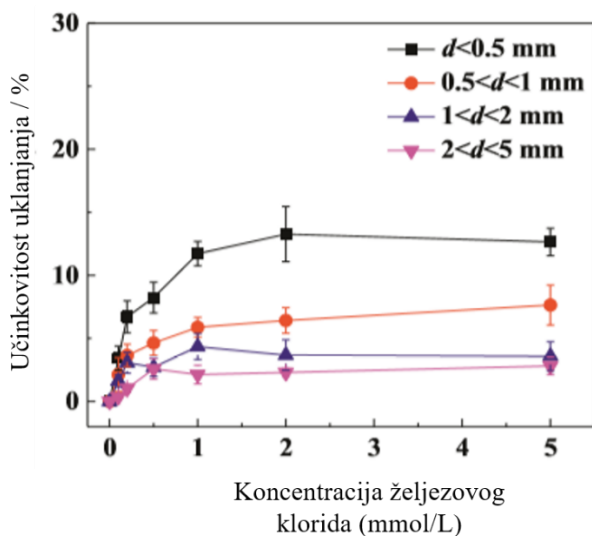
Na djelotvornost metode utječu koncentracija koagulanta, pH vrijednosti analiziranog uzorka vode te dodatak poliakrilamida (PAM) kao sredstva za suspendiranje²⁷.

3.1.1.1. Utjecaj vrste i koncentracije koagulanta

Kao koagulanti se često koriste $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ ili $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ čime se potiče stvaranje flokula nakon čega je moguće provesti sedimentaciju. Korištenje $(\text{Fe})_2(\text{SO}_4)_3$ povećava učinkovitost jer prisutnost sulfatnih iona pozitivno utječe na proces koagulacije tako što mijenja pH vrijednost uzorka i dovodi ga u područje koje je povoljno za formiranje flokula²⁸. Kada se hidratizirani aluminijev sulfat ili sulfat željeza doda u vodu on hidrolizira prema jednadžbi 1, a nastali želatinozni talog hidroksida sa sobom nosi suspendirani materijal pri taloženju na dno²⁹.

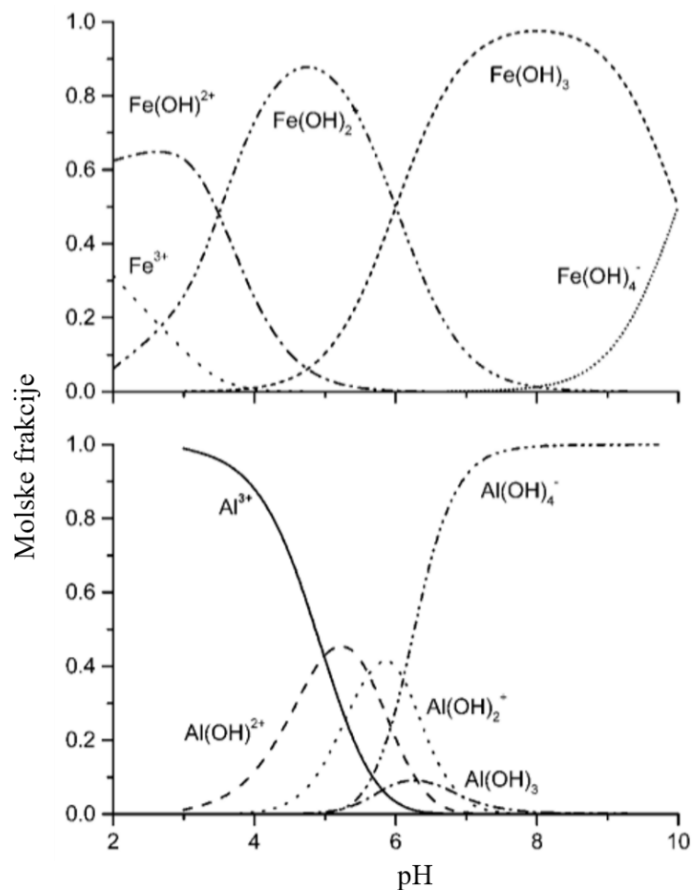


Učinkovitost uklanjanja polietilena raste s povećanjem upotrijebljene koncentracije koagulanta. Pri njegovom uklanjanju veća učinkovitost se postiže korištenjem $\text{AlCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, u odnosu na $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$, čak do $\approx 20\%$. Na slici 4 je vidljivo da što su čestice mikroplastike manje učinkovitost uklanjanja je veća, međutim djelotvornost koagulacije u konačnici ne zadovoljava, čak i uz prisutnosti visokih koncentracija koagulanta. Najviše učinkovitosti se postižu uz puno veće doze aluminija i željeza u odnosu na one koje se obično koriste u tretmanima pročišćavanja voda koagulacijom²¹.



Slika 4. Učinkovitost uklanjanja različitih veličina čestica PE s različitim koncentracijama $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ pri pH 7.0²⁷

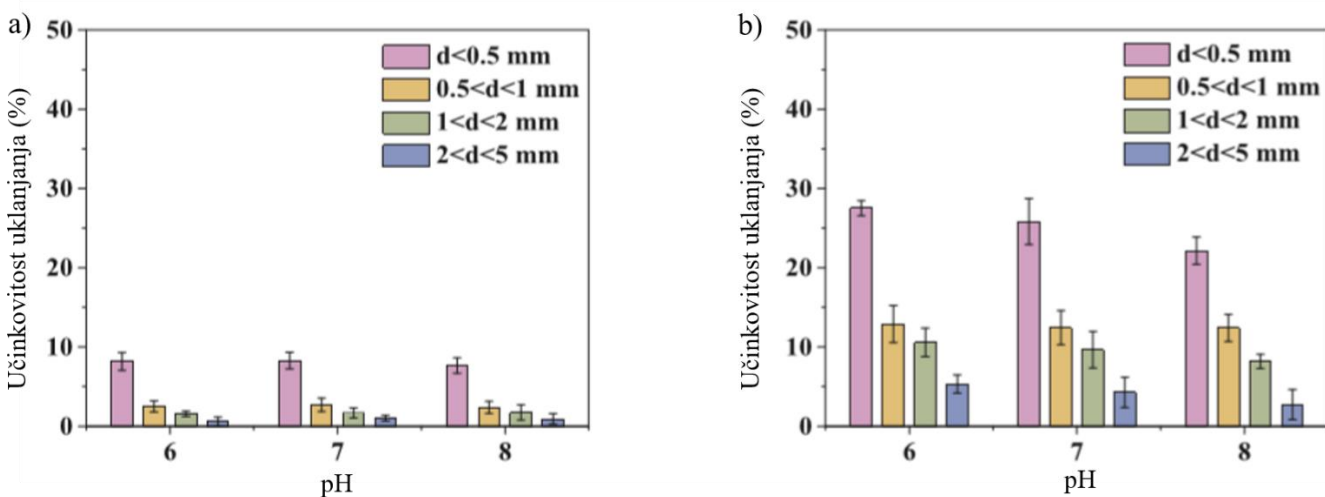
Kao što je navedeno, korištenjem aluminijevih soli su postignute veće učinkovitosti uklanjanje PE u odnosu na soli željeza. Razlog tome su manje flokule koje nastaju od aluminija, s većom specifičnom površinom. Uvođenjem metalnog koagulant u vodu, dolazi do hidrolize te nastaju metalni hidroksid i slobodne specije korištenog metala. Koja od te dvije će biti dominantna ovisi o pH²⁵. Sa slike 5 se očitava da je optimalno pH područje za korištenje aluminijevih soli od 5.5 do 7.7 jer je pri tim uvjetima topljivost koagulant minimalna, taloži amorfni hidroksid, te glavnina koagulant čini čvrste čestice flokula. Ako ona padne ispod optimalne vrijednosti, pozitivno nabijene specije aluminija će se generirati, dok će se u slučaju povišenja pH iznad optimalne granice formirati više negativnih specija aluminija. Sve većim udaljavanjem od optimalnih pH vrijednosti, otežano je ili onemogućeno stvaranje većih nakupina čestica što smanjuje učinkovitost samog procesa koagulacije³⁰. Optimalno pH područje za proces koagulacije u kojem se koriste koagulant na bazi željeza je između 4.5 i 7 (slika 5), dakle nešto niže u odnosu na koagulant na bazi aluminija^{31,32}.



Slika 5. Relativni omjeri (molske frakcije) otopljenih produkata hidrolize soli željeza i aluminija²⁵

3.1.1.2. Utjecaj pH

Karakteristike i svojstva nastalih flokula značajno utječu na proces koagulacije³⁰. PH vrijednost otopine u kojoj se provodi koagulacija utječe na učinkovitost iste i ima važnu ulogu u njenoj izvedbi zbog utjecaja na svojstva stvorenih flokula²⁵. Povoljna pH vrijednost uzorka ovisi o vrsti korištenog koagulant, s obzirom da svaki od njih povoljno djeluje u određenom području kiselosti odnosno lužnatosti³³. S obzirom na to logično slijedi da ovisno o pH uzorku vode učinkovitost koagulacije pri uklanjanju mikroplastike može biti veća ili manja. Pri malim dozama koagulant utjecaj pH je manje izražen nego u uvjetima većih koncentracija koagulant. Posebice je izražen kada se koagulacija koristi za uklanjanje što manjih mikročestica PE uz prisutnost visokih doza koagulant kao što je prikazano na slici 6²⁷.



Slika 6. Utjecaj pH vrijednosti uzorka vode na uklanjanje mikroplastike koagulacijom pri.²⁷

a) koncentraciji koagulant (FeCl₃·6 H₂O) od 0.2 mmol/l

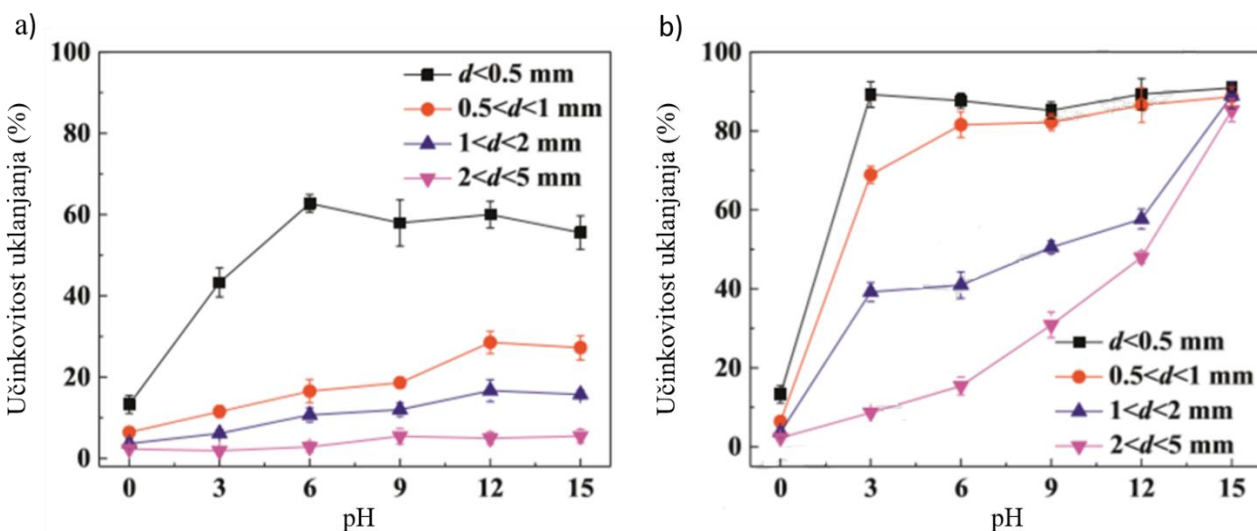
b) koncentracija koagulant (FeCl₃·6 H₂O) od 2 mmol/l

3.1.1.3. Utjecaj koagulantnih dodataka

Za poboljšanje koagulacije i izbjegavanje stvaranja slabih flokula čija se stabilnost može narušiti djelovanjem fizičkih ili mehaničkih sila, uz koagulant se dodaju koagulantni dodatci. Osim toga, oni ubrzavaju sedimentaciju i njihovim djelovanjem raste gustoća flokula te se reducira stvaranje mulja³³. Primjer takvog dodatka je poliakrilamid kojim se postiže kraće vrijeme sedimentacije, potencijalno zbog formiranja težih i otpornijih flokula čime raste broj uklonjenih čestica mikroplastike. To je prednost i zbog smanjenja troškova procesa te

povećavanja isplativosti njegovog provođenja odnosno energetskih (ovisno o korištenom dodatku koagulantu) i vremenskih ušteda. Osim navedenog, u istu svrhu, uz približno jednaku učinkovitost, se mogu koristiti i aktivni ugljik, polivinil alkohol i poliakrilna kiselina²⁸.

Djelotvornost uklanjanja mikročestica polietilena je veća u prisutnosti poliakrilamida, a dodatno raste što su analizirane čestice manje i što je prisutna veća koncentracija koagulanta. Na slici 7 je prikazano da se bolji rezultati, u uvjetima uklanjanja polietilena, postižu korištenjem anionskog poliakrilamida u odnosu na kationski²⁷.



Slika 7. Učinkovitost uklanjanja raznih veličina mikročestica polietilena pri pH 7.0 uz dodatak:²⁷

a) 2 mmol/l $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ i kationskog PAM – a

b) 2 mmol/l $\text{FeCl}_3 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ i anionskog PAM – a

3.1.1.4. Utjecaj oblika mikročestica plastike

Oblik mikročestica plastike, također utječe na učinkovitost procesa koagulacije. Mikročestice polietilena i polipropilena koje imaju oblik vlakna će se najlakše ukloniti navedenim procesom zbog veće težnje da aglomeriraju i formiraju flokule, koje će se kao takve lakše taložiti. Dakle, iz voda u kojima prevladava mikroplastika u obliku vlakana će se ista lakše ukloniti koagulacijom te će djelotvornost samog procesa biti veća³⁴.

3.2. ELEKTROKOAGULACIJA

Elektrokoagulacija kao metoda za pročišćavanje voda nije bila tema sve do 21. stoljeća zbog visokih cijena električne energije koje uzrokuju prevelike troškove provođenja iste. Međutim, padom cijena električne energije i povoljnim ekonomskim uvjetima takvog procesa, on sve više konkurira kao alternativna metoda za obradu voda. Osim toga, ona nudi efikasnija ekološka rješenja u odnosu na razne druge metode te postaje tema mnogih znanstvenih istraživanja^{35,36}.

Elektrokoagulacija, kao elektrokemijska metoda nudi jeftiniju metodu za obradu voda uz bolje ekološke uvjete jer se ne temelji na upotrebi raznih kemikalija i mikroorganizama. Uz to smanjuje troškove provedbe pročišćavanja voda, energetski je djelotvoran proces te je stvaranje mulja svedeno na minimum³⁷. Smanjeno je vrijeme potrebno za provođenje tretmana obrade voda te se reducira stvaranje otpada koji nastaje takvim tretmanima³⁸. To je proces kojim se postiže destabilizacija suspendiranih, emulgiranih i otopljenih tvari u vodenom mediju uvođenjem električne struje³⁹. Temelji se na potenciranju koagulacije i taloženju onečišćujućih čestica provođenjem elektrolize, prolaskom istosmjerne struje kroz otopinu. Elektrokoagulacija se odvija u elektrokemijskom reaktoru u kojem se nalaze metalne elektrode koje pod djelovanjem elektriciteta stvaraju koagulant³⁸. Ona ima mogućnost uklanjanja i najsitnijih koloidnih čestica koje se ne mogu ukloniti kemijskom koagulacijom, zbog veće vjerojatnosti njihove destabilizacije pod djelovanjem električnog polja⁴⁰. Metoda elektrokoagulacije se pokazala učinkovitom za uklanjanje više od 80 % onečišćujućih čestica nakon tretmana obrade vode. Njome se uklanjaju boje, teški metali i čestice gline te tekuća organska zagađivala, ali njen učinak na uklanjanje mikroplastike nije detaljno istražen iako teoretska znanja upućuju na pozitivan ishod i veliku mogućnost uklanjanja mikročestica plastike iz vode njenom primjenom³⁷. Osim navedenih prednosti procesa elektrokoagulacije potrebno je spomenuti još neke:

- Niski energetski i investicijski troškovi te troškovi održavanja sustava za elektrokoagulaciju.
- Sustavi jednostavnog dizajna s kojima se lako rukuje.
- Stvaraju se male količine mulja, a osim toga on se lako uklanja jer uglavnom sadrži metalne okside ili hidrokside što dodatno utječe na povoljnu ekonomičnost procesa.

- Mogućnost uklanjanja znatno sitnijih čestica zbog električnog polja koje izaziva njihovo brže gibanje i sudaranje čime se povećava mogućnost njihove agregacije.
- Mjehurići plina nastali tijekom procesa koagulacije onečišćujuće tvari nose na površinu gdje su one koncentriranije, time se olakšava koagulacija i uklanjanje istih.

Međutim, postoje i određeni nedostaci ove metode koji se ne mogu zanemariti te na koje je potrebno obratiti pažnju prilikom njenog izvođenja:

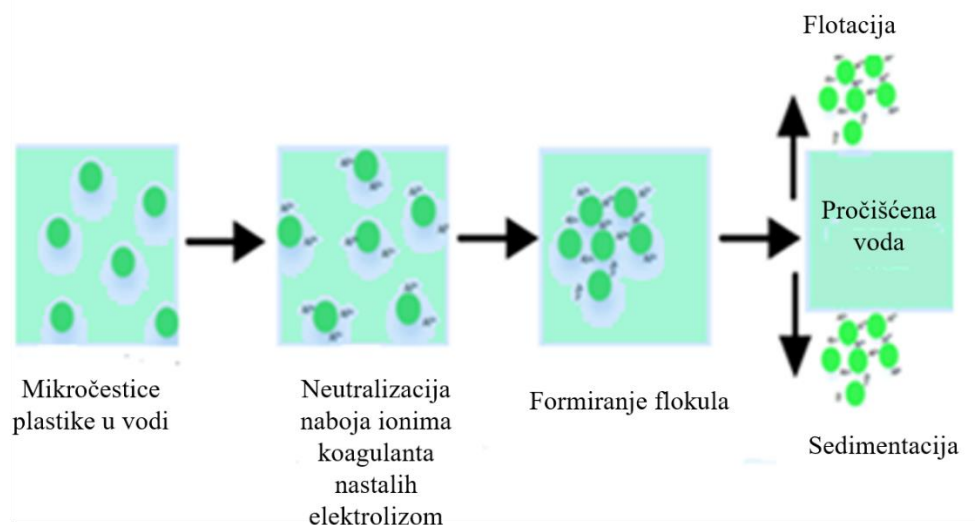
- Žrtvene elektrode je potrebno povremeno zamijeniti jer oksidiraju i troše se u vodi.
- Potrebna je zadovoljavajuća vodljivost vode, koju prirodne i slabo zagađene vode nemaju te je potrebno dodati potporni elektrolit čime će se ona povećati (najčešće NaCl).
- Troškovi obrade i provedbe elektrokoagulacije se mogu promijeniti u slučaju povećanja cijena električne energije.
- Na katodi može doći do formiranja oksidnih prevlaka koje ometaju prijenos naboja i otapanje metala. Javlja se otpor prolasku struje te može doći do energetski gubitak i povećanih troškova procesa. To se može izbjeći povremenim čišćenjem elektroda.

Elektrokoagulacija uključuje procese koagulacije i taloženja onečišćujućih tvari. U elektrokemijskom reaktoru se iz žrtvenih anoda, procesom oksidacije, oslobađaju kationi metala potrebni za koagulaciju i flokulaciju onečišćivala. Na elektrode se primjenjuje električno polje, a prolaskom struje kroz sustav se inducira odvijanje elektrokemijskih reakcija na elektrodama³⁸. Istovremeno s oksidacijom metala na anodi, na katodi se odvija redukcija vode te se oslobađaju vodik i OH⁻ ioni, što je prikazano jednadžbom 2:³⁷



Kationi metala neutraliziraju naboj čestica mikroplastike i omogućavaju formiranje flokula. Reakcijom kationa iz anolita i hidroksidnih iona iz katolita nastaju stabilni hidroksidi. Oni imaju veliku površinu te snažno privlače raspršene čestice koje se adsorbiraju, kao i ione koji su nastali reakcijama na elektrodama⁴¹. Osim toga, stvoreni mjehurići plina vodika na katodi potiču elektroflotaciju i podizanje nastalog mulja prema površini vode^{42,43}. Navedeni proces shematski je prikazan na slici 8³⁷. Flokule koje nastaju elektrokoagulacijom su slične kemijskim flokulama. Međutim, sadrže manje vezane vode i imaju tendenciju da budu veće te su znatno

stabilnije i otpornije na kiselinu. Taloženje takvih flokula tijekom procesa elektrokoagulacije je uzrokovano djelovanjem sile uzgona, dok se kemijske flokule talože uslijed gravitacije⁴⁴.



Slika 8. Shematski prikaz mehanizma na kojem se temelji elektrokoagulacija³⁷

Kao materijal od kojeg se izrađuju anode se najčešće koriste aluminij i željezo, a katode se često izrađuju od nehrđajućeg čelika^{45,46}. Dakle, u procesu elektrokoagulacije ioni su proizvedeni „in situ“, a proces se provodi u tri stupnja⁴⁷:

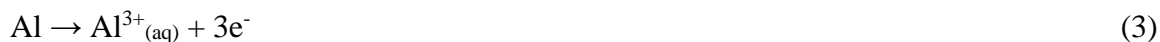
1. elektrolitička oksidacija žrtvenih anoda i stvaranje kationa metala
2. destabilizacija onečišćenja, suspendiranih čestica i razbijanje emulzija
3. agregacija destabiliziranih onečišćenja i formiranje flokula

Kemija vode u kojoj se primjenjuje elektrokoagulacija uvelike određuje mehanizam prema kojem će se proces elektrokoagulacije odvijati, kao i koncentracija i veličina prisutnih čestica te pH otopine⁴⁸.

Aluminij

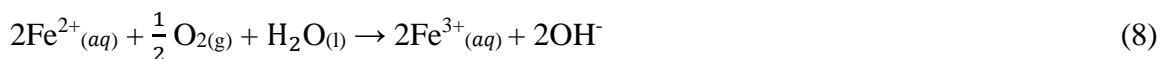
Elektrolitskim otapanjem aluminijske anode formiraju se pozitivno nabijene specije aluminija poput Al^{3+} i $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ pri nešto nižim pH vrijednostima, koje zatim u blago lužnatom pH (pH raste zbog odvijanja opisane katodne reakcije) prelaze u $\text{Al}(\text{OH})_3$.^{42,43} Ovisno o pH i

druge specije aluminija mogu biti prisutne u vodenoj otopini. Reakcije koje se odvijaju su prikazane jednadžbama 3-5.^{48,49}



Željezo

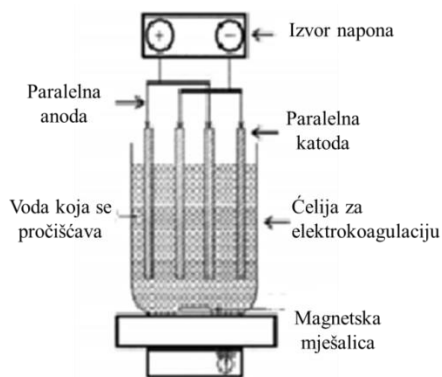
Otapanjem željezove anode mogu nastati razne specije željeza ovisno o pH vrijednosti otopine. Željezo može izravno oksidirati do Fe^{3+} , ali je ta reakcija nepovoljnija u odnosu na oksidaciju do Fe^{2+} iona zbog manjeg elektrodnog potencijala. Pod utjecajem otopljenog kisika u otopini Fe^{2+} može oksidirati u Fe^{3+} . Ovisno o nabojnom broju iona željeza koji je izreagirao s hidroksidnim ionima nastaju talozi $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ili $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Opisani procesi prikazani su jednadžbama od 6-10.^{48,49}



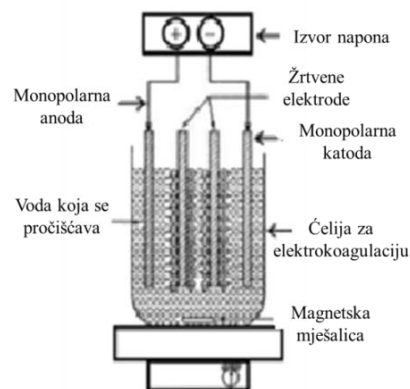
3.2.1. IZVEDBA REAKTORA

Izvor napona je nužan dio reaktora za izvedbu elektrokoagulacije zbog nespontanosti procesa elektrolize. Osim toga, reaktor mora sadržavati anodu i katodu odnosno dvije elektrode uronjene u elektrolit čija konfiguracija može biti monopolarna ili bipolarna. Monopolarna konfiguracija (slika 9) označava način spajanja elektroda kod kojeg je svaka elektroda koja se nalazi u elektrokemijskom reaktoru spojena na izvor napajanja. Bipolarna konfiguracija (slika 10) je priključivanje samo krajnje anode i katode na izvor napona, dok se ostale elektrode koje se nalaze između njih polariziraju pod djelovanjem električnog polja i nazivaju žrtvene elektrode. Bipolarne elektrode će se nabijati ovisno o naboju paralelne elektrode do njih. Prednosti bipolarne konfiguracije su manja složenost pri izradi reaktora, manji padovi napona uslijed

manje električnih kontakata te bolja raspodjela potencijala i manji energetski gubici. Međutim, u slučaju da jedan članak pri takvoj konfiguraciji elektroda prestane s radom, reaktor u potpunosti prestaje raditi. Osim toga, pažnju treba obratiti na mogućnost pojave „by pass“ struja⁵⁰.



Slika 9. Prikaz elektrokemijskog reaktora s paralelnim monopolarnim elektrodama⁴⁸



Slika 10. Prikaz elektrokemijskog reaktora s paralelnim bipolarnim elektrodama⁴⁸

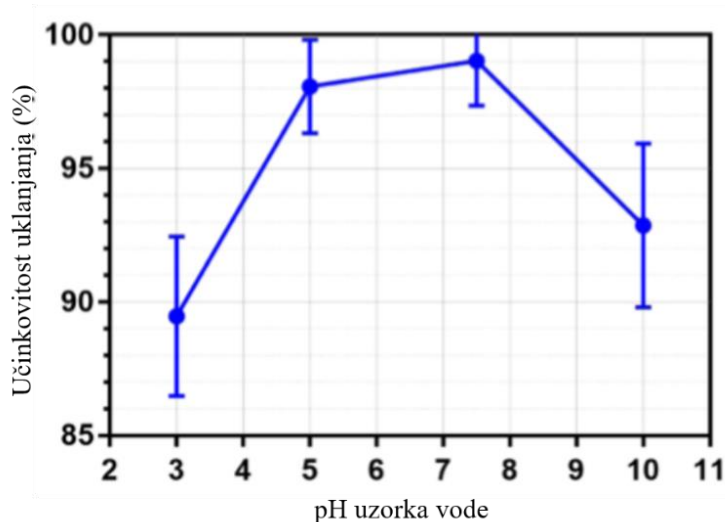
3.2.2. UKLANJANJE MIKROPLASTIKE IZ VODE ELEKTROKOAGULACIJOM

Metoda elektrokoagulacije još uvijek nije detaljno istražena kada je riječ o njenoj primjeni na uklanjanje mikroplastike iz vode. S obzirom na to nužno je provesti dodatna istraživanja i analize kako bi se ona pokazala uspješnom. Međutim, dosadašnji rezultati pokazuju pozitivan trend pri takvoj primjeni te mogućnost njene provedbe s velikim uspjehom. Uklanjanje čestica polietilena elektrokoagulacijom se do sad pokazalo kao djelotvoran način pročišćavanja vode od takvih mikročestica. Učinkovitost procesa je između 90 i 100 %.³⁷ Na provedbu i krajnje rezultate uklanjanja mikroplastike elektrokoagulacijom utječe pH analizirane vode^{37,52,53}. Vodljivost i gustoća struje ne pokazuju značajan utjecaj na djelotvornost procesa, ali ipak utječu na troškove njegovog provođenja i investicijske troškove³⁷.

3.2.2.1. Utjecaj pH

Elektrokoagulacija je metoda koja se pokazala djelotvornom u širokom području pH vrijednosti, od 3 do 10 pri čemu je učinkovitost uklanjanja veća od 85 %. Zbog takve fleksibilnosti metode, ona se može upotrijebiti za uklanjanje čestica mikroplastike iz raznih vrsta otpadnih voda bez dodatka kemikalija za postizanje određenog pH vode³⁷. U konačnici, u pH

području od 5 do 7.5 učinkovitost je iznad 99 %, dok je ista niža pri jače lužnatim i kiselim uvjetima što prikazuje slika 11. Razlog tome je što neutralno područje pH pogoduje formiranju stabilnijih flokula^{37,53}. Ako se primjenjuje aluminijeva anoda, stvaranje flokula započinje nakon što pH prijeđe vrijednost od 3.7 zbog mogućnosti da Al^{3+} specija reagira u smislu stvaranja hidroksida. Iako, pH vrijednost utječe na stvaranje flokula i njihova svojstva, ona ne utječe na vremensku učinkovitost elektrokoagulacije³⁷.

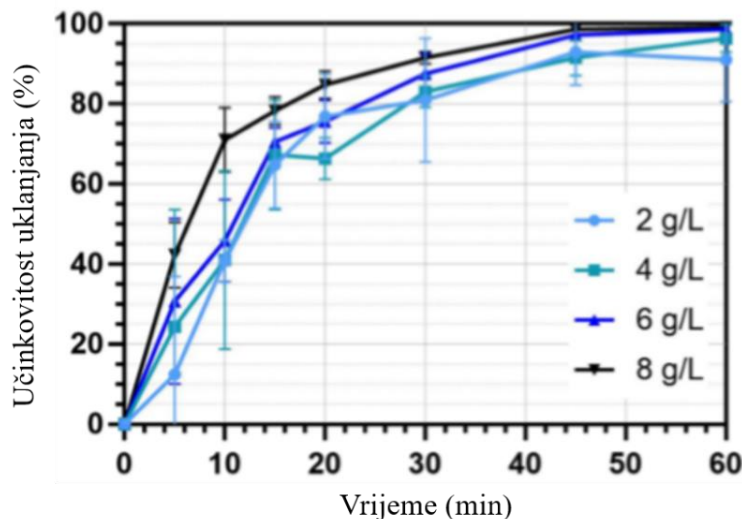


Slika 11. Učinkovitost uklanjanja mikročestica PE nakon 60 minuta elektrokoagulacije pri različitim početnim pH vrijednostima³⁷

3.2.2.2. Utjecaj provodnosti

Povećanjem koncentracije NaCl u otopini elektrolita, povećava se njena provodnost. Iako je utvrđena ovisnost učinkovitosti uklanjanja onečišćivala i provodnosti otopine u kojoj se provodi elektrokoagulacija, ona je neznatna primjenom na čestice mikroplastike, odnosno čestice polietilena. Rast djelotvornosti elektrokoagulacije pri uklanjanju onečišćivala (boja) nastaje kao posljedica odvijanja sporednih reakcija u otopini zbog porasta koncentracije kloridnih iona i stvaranja hipokloraste kiseline. Takve reakcije pomažu razgradnju onečišćivala i njihovu adsorpciju na površinu nastalih flokula⁵⁴. Svojstva polietilena i njegova stabilnost određuju duže vrijeme koje je potrebno za razgradnju mikročestica polietilena nego što je vrijeme trajanja samog procesa elektrolize. Dakle, iz tog razloga koncentracija kloridnih iona i prisutnost hipokloraste kiseline neće imati učinak na njihovo uklanjanje. Slika 12 prikazuje da povećanje

provodnosti elektrolita (povećanje koncentracije soli) neće značajno utjecati na djelotvornost uklanjanja mikročestica polietilena elektrokoagulacijom³⁷.



Slika 12. Učinkovitost uklanjanja mikročestica PE pri koncentracijama otopine NaCl od 2 g/l, 4 g/l, 6 g/l i 8 g/l³⁷

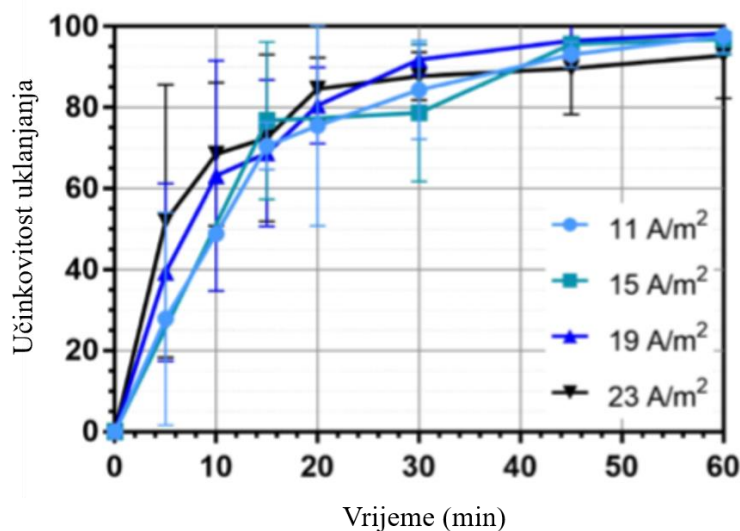
3.2.2.3. Utjecaj gustoće struje

Iz Faradayevog zakona koji je prikazan jednadžbom 11 proizlazi da će viša gustoća struje utjecati na povećanje količine koagulanta zbog većeg broja oslobođenih metalnih iona u procesu oksidacije na anodi. Iz toga slijedi, da se povećanjem gustoće struje pri kojoj je vođen proces elektrolize, povećava broj stvorenih flokula, a posljedično i količina uklonjenih čestica onečišćivala³⁷.

$$m(\text{Me}^{z+}) = \frac{I \cdot t \cdot M}{F \cdot z} \quad (11)$$

Primjenom navedenog na uklanjanje mikročestica polietilena se ne dobiva očekivana ovisnost. Porastom narinute gustoće struje u procesu elektrokoagulacije ne dolazi do porasta uklonjenih mikročestica polietilena. Iz toga proizlazi da povećanje koncentracije oslobođenih metalnih iona ne utječe na djelotvornost elektrokoagulacije, kada se ona primjenjuje na uklanjanje mikroplastike. Međutim, kada je proces flokulacije dominantan mehanizam tada gustoća struje ima određeni učinak na djelotvornost procesa elektrokoagulacije. Na slici 13 je to

u vremenskom periodu od nulte do 30-te minute. Dakle, vođenje procesa nakon tridesete minute uzrokuje stvaranje viška koagulanta i otpada koji će taložiti na dno reaktora, a samim time i energetske gubitke bez značajnijeg porasta uklonjenih mikročestica polietilena. Vođenje procesa pri nižim gustoćama struje povećava energetska učinkovitost ćelije³⁷.



Slika 13. Ovisnost postotka uklonjenih čestica polietilena o vremenu pri 4 različite gustoće struje (11 A/m², 15 A/m², 19 A/m² i 23 A/m²)³⁷

3.3. FILTRACIJA

Filtracija je fizikalni postupak kojim se uklanjaju suspendirane čestice iz vode, ali i mikroorganizmi i mulj. Općenito se primjenjuje kada se krute čestice žele izdvojiti iz tekuće faze ili plina⁵⁵. Temelji se na korištenju tankih fizičkih barijera s porama različitih promjera kako bi se zaustavio prolaz čestica većih od samih pora. Takve čestice zaostaju na filtrima i tvore filterski kolač koji s vremenom pruža veliki otpor i otežava provođenje filtracije. Tekućina koja prolazi kroz filtar, sadrži manje onečišćujućih tvari i naziva se filtrat⁵⁶. Ima široku primjenu u tretmanima obrade vode zbog jednostavne izvedbe i moguće nadogradnje procesa. Razni oblici filtracija se koriste tijekom odvijanja pročišćavanja i obrade voda ovisno o vrsti vode koja se obrađuje, njenoj namjeni i sastavu iste.

3.3.1. ULTRAFILTRACIJA

Ultrafiltracija je jedna od četiri vrsta membranske filtracije (uz mikrofiltraciju, nanofiltraciju i reverznu osmozu) koja se temelji na prijenosu mase, na procesu difuzije kao

posljedici postojanja gradijenta koncentracije ili tlaka. Membranske filtracije temelje se na jednostavnom načelu potiskivanja ulazne vode tlakom koji je veći od osmotskog tlaka, kroz specijalnu poroznu pregradu - membranu. Ultrafiltracija se koristi u tretmanima pročišćavanja voda zbog visoke učinkovitosti odvajanja te prihvatljive veličine postrojenja, niske potrošnje energije i ekonomski prihvatljivog postizanja pitke vode visoke kvalitete^{57,58}. Osim toga to je isključivo fizikalno – mehanički proces koji ne zahtjeva upotrebu kemikalija. U postrojenjima za obradu voda se često koristi uz razne druge procese primarne i sekundarne obrade, a posebice je učinkovita, ako se provodi uz koagulaciju⁵⁹.

Za njenu izvedbu koriste se tlakovi u rasponu od 1 do 10 bara uz primjenu asimetričnih ultrafiltracijskih membrana s veličinom pora od 1 do 100 nanometara. Na takvim membrana se zadržavaju razne čestice i makromolekule poput proteina, bakterija, virusa i suspendiranih krutih čestica. Dakle, njenom primjenom se uklanja više od 95 % organskog onečišćenja te patogenih organizama, a smanjuje se i zamućenost vode⁵⁹.

U odnosu na filtraciju pijeskom na čiju učinkovitost utječe kontaminacije ulazne vode, ultrafiltracijom se, bez obzira na stupanj onečišćenja ulazne vode, postiže filtrirana voda visoke kvalitete i čistoće⁶⁰. Ultrafiltracijske membrane imaju čvršće strukture pora od mikrofiltracijskih membrana te zadržavaju više krutih tvari. Takvu membranu karakterizira visoka i kontinuirana produktivnost⁶¹.

Njene strukture mogu biti izrađene od gusto pakiranih elastičnih, kapilarnih vlakana raznih polimernih materijala poput polisulfona, poliakrilonitrila, celuloznog acetata te njihove smjese. Svojstva navedenih tvari poput mehaničke čvrstoće i kemijske otpornosti su pogodna za tretmane obrade vode. Međutim, ovisno o vrsti vode tj. o njenom sastavu, temperaturi, pH vrijednosti i namjeni pročišćene vode upotrijebit će se pojedina membrana⁶¹.

3.3.1.1. Blokiranje membrana i membranski fluks

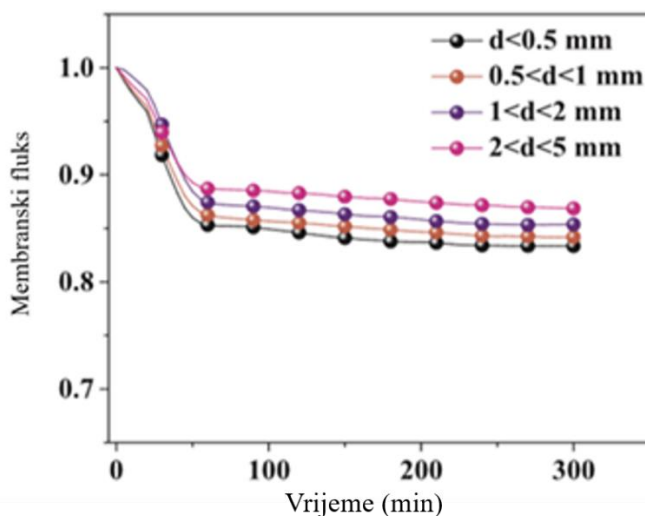
Fenomen blokiranja membrana je definiran smanjenjem protoka obrađivane vode kroz membranu uslijed raznih mehanizama koji se odvijaju na membrani ili u njenim porama. Blokiranje membrane može biti izazvano adsorpcijom ili taloženjem suspendiranih tvari u membranskim porama ili na njenoj površini. Mehanizmi su kategorizirani kao adsorpcija na stijenke pora i blokiranje pora kao unutarnji mehanizmi blokiranja te stvaranje kolača kao

vanjski mehanizam blokiranja membrane^{62,63}. Membranski fluks je najveći kada je blokiranje membrane minimalno te se smanjuje porastom adsorpcije, taloženja i rasta filtarskog kolača na membrani zbog začepljenja membranskih pora. S obzirom da fluks utječe na troškove procesa, poželjno je filtraciju provoditi pri subkritičnom fluksu koji osigurava ograničeno formiranje filtarskog kolača. Time proces traje duže vremensko razdoblje bez potrebe za čišćenjem membrane kemikalijama^{64,65}.

3.3.1.2. Uklanjanje mikroplastike iz vode ultrafiltracijom

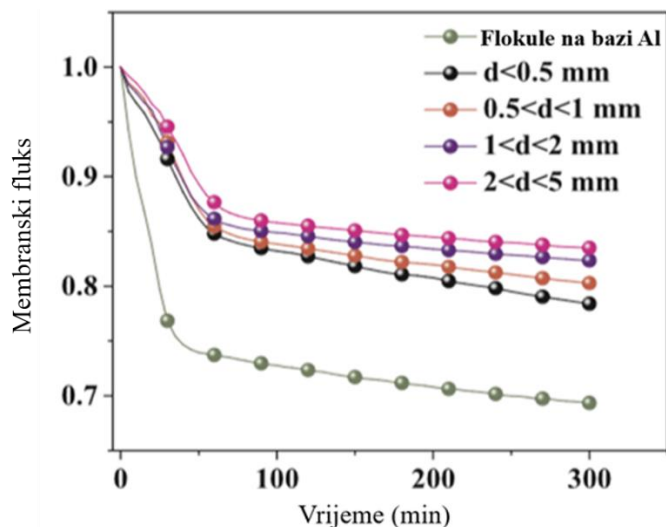
S obzirom na veličinu mikročestica polietilena i veličinu pora ultrafiltracijskih membrana te činjenicu da će one zaostati na njenoj površini, ultrafiltracija je učinkoviti proces pri uklanjanju istih iz vode. Dakle, glavni mehanizam koji određuje blokiranje membrana, kada se provodi pročišćavanje vode od mikročestica plastike, je formiranje filtarskog kolača. Međutim, ponašanje takvih membrana se razlikuje u slučaju provedbe koagulacije prije procesa ultrafiltracije i slučaja kada je izbjegnuto izvođenje koagulacije²³.

Što je veličina mikročestica polietilena manja to je veće blokiranje membrana. Iz navedenog slijedi da je u tom slučaju membranski fluks najmanji, a povećanjem veličine mikročestica on raste. Slika 14 pokazuje da je porastom veličine mikročestica PE reducirano začepljenje membranskih pora te je manje blokiranje membrana, a posljedično dolazi do porasta membranskog fluksa. Dakle, prisutnost većih PE mikročestica pozitivno utječe na opisani efekt²³.



Slika 14. Blokiranje membrane izazvano mikročesticama PE raznih promjera pri pH 7²³

Provođenjem koagulacije prije ultrafiltracije polietilenskih mikročestica blokiranje membrana je ozbiljnije. Iz toga slijedi da su membranski fluksevi manji nego onda kada se prethodnog ne provodi koagulacije. Također, do porasta membranskog fluksa dolazi s rastom promjera mikročestice polietilena. Do porasta blokiranja membrana provođenjem koagulacije dolazi zbog formiranja flokula koagulanta koje začepljuju pore membrana značajnije nego PE mikročestice i istovremeno drastično smanjuju membranski fluks što je vidljivo iz slike 15.²³



Slika 15. Blokiranje membrane izazvano PE mikročesticama uz prisutnost koagulanta na bazi Al pri pH 7²³

Prisutnost većih koaguliranih polietilenskih mikročestica uz flokule samog koagulanta povećava poroznost nastalog filtarskog kolača te posljedično raste membranski fluks. Uz prisutnost manjih PE mikročestica dolazi do formiranja homogenog filtarskog kolača te pogoršanja efekta blokiranja membrane, dok je uz prisutnost sve većih PE mikročestica taj efekt djelomično ublažen zbog nastanka nehomogenijeg filtarskog kolača^{23,59}.

3.3.2. PJEŠČANA FILTRACIJA

Pješčana filtracija je ekološki prihvatljiva metoda za obradu voda, a uz to je jednostavna i ekonomski povoljna zbog niskih operativnih troškova. Temelji se na protjecanju obrađivane vode kroz slojeve formirane zrcima pijeska koji djeluju poput sita te zadržavaju suspendirane i dispergirane čestice veće od pora u nastalim slojevima^{66,67}. Što je promjer zrna pijeska manji, čestice onečišćivala dulje zaostaju u filtru a time se povećava njegova učinkovitost. S obzirom da

protjecanjem vode onečišćenja zaostaju u pijesku, filter se začepljuje te ga je potrebno povremeno isprati²⁹. Može doći do formiranja sloja onečišćujućih tvari na površini takvog filtra ili može doći do dubinske filtracije u slučaju manjih čestica koje teže zaostaju⁶⁸.

Brza pješčana filtracija se temelji na granuliranoj gravitacijskoj filtraciji, a zahtjeva korištenje pumpi i kemikalija koje potiču flokulaciju i na taj način poboljšavaju i pospješuju filtraciju. Nastajanje flokula omogućava privlačenje suspendiranih čestica i njihovu sedimentaciju⁶⁶. To je mehanička metoda uklanjanja onečišćenja većih od 0,35 mm, s rasponom protoka od 5 - 30 m³ h⁻¹, koja se temelji na fizikalnim postupcima adsorpcije i isključenja po veličini. Sloj pijeska i sloj šljunčanih čestica tvore filter, a porastom dubine filtra progresivno raste veličina čestica pijeska⁶⁹.

Spora pješčana filtracija je standardni tretman biofiltracije u obradi otpadnih voda uz raspon protoka od 0,1 – 0,2 m³ h⁻¹.⁶⁹ Biofiltracija je ostvarena raznim mikrobnim zajednicama koje koloniziraju i tvore biofilmove na površini čestica koje se nalaze u filtracijskom sloju te razgrađuju razne organske tvari^{70,71}. Razgradnja se potiče djelovanjem izvanstaničnih enzima koji makromolekule prevode u manje supstrate koji kao takvi mogu biti transportirani u biofilm⁷².

3.3.2.1. Uklanjanje mikroplastike iz voda pješčanom filtracijom

Djelotvornost uklanjanja mikročestica plastike brzom pješčanom filtracijom, provođenjem konvencionalne obrade voda, iznosi između 29 % i 50 % ovisno o obliku mikročestica koje se uklanjaju. Najučinkovitije će se uklanjati one u obliku sfera i vlakana, dok će se najteže filtrirati fragmenti mikroplastike³⁴. S obzirom na veličinu i svojstva iste, mikročestice koje se obrađuju zaostaju između zrnaca pijeska te smanjuju poroznost filtra, a osim toga mogu se procesom adhezije zadržati na slojevima pješčanog filtra. Kada se filter začepi provodi se ispiranje istog, najčešće djelovanjem vode od dna filtra prema vrhu. Takvo zasićenje filterskog sredstva dovodi do povećanja koncentracije onečišćujuće tvari odnosno mikroplastike. Kao što je vidljivo u tablici 2 mikročestice polipropilena uzrokuju opisano začepljenje pora. Dakle, uklanjanje mikročestica polietilena navedenom metodom bit će jednostavnije u odnosu na uklanjanje mikročestica polipropilena⁷³.

Tablica 2. Prikaz učinkovitosti uklanjanja mikročestica PE i PP brzom pješčanom filtracijom

Vrsta mikroplastike	Postotak tvari u uzorku prije provođenja pješčane filtracije	Postotak tvar u uzorku nakon provođenja pješčane filtracije
POLIETILEN	30,99	1,86
POLIPROPILEN	1,71	1,86

Iako se pješčanom filtracijom može ukloniti mikroplastika raznih raspona veličina i oblika, prikladnija je za upotrebu kao tercijarni tretman obrade voda, odnosno kao posljednja metoda u nizu tretmana obrade vode zbog porasta djelotvornosti procesa na više od 90 %. Provođenjem pješčane filtracije u obliku konvencionalnog tretmanskog procesa učinkovitost metode je prilično manja u odnosu na njenu primjenu kao napredne metode u obradi voda. Kod konvencionalnog tretmanskog procesa pješčana filtracija slijedi nakon provedbe koagulacije, flokulacije i sedimentacije, dok se napredni tretmani vode provode kao dodatne metode u svrhu detaljnijeg pročišćavanja iste i dobivanja kvalitetnije vode u konačnici^{74,75}.

3.3.3. FILTRACIJA AKTIVNIM UGLJENOM

Filtracija aktivnim ugljenom je filtracija u kojoj se kao filtarsko sredstvo koristi granulirani aktivni ugljen čiji je promjer čestica od 1,2 do 1,6 mm. Odjeljivanje kontaminata iz vode se temelji na fizikalno – kemijskom procesu adsorpcije u kojem se takva tvar nakuplja na površini adsorbensa, a pročišćena voda izlazi iz takvog sustava i odvodi se u daljnje procese. Zbog povoljnih svojstva poroznosti i velike površine na kojoj se može odvijati adsorpcija, aktivni ugljen je djelotvoran adsorbens. Navedena metoda se primjenjuje za uklanjanje organskih onečišćenja i čvrstih tvari iz tretiranih voda, a smanjuje zamućenost iste i uzrokuje njenu biološku stabilizaciju. Zbog tvari koje se adsorbiraju na površinu granula aktivnog ugljena, takav se filter mora češće ispirati što u konačnici dovodi do reduciranja aktivnosti ugljena te iscrpljivanja i gubitka ugljika čime se smanjuje djelotvornost procesa. Zatim se provodi parna, kemijska ili termička regeneracija filtra ili se istrošeni aktivni ugljen zamjenjuje novim⁷⁶. Tijekom filtracije aktivnim ugljenom nema stvaranja nusprodukata i mulja koji je potrebno zbrinuti, međutim za proces regeneracije filtarskog sredstva potrebne su velike količine energije. Biološka aktivnost unutar filtra može uzorkovati njegovo začepljenje i utjecati na adsorbirane

organske spojeve, s toga je potrebno uzeti u obzir mogućnost smanjenja ili uklanjanja biološke aktivnosti tijekom provođenja procesa uz predodžbu o operativnim troškovima istog⁷⁷.

3.3.3.1. Uklanjanje mikroplastike iz vode filtracijom aktivnim ugljenom

Uklanjanje mikroplastike iz vode procesom filtracije u kojem se koristi granulirani aktivni ugljen je djelotvoran proces, posebice u slučaju manjih mikročestica plastike. Ako se prije provedbe filtracije odvija ozonizacija, djelovanje ozonom koji ima jako oksidirajuće djelovanje na obrađivanu vodu, povećat će se učinkovitost same filtracije. Kao razlog tome navodi se prevođenje velikih organskih molekula i organske materije u manje frakcije čime se povećava biorazgradivost i posljedično smanjuje mogućnost začepljenja filtarskog sredstva. Povećanje učinkovitosti zbog prethodne ozonizacije vode se odvija za 17-22 %, čime ukupna djelotvornost filtracije aktivnim ugljenom iznosi 56-61 %. Mikroplastika koja ima oblik sfere će se najznačajnije uklanjati, a zatim one u obliku fragmenata, dok će se vlakna mikroplastičnih čestica uklanjati s najmanjim postotkom učinkovitosti. Provođenjem metode pri pročišćavanju voda od mikročestica polietilena i polipropilena bitno je naglasiti da će se ukloniti više polietilenskih mikročestica za otprilike 20 % u odnosu na polipropilenske mikročestice³⁴.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu promatrane su već postojeće metode za obradu voda pri njihovoj primjeni na uklanjanje mikročestica polietilena i polipropilena iz istih. Uključeni su procesi koagulacije, elektrokoagulacije i tri vrste filtracije: ultrafiltracija, pješčana filtracija te filtracija aktivnim ugljenom. S obzirom na važnost i nužnost rješenja ovog pitanja, malo je radova i istraživanja koji se bave ovom problematikom. Najveći raspon ispitivanja upućen je k polietilenu zbog činjenice da lakše suspendira u vodi, dok je dostupno vrlo malo podataka za uklanjanje mikročestica polipropilena.

Koagulacijom je moguće ukloniti dio mikročestica polietilena iz vode, međutim djelotvornost procesa nije zadovoljavajuća da bi samo ova metoda bila dovoljna za uklanjanje mikroplastike u tretmanima obrade voda. Osim toga, da bi se postigla pogodna djelotvornost nužno je zadovoljiti uvjete povoljne pH vrijednosti, veličine i oblika mikročestica plastike te prisutnost koagulantnih dodataka.

Elektrokoagulacija je najmanje istražena od navedenih metoda u slučaju uklanjanje mikroplastike iz vode, ali bez obzira na to ona predstavlja potencijalno rješenje problema. Efikasna je pri uklanjanju mikročestica polietilena iz vode, a osim toga je jednostavna i relativno jeftina te djeluje u širokom području pH vrijednosti što omogućava pročišćavanje raznih vrsta voda.

Navedeni oblici filtracije su djelotvorni načini za uklanjanje čestica mikroplastike, iako se ultrafiltracija ističe kao najbolja. Ultrafiltracijom se postiže velika djelotvornost i na nju ne utječe onečišćenost vode koja se obrađuje kao kod pješčane filtracije, ali je potrebno kontrolirati začepljenje pora filtra. Dobro rješenje predstavlja i filtracija aktivnim ugljenom, međutim troškovi regeneracije filtarskog sredstva su visoki. Ultrafiltracija je pogodnija za uklanjanje većih čestica mikroplastike, dok se za manje mikročestice filtracija aktivnim ugljenom pokazala kao djelotvornija metoda.

5. LITERATURA

1. Popkin M. B., D'Anci E. K., Rosenberg H. I. (2010) Water, hydration and health. *Nutrition Reviews*. 68 (8), 439-458.
2. Klein S., Dimzon K. I., Eubeler J., Knepe P. T. (2017) Analysis, Occurrence and Degradation of Microplastics in the Aqueous Environment: Occurrence in the Aquatic Environment. U: Wagner M., Lambert S., ur., *Freshwater Microplastics: Emerging Environmental Contaminants?* Svezak 58. Frankfurt: Springer Open, str. 58-60.
3. <https://www.theguardian.com/environment/2019/aug/22/microplastics-in-water-not-harmful-to-humans-says-who-report> (pristupljeno 5.4.2020.)
4. <https://www.sciencehistory.org/science-of-plastics> (pristupljeno 5.4.2020.)
5. <https://www.britannica.com/science/polyethylene> (pristupljeno 5.4.2020.)
6. <https://www.britannica.com/science/polypropylene> (pristupljeno 5.4.2020.)
7. Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M., Ni B. J. (2018.) Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal. *Water Research*. 152, 21-37.
8. Westphalen H., Abdelrasoul A. (2017) Challenges and Treatment of Microplastics in Water: Impact of microplastics on environment. U: Glavan M., ur., *Water Challenges of an Urbanizing World*. IntechOpen, str. 76-78.
9. https://www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf (pristupljeno 6.4.2020.)
10. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-002-En.pdf> (pristupljeno 6.4.2020.)
11. Westphalen H., Abdelrasoul A. (2017) Challenges and Treatment of Microplastics in Water: Origin and characterization of microplastics. U: Glavan M., ur., *Water Challenges of an Urbanizing World*. IntechOpen, str. 72-75.
12. <https://www.britannica.com/technology/microplastic> (pristupljeno 6.4.2020.)
13. Andrady L. A. (2011) Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*. 62, 1596-1605.
14. Webb K. H., Arnott J., Crawford J. R., Ivanova P. E. (2013) Plastic Degradation and Its Environmental Implications with Special Reference to Poly(ethylene terephthalate). *Polymers*. 5, str. 1-18.

15. Andrady A. L. (2015) *Plastics and Environmental Sustainability*. John Wiley & Sons, str. 147-157.
16. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyethylene-plastic>
(pristupljeno 8.4.2020.)
17. Janović Z. (1997) Polimeri radikalnih polimerizacija: Polietilen. U: Vidoša B., ur., *Polimerizacija i polimeri*, Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, str. 317-324.
18. Janović Z. (1997) Koordinativne polimerizacije i polimeri: Koordinativni polimeri. U: Vidoša B., ur., *Polimerizacija i polimeri*, Zagreb: Hrvatsko društvo kemijskih inženjera i tehnologa, str. 442-446.
19. <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polypropylene-pp-plastic>
(pristupljeno 10.4.2020.)
20. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/326499/9789241516198-eng.pdf?ua=1>
(pristupljeno 14.4.2020.)
21. Novotna K., Cermakova L., Pivokonska L., Cajthaml T., Pivokonsky M. (2019) Microplastics in drinking water treatment – Current knowledge and research needs. *Science of the Total Environment*. 667, 730-740.
22. Herbort A. F., Sturm M. T., Schuhen K. (2018) A new approach for the agglomeration and subsequent removal of polyethylene, polypropylene, and mixtures of both from freshwater system – a case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 25, 15226-15234.
23. Ma B., Xue W., Hu C., Liu H., Qu J., Li L. (2019) Characteristics of microplastic removal via coagulation and ultrafiltration during drinking water treatment. *Chemical Engineering Journal*. 359, 159-167.
24. <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=32132> (pristupljeno 15.4.2020.)
25. Gregory J., Duan J. (2001) Hydrolyzing metal salts as coagulants. *Pure Applied Chemistry*. 73/12, 2017-2026.
26. Prakash N. B., Sockan V., Jayakaran P. (2014) Waste Water Treatment by Coagulation and Flocculation. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*. 3/2, 479-484.

27. Ma B., Xue W., Ding Y., Hu C., Liu H., Qu J. (2018) Removal characteristics of microplastics by Fe – based coagulants during drinking water treatment. *Journal of Environmental Sciences*. 78, 267-275.
28. Aguilar M. I., Saez J., Llorens M., Soler A., Ortuno J. F. (2003) Microscopic observation of particle reduction in slaughterhouse wastewater by coagulation – flocculation using ferric sulphate as coagulant and different coagulant aids. *Water Research*. 37, 2233-2241.
29. Manahan S. E. (2000) *Water Treatment: Removal of Solids*. Sedmo izdanje. CRC Press.
30. Sillanpaa M., Ncibi M. C., Matilainen A., Vepsalainen M. (2018). *Chemosphere*. 190, 54-71.
31. Park S., Yoon T. (2009) Effects of iron species and inert minerals on coagulation and direct filtration for humic acid removal. *Desalination*. 239, 146-158.
32. Zhao Y. X., Gao B. Y., Zhang G. Z., Qi Q. B., Wang Y., Phuntsho S., Kim J. H., Shon H. K., Yue Q. Y. (2014). Coagulation and sludge recovery using titanium tetrachloride as coagulant for real water treatment: A comparison against traditional aluminum and iron salts. *Separation and Purification Technology*. 130, 19-27.
33. Aguilar M. I., Saez J., Llorens M., Soler A., Ortuno J. F., Meseguer V., Fuentes A. (2005). Improvement of coagulation-flocculation process using anionic polyacrylamide as coagulant aid. *Chemosphere*. 58, 47-56.
34. Wang Z., Lin T., Chen W. (2020) Occurrence and removal of microplastics in an advanced drinking water treatment plant (ADWTP). *Science of the Total Environment*. 700, 134520.
35. Chen G. (2004) Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*. 38, 11-41.
36. Holt P. K., Barton G. W., Mitchell C. A. (2005) The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*,. 59, 355-367.
37. Perren W., Wojtasik A., Cai Q. (2018) Removal of Microbeads from Wastewater Using Electrocoagulation. *ACS Omega*. 3, 3357-3364.
38. Naje A. S., Abbas S. A. (2013) Electrocoagulation Technology in Wastewater Treatment: A Review of Methods and Applications. *Civil and Environmental Research*. 3, 29-42.

39. Emamjomeh M. M., Sivakumar M. (2009) Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*. 90, 1663-1679.
40. Nouri J., Mahvi A. H., Bazrafshan E. (2010) Application of Electrocoagulation Process in Removal of Zinc and Copper From Aqueous Solutions by Aluminum Electrodes. *International Journal of Environmental Research*. 4, 201-208.
41. S. Aoudj, A. Khelifa, N. Drouichea, M. Hecini, H. Hamitouche (2010) Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. *Chemical Engineering and Processing*. 49, 1176-1182.
42. Brillas E., Sirés I., Oturan M. A. (2009) Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. *Chemical Reviews*. 109, 6570-6631.
43. Chang J., Ellis A. V., Yan C., Tung C. (2009) *Separation and Purification Technology*., 68, 216-221.
44. Bazrafshan E., Mohammadi L., Ansari-Moghaddam A., Mahvi A. H. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process– a systematic review. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*., 13, 74.
45. Mollah M. Y. A., Schennach R., Parga J. R., Cocke D. L. (2001) Electrocoagulation (EC) —science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 84, 29-41.
46. Alipour Z., Azari A. (2019) COD Removal from Industrial Spent Caustic Wastewater: A Review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 8, 103678, 27-31.
47. Kobya M., Can O. T., Bayramoglu M. (2003) Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*. 100, 163-178.
48. Mollah M. Y. A., Schennach R., Parga J. R., Cocke D. L. (2001) Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 84, 29-41.
49. Kuokkanen V., Kuokkanen T., Ramo J., Lassi U. (2015) Electrocoagulation treatment of peat bog drainage water containing humic substances. *Water research*. 79, 79-87.
50. Kobya M., Ulu F., Gebologlu U., Demirbas E., Oncel M. S. (2011) Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: different

- connection modes and Fe-Al electrodes. *Separation and Purification Technology*. 77, 283-293.
51. Mollah M. Y. A., Morkovsky P., Gomes J. A. G., Kesmez M., Parga J., Cocke D.L. (2004) Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*. 114, 199-210.
 52. Janpoor F., Torabianand A., Khatibikamal V. (2011). Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*,. 86/8 (2011), 1113-1120.
 53. Yavuz Y., Ogutveren U. B. (2018) Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes. *Journal of Environmental Management*. 207, 151-158.
 54. Pirkarami A., Olya M. E. (2014) Removal of dye from industrial wastewater with an emphasis on improving economic efficiency and degradation mechanism. *Journal of Saudi Chemical Society*. 21, 179-186.
 55. American Water Works Association (2011) Granular Media Filtration: Types of Particle Filtration. U: Edzwald J. K., ur., *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water*. Šesto izdanje. American Water Works Association, American Society of Civil Engineers, McGraw-Hill, 604-606.
 56. Majekodunmi S. O., Olorunsola E. O. (2014) Review of some recent advances on filtration in pharmaceutical industry. *Journal of Pharmacy and Biological Sciences*. 30-38.
 57. Molinari, R., Argurio P., Poerio T. (2009) Membrane Processes Based on Complexation Reactions of Pollutants as Sustainable Wastewater Treatments. *Sustainability* 2009. 1, 978-993.
 58. Molinari R., Argurio P., Poerio T. (2006) Ultrafiltration of Polymer-Metal Complexes for Metal Ion Removal from Wastewaters. *Macromolecular Symposia*. 235, 206–221.
 59. Poerio T., Piacentini E., Mazzei R. (2019) Membrane Processes for Microplastic Removal. *Molecules*. 24, 41-48.
 60. Xu D., Bai L., Tang X., Niu D., Luo X., Zhu X., Li G., Liang H. (2019) A comparison study of sand filtration and ultrafiltration in drinking water treatment: Removal of organic

- foulants and disinfection by product formation. *Science of the Total Environment*. 691, 322-331.
61. Tchobanoglous G., Darby J., Bourgeois K., McArdle J., Genest P., Tylla M. (1998). Ultrafiltration as an advanced tertiary treatment process for municipal wastewater. *Desalination*. 119, 315-322.
 62. Meng S., Zhang M., Yao M., Qiu Z., Hong Y., Lan W., Xia H., Jin X. (2019) Membrane Fouling and Performance of Flat Ceramic Membranes in the Application of Drinking Water Purification. *Water*. 11, 2606, 1-16.
 63. Howe K. J., Clark M. M. (2002) Fouling of Microfiltration and Ultrafiltration Membranes by Natural Waters. *Environmental Science and Technology*. 36, 3571-3576.
 64. Tarleton S. (2014) Ultrasonic: Membrane Filtration. U: Pirkonen P., Ekberg B., ur., *Progress in Filtration and Separation*. London: Academic Press, str. 415-418.
 65. Sharmaa A., Jelemensky'a M., Paulena R., Fikar M. (2016) Estimation of membrane fouling parameters for concentrating lactose using nanofiltration. *Computer Aided Chemical Engineering*. 38, 151-156.
 66. <https://wikiwater.fr/a23-sand-filtration-for-raw-water> (pristupljeno 26.4.2020.)
 67. <https://www.logisticon.com/en/technologies/sand-filtration> (pristupljeno 26.4.2020.)
 68. <https://emis.vito.be/en/bat/tools-overview/sheets/sand-filtration> (pristupljeno 27.4.2020.)
 69. Bar - Zev E., Belkin N., Liberman B., Berman T., Berman – Frank I. (2012) Rapid sand filtration pretreatment for SWRO: Microbial maturation dynamics and filtration efficiency of organic matter. *Desalination*. 286, 120-130.
 70. Bouwer E. J., Zehnder A. J. B. (1993) Bioremediation of organic compounds — putting microbial metabolism to work. *Trends in Biotechnology*. 11, 360-367.
 71. Sontheimer H., Gimbel R. (1979) Flocculation–filtration in drinking-water treatment, *J. Water Wastewater Research*. 12, 147-155.
 72. Larsen T. A., Harremoes P., (1994) Degradation mechanisms of colloidal organic matter in biofilm reactors, *Water Research*. 28, 1443-1452.
 73. Talvitie J., Mikola A., Koistinen A., Setala O. (2017) Solutions to microplastic pollution: Removal of microplastics from wastewater treatment technologies. *Water Research*. 123, 401-407.

74. Talvitie J. (2018) Wastewater treatment plants as pathways of microlitter to the aquatic environment. Doktorska disertacija. Helsinki: Sveučilište Aalto.
75. <https://www.witpress.com/elibRARY/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/229/37136> (pristupljeno 29.4.2020.)
76. <https://iaspub.epa.gov/tdb/pages/treatment/treatmentOverview.do?TreatmentProcessId=2074826383> (pristupljeno 2.5.2020.)
77. Baresel C., Harding M., Fang J. (2019) Ultrafiltration/Granulated Active Carbon-Biofilter: Efficient Removal of a Broad Range of Micropollutants. *Applied Sciences*. 9, 710.

ŽIVOTOPIS

Lorena Valek [REDACTED] Osnovnu školu Josipa Zorića pohađala je u Dugom Selu, a 2013. godine upisuje VII. gimnaziju u Zagrebu. Maturirala je 2017. godine nakon čega upisuje Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije u Zagrebu, smjer Primijenjene kemije. Po završetku druge godine studija odrađuje praksu u Centru za forenzička ispitivanja, istraživanja i vještačenja „Ivan Vučetić“.