

Oporaba tekstilne otpadne vode membranskim procesima i ispitivanje efikasnosti bojadisanja zeta potencijalom

Sarunović, Šejla

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:149:669654>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-18**



FKITMCMXIX

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Šejla Sarunović

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, rujan 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ

Šejla Sarunović

**OPORABA TEKSTILNE OTPADNE VODE MEMBRANSKIM
PROCESIMA I ISPITIVANJE EFIKASNOSTI BOJADISANJA ZETA
POTENCIJALOM**

DIPLOMSKI RAD

Voditelj rada: Izv. prof. dr. sc. Davor Dolar

Članovi ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Davor Dolar

Prof. dr. sc. Mirela Leskovic

Doc. dr. sc. Zvonimir Katančić

Zagreb, rujan 2022.

SAŽETAK

Sve veća potrošnja vode za industrijske i kućne potrebe dovodi do njezine nestašice u mnogim zemljama. Industrije, od kojih je tekstilna jedna od najvećih na svijetu, također su suočene sa sve većim troškovima vodoopskrbe i procesa pročišćavanja te strožim kontrolama pri ispuštanju onečišćenih industrijskih otpadnih voda. Zbog navedenog javlja se potreba za oporabom otpadnih voda tekstilne industrije, što je postala privlačna opcija za zaštitu okoliša i održivi industrijski razvoj. Među raznim tehnologijama razvijenim u tu svrhu, istaknuli su se membranski procesi koji jamče prihvatljivu kvalitetu otpadnih voda namijenjenih uporabi u procesu tekstilne industrije.

Cilj ovog rada bio je uporaba tekstilne otpadne vode (TOV) u svrhu procesa bojadisanja. Obrađen je uzorak permeata membranskog bioreaktora (MBR) procesom ultrafiltracije (UF) pri radnom tlaku od 10 bar primjenom 2 kDa membrane u obliku ravne plahte. Kvaliteta MBR i UF permeata određena je analizom sljedećih fizikalno - kemijskih parametara: mutnoća, električna provodnost (κ), kemijska potrošnja kisika (KPK), ukupno obojenje (436, 525, 620 nm), pH - vrijednost i ukupni organski ugljik (eng. *Total organic carbon*, TOC).

Proces bojadisanja provodio se UF permeatom i vodovodnom vodom te se učinkovitost obojenja određivala mjerenjem zeta potencijala i spektrofotometrijskom analizom uzoraka pletiva. Također, praćeni su i fizikalno - kemijski parametri uzoraka obojenih vodovodnih voda izuzetih tijekom procesa bojadisanja i ispiranja.

Rezultati fizikalno - kemijske analize ukazali su na povišene vrijednosti parametara MBR permeata te potrebu za dodatnom UF obradom. UF obradom postiglo se značajno smanjenje mutnoće (98,8 %), ukupnog obojenja (91,4 %), KPK (90,4 %) te TOC-a (77,4 %). Nešto niži postotak smanjenja dobiven je kod električne provodnosti (41,7 %). Na temelju rezultata zeta potencijala i spektrofotometrijske analize dobivena je bolja obojenost uzorka pletiva koji je bojadisan UF permeatom.

Ključne riječi: tekstilna otpadna voda, membranski bioreaktor, ultrafiltracija, bojadisanje, zeta potencijal

SUMMARY

Increasing consumption of water for industrial and domestic needs is leading to its shortage in many countries. Many of today's industries, of which textile is one of the largest in the world, are now facing and struggling with increased costs of water supply and treatment processes, as well as strict controls on wastewater discharge from industrial sources, which usually contains heavy pollutants. Due to the above, there is a crucial need for treatment of wastewater from the textile industry, which now represents an attractive option for environmental protection and sustainable industrial development. Among various technologies developed for this purpose, membrane processes that guarantee acceptable quality of wastewater intended for reuse in textile industry process, were accentuated.

The aim of this study was the reuse of textile wastewater for the purpose of dyeing process. A membrane bioreactor (MBR) permeate was treated by ultrafiltration (UF) at a working pressure of 10 bar using a 2 kDa flat sheet membrane. The quality of MBR and UF permeates was determined by analysis of the following physico - chemical parameters: turbidity, conductivity (κ), chemical oxygen demand (COD), average color (436, 525 and 620 nm), pH, and concentration of total organic carbon (TOC). The dyeing process was performed with UF permeate and tap water used in the factory and the dyeing efficiency was determined by measuring the zeta potential and spectrophotometric analysis of knitted cotton fabrics. Physico - chemical parameters of colored tap water samples, taken during the dyeing and rinsing process, were also monitored.

The results of physico - chemical analysis indicated increased values of MBR permeate parameters and the need for additional UF treatment. UF treatment achieved a significant reduction in turbidity (98.8%), average color (91.4%), COD (90.4%), and TOC (77.4%). A slightly lower percentage of conductivity reduction was obtained (41.7%). Based on the results of zeta potential and spectrophotometric analysis, a better coloration of the knitted cotton fabric was obtained with UF permeate.

Keywords: textile wastewater, membrane bioreactor, ultrafiltration, dyeing, zeta potential

Sadržaj:

1.	Uvod.....	1
2.	Opći dio	2
2.1.	Tekstilna otpadna voda i njene karakteristike	2
2.2.	Membrane i njihova karakterizacija.....	3
2.3.	Membranski procesi.....	5
2.3.1.	Tlačni membranski procesi	5
2.3.1.1.	Ultrafiltracija	6
2.3.1.2.	Membranski bioreaktor	7
2.4.	Zeta potencijal	8
2.4.1.	Zeta potencijal tekstilnih vlakana.....	10
2.5.	Literaturni pregled.....	11
3.	Eksperimentalni dio	12
3.1.	Uzorak tekstilne otpadne vode	12
3.2.	MBR uređaj	12
3.3.	UF uređaj	14
3.4.	Fizikalno - kemijske analize	15
3.5.	Proces bojadisanja pletiva	17
3.6.	Mjerenje zeta potencijala	18
3.7.	Spektrofotometrijska analiza obojenih uzoraka pletiva.....	19
4.	Rezultati i rasprava.....	20
4.1.	Fizikalno - kemijski parametri MBR permeata	20
4.2.	Fizikalno - kemijski parametri i faktor zadržavanja UF permeata	20
4.3.	Ispitivanje vrijednosti fizikalno - kemijskih parametara u procesu bojadisanja	23
4.4.	Vrijednosti zeta potencijala uzoraka pletiva	25
4.5.	Vrijednosti spektrofotometrijske analize uzoraka obojenog pletiva	26
5.	Zaključak	28

6. Popis simbola i kratica	29
7. Literatura	32
8. Životopis	37

1. Uvod

Voda je prirodni resurs koji je jedinstven, nezamjenjiv i neophodan za održavanje života na Zemlji. Porastom broja stanovništva i razvojem industrije dolazi do njene povećane potražnje čime se ugrožavaju prirodni resursi i vodeni okoliš. Na taj način voda postaje ograničavajući čimbenik razvoja te je potrebno što prije ekološki osvijestiti svakog pojedinca, ali i primijeniti nove tehnologije obrade i pročišćavanja otpadnih voda. Pročišćavanje industrijskih otpadnih voda ključna je potreba zbog već narušenog sustava u okolišu.

Oporaba industrijske otpadne vode pokazala se kao primjenjiv i učinkovit proces, naročito u tekstilnoj industriji koja se smatra jednom od najzagađenijih industrijskih sektora. Nedostatak tekstilne industrije predstavlja potreba za velikom količinom pitke vode za proizvodnju, ali i sadržaj njezine otpadne vode. U tekstilnoj industriji koristi se čak 2000 različitih kemikalija [1] koje su različite po kemijskom sastavu i uključuju otopljene i/ili suspendirane anorganske i organske spojeve te polimere. Međutim, jedni od najvećih zagađivača među mnogim kemikalijama smatraju se bojila korištena u procesu bojadisanja koja u velikom dijelu završe u otpadnim vodama. Za takve komponente u toj vodi veliki je izazov pronaći odgovarajuću metodu pročišćavanja.

U posljednjih nekoliko desetljeća ispitani su razni procesi pročišćavanja gdje su se kao veliki potencijal pokazali membranski procesi obrade voda u koje se ubrajaju membranski bioreaktor (MBR), mikrofiltracija (MF), ultrafiltracija (UF), nanofiltracija (NF) i reverzna osmoza (RO) [2]. Od svih navedenih procesa korištenih za pročišćavanje tekstilnih otpadnih voda (TOV) izbor ovisi o željenoj kvaliteti obrađene vode.

Cilj ovog rada bio je ispitati učinkovitost uporabe otpadne vode tekstilne industrije Galeb d.d. obradom MBR permeata membranskim UF procesom te analizom fizikalno - kemijskih parametara MBR i UF permeata, kao i efikasnost i kvalitetu bojadisanja pletiva mjerenjem zeta potencijala. Također, u svrhu određivanja kolorističkih parametara obojeni uzorci pletiva podvrgnuti su spektrofotometrijskoj analizi.

2. Opći dio

2.1. Tekstilna otpadna voda i njene karakteristike

Tekstilna industrija jedna je od najstarijih, najsloženijih industrija, ali i najonečišćujuća s obzirom na sastav i količinu otpadnih voda [3]. U smislu proizvodnje i zaposlenosti također je jedna od najvećih industrija na svijetu [1]. Tekstilna industrija pokriva široki spektar djelatnosti, koje uključuju proizvodnju tekstila od prirodnih vlakana kao što su pamuk, juta, svila i vuna, kao i sintetskih vlakana poput poliestera, poliamida i dr. [1]. Mehaničkom obradom, u koju spadaju procesi poput pređenja, tkanja i pletenja, se iz tih prirodnih ili sintetskih vlakana formiraju tekstilni materijali, nakon čega slijedi mokra obrada u koje spadaju procesi bijeljenja, pranja i bojadisanja. Mokri procesi u odnosu na mehaničke zahtijevaju veću količinu vode, otprilike 62,0 – 86,0 % ukupne količine vode potrošene u proizvodnji [4].

Stoga, mokrim procesima nastaje i veća količina otpadne vode koju je potrebno obraditi prije ispuštanja u okoliš. Tekstilna industrija tijekom procesa proizvodnje, za 1 kg tekstila, utroši 200 L vode koja se uglavnom koristi za prijenos bojila na vlakno i uklanjanje viška bojila s obrađenog uzorka procesom ispiranja [5]. Sastav TOV-e varira od postrojenja do postrojenja, ovisno o procesima proizvodnje, opremi i kemikalijama koje se koriste. Neke od korištenih komponenata tijekom procesa proizvodnje su škrob, poli(vinil-alkohol), natrijev hidroksid, vodikov peroksid, razne soli, metali, sulfidi, formaldehidi, bojila i dr. [1]. Posljedično tome, karakteriziraju ih povišene vrijednosti parametara poput pH - vrijednosti, temperature, mutnoće, ukupnog organskog ugljika (eng. *Total organic carbon*, TOC), električne provodnosti (κ), kemijske (KPK) i biokemijske (BPK₅) potrošnje kisika, obojenja te ukupno suspendiranih tvari (eng. *Total suspended solids*, TSS) [6]. Bojila i ostale kemikalije radi svog toksičnog djelovanja mogu onečistiti tlo, sediment i površinske vode, postajući globalna prijetnja okolišu. Obrada TOV-e neophodna je kako bi se zaštitio ekosustav i omogućila uporaba obrađene vode za navodnjavanje ili unutar proizvodnog procesa tekstilne industrije [6].

Do sada su razvijene mnoge tehnologije obrade TOV-e zasnovane na biološkim, kemijskim i fizikalno - kemijskim procesima. Biološki procesi predstavljaju primjenu aerobnih i/ili anaerobnih bakterija, algi ili gljivica, a kemijske procese predstavljaju elektrooksidacija, kemijska oksidacija itd. Fizikalno - kemijski procesi su najčešće korišteni procesi, a to su koagulacija, flokulacija, adsorpcija i ionska izmjena. Prethodno spomenuti procesi imaju

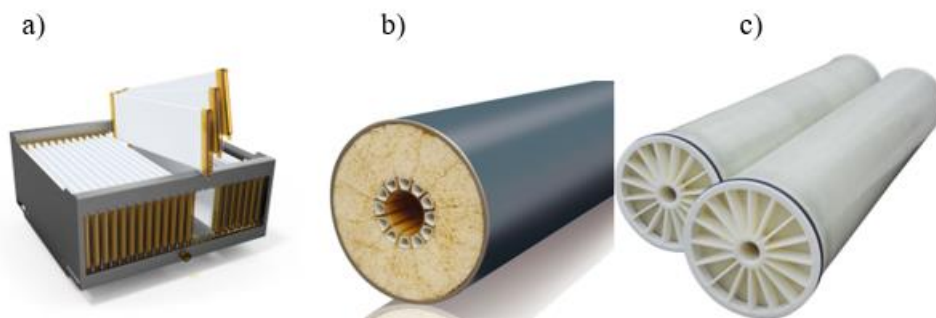
nedostatke poput stvaranja mulja te njegovog odlaganja, dugotrajnosti obrade itd. No, membranski procesi ne susreću se s prethodno navedenim. Također, membranski procesi pokazali su se najučinkovitijima pri obradi TOV-e što će u budućnosti dovesti do povećane uporabe i time minimaliziranja štetnog utjecaja na okoliš te troškova samog procesa tekstilne industrije [5, 7-9].

2.2. Membrane i njihova karakterizacija

Membrana je osnovni element svakog membranskog procesa i definira se kao semipermeabilna fizikalna pregrada koja dijeli dvije faze i omogućuje prijenos tvari između njih. Takav rezultat moguć je zbog pokretačke sile koja djeluje na membranu, a separacijski učinak ovisi o svojstvima same membrane kao što su selektivnost, permeabilnost, protok te mehanička, kemijska, termička i biološka stabilnost [10, 11]. Također, kako bi bile optimalne u procesu odvajanja organskih komponenti otpadnih industrijskih voda moraju biti postojane u širokom rasponu pH - vrijednosti, temperatura i na korozivno djelovanje [12].

Kako bi znali koju vrstu operacije treba provesti potrebno je napraviti karakterizaciju membrane. Struktura membrane vrlo je važna radi njezinih karakteristika, ali i za određivanje radnih parametara te načina separacijskog procesa kako bi se on uspješno proveo. Prema strukturi dijele se na izotropne membrane koje su jednake poroznosti po cijelom presjeku i anizotropne membrane karakteristične po različitoj poroznosti poprečnog presjeka membrane [12].

S obzirom na sastav materijala membrane su uglavnom izrađene od različitih polimera, metala ili keramike, od kojih se najčešće koriste polimeri jer su jeftini i jednostavno se formira porozna struktura (poliamidi, polisulfoni, polietilen i polipropilen). S obzirom na konfiguraciju ili module mogu biti izvedene od šupljih vlakana (eng. *hollow fiber*), spirala, cijevi ili ravne ploče (eng. *flat sheet*) što je prikazano na Slici 1. Moduli su najmanja praktična jedinica koja sadrži jednu ili više membrana te strukturi pružaju čvrstoću. Modulima se nastoji maksimalno iskoristiti aktivna membranska površina, postići da ta površina bude što veća u relativno malom volumenu (visoka gustoća slaganja membrana), postići dobre hidrauličke uvjete kako bi se minimalizirala koncentracijska polarizacija (koncentriranje otopljenih tvari na tlačnoj strani membrane), osigurati da pad tlaka u modulu ne bude previsok itd. [10-12].



Slika 1. Ravni modul (a), modul šupljikavih vlakana (b) i spiralni modul (c) [13-15].

Membranska tehnologija svrstava se u ekološki održive tehnologije sa "zelenom" kemijom zbog toga što za njen rad nisu potrebne kemikalije. Glavne prednosti u usporedbi s drugim procesima vezane su uz jedinstveni princip razdvajanja, tj. selektivnost membrane, mali utrošak energije, kontinuirana provedba procesa i mogućnost jednostavne integracije s drugim procesima. Prednost im je i to što zahtijevaju manje prostora od konvencionalnih tehnologija, lakoća prilagodbe postojećim postrojenjima, jednostavno održavanje kao i to da osiguravaju poboljšan nadzor nad procesima zbog visokog stupnja automatizacije [12, 16, 17].

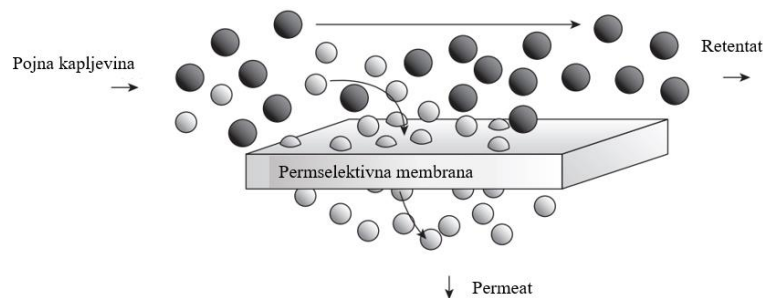
Pored brojnih prednosti koje membranske tehnologije posjeduju, glavni nedostatak im je blokiranje membrane (eng. *fouling*). Posljedica je to nakupljanja tvari u porama i na površini membranskog materijala što rezultira padom protoka, većim utroškom energije, a time i povećanjem operativnih i investicijskih troškova [10, 18].

Zbog blokiranja, membrane zahtijevaju učestalo čišćenje, npr. postupkom povratnog pranja. Čišćenje može biti fizikalno, kemijsko i biološko, a najčešće se koristi kemijsko. Odabir odgovarajućih kemikalija za čišćenje ovisi o sastavu ulazne struje i istaloženim slojevima na površini membrane. Odabrane komponente moraju biti kemijski stabilne, sigurne, perive s vodom, također moraju moći ukloniti većinu istaloženih slojeva, a da pritom ne oštete površinu membrane [19].

2.3. Membranski procesi

Iako u početcima korišteni u svrhe pročišćavanja vode poput desalinacije morske vode i obrade površinskih voda, membranski procesi danas imaju sve veću primjenu i u pročišćavanju industrijskih otpadnih voda [12].

Membranski procesi mogu se definirati kao membranska operacija koja je rezultat pokretačke sile nastale radi razlike potencijala faza koje dijeli membrana. Zbog pokretačke sile dolazi do prijenosa tvari i razdvajanja ulazne struje (pojna kapljevina) na dvije izlazne struje, retentat i permeat. Retentat (koncentrat) predstavlja dio struje (koncentrirana otopina) koju je membrana zadržala, a permeat (čista voda) dio ulazne struje koji je prošao kroz membranu što se može vidjeti na Slici 2 [10, 20]. Ta razlika potencijala može se izraziti gradijentom koncentracije (Δc), tlaka (Δp), temperature (ΔT) i električnim potencijalom (ΔE) te je to jedan od načina na koji se klasificiraju i razlikuju membranski procesi.



Slika 2. Prikaz membranskog procesa [18].

2.3.1. Tlačni membranski procesi

Tlačni membranski procesi su procesi u kojima je pokretačka sila radni tlak koji uzrokuje da otapalo i različite molekule otopljenih tvari prolaze kroz membranu dok druge molekule ili čestice zaostaju do određenog stupnja ovisno o strukturi membrane [10]. Važni su za proizvodnju permeata visoke kvalitete zbog njihove odlične učinkovitosti uklanjanja organskih onečišćujućih tvari male molekularne mase. Tlačni membranski procesi mogu se

kategorizirati prema veličini pora u sljedeće kategorije poredane od najmanjih do najvećih pora: RO, NF, UF i MF. Smanjenjem pora membrane, njezin otpor prijenosu tvari raste te kako bi se osigurao isti fluks, radni tlak se proporcionalno mora povećavati [20, 21].

Mogu se koristiti samostalno ili kao dopuna drugim metodama za obradu otpadne vode, a odabir ovisi o nekoliko čimbenika kao što su vrsta komponenti pojne kapljevine, volumen otopine koji se pročišćuje, stupanj potrebnog razdvajanja komponenti te također troškovi procesa osobito u industrijskim procesima velikih razmjera [11].

2.3.1.1. Ultrafiltracija

Ultrafiltracija je membranski proces koji se koristi za primjerice, pročišćavanje otpadnih voda. Omogućava zadržavanje makromolekula molekularne mase u rasponu od 10^4 do 10^6 i većih ovisno o veličini pora membrane i koloida iz otopina, mehanizmom koji se temelji na razlici u veličini i obliku čestica i veličini pora prisutnih u membrani. Osim toga, omogućava i uklanjanje bakterija i virusa [10, 11, 22].

Ultrafiltracijske membrane su porozne i anizotropne te se od ostalih membrana razlikuju po asimetričnoj strukturi i nižoj površinskoj poroznosti zbog gušćeg gornjeg sloja rasporeda pora. Veličina pora membrana je od 1,0 do 100,0 nm, a područje korištenih radnih tlakova u rasponu od 2 do 10 bar [23]. Klasifikacija membrana u UF procesima temelji se na veličini najmanje molekule za koju je karakteristično minimalno 90,0 %-tno membransko zadržavanje. Izražava se pomoću granične molekularne mase, MWCO (eng. *Molecular weight cut - off*) u Daltonima (Da) te se MWCO vrijednosti uglavnom kreću u rasponu od 1000 do 1 000 000 Da. Ne postoji precizan odnos između veličina pora i MWCO, budući da ovaj odnos ovisi o fizikalnoj i kemijskoj prirodi molekula otopljenih tvari [8, 10]. Polimeri su najčešći materijali od kojih se izrađuju UF membrane, a moraju imati visoku mehaničku, kemijsku i toplinsku stabilnost, dobru ravnotežu propusnosti i selektivnosti te dobru hidrofilnost prilikom korištenja s vodenim otopinama [22].

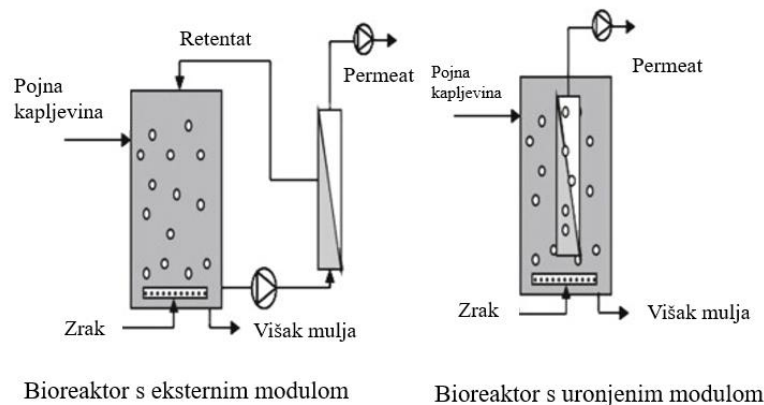
Uglavnom se UF membrane koriste u načinu ukriženog toka (eng. *cross-flow*), pri čemu procesna struja prolazi paralelno uz membranu laminarnim ili turbulentnim tokom čime se minimizira nakupljanje zadržane otopljene tvari neposredno uz površinu membrane. Ta akumulacija otopljenih tvari naziva se koncentracijska polarizacija koja uzrokuje da

koncentracija pri površini bude veća nego u otopini i direktno utječe na smanjenje protoka kroz membranu (stvaranje otpora), a osim toga može doći i do stvaranja „kolača“ (eng. *cake layer*) na površini membrane. Taj fenomen sprječava učinkovito odvajanje makromolekula i ograničava upotrebu UF procesa [24].

Ultrafiltracija se najviše koristi u obradi otpadnih voda zbog poboljšanog dizajna modula, operativnosti, ekonomičnosti, ali i zbog jednostavne integracije procesa s drugim procesima obrade otpadnih voda. Kombinacijom s drugim procesima pročišćavanja postaje idealan proces za dobivanje ne samo visokokvalitetnog permeata koji zadovoljava standarde ispuštanja otpadnih voda, već i mogućnost obrade industrijske otpadne vode u svrhu uporabe u proizvodnom procesu. Uglavnom se upotrebljava kao predobrada za RO te u kombinaciji s MBR-om [25, 26].

2.3.1.2. Membranski bioreaktor

Posljednjih godina MBR procesi izazvali su značajan interes radi visoke kvalitete dobivenog permeata i mogućnosti zadržavanja spororastućih mikroorganizama u svom bioreaktoru. MBR pripada tlačnim membranskim procesima te je jedna od naprednijih tehnika obrade koja se u posljednje vrijeme koristi za obradu i uporabu otpadne vode. Kombinira proces aktivnog mulja s membranom s ciljem većeg iskorištenja biorazgradivosti organskih tvari i postizanja visoke kvalitete TOV-e u odnosu na konvencionalne tretmane s aktivnim muljem. Može biti s uronjenim ili eksternim membranskim modulom (Slika 3). Kod prve izvedbe koja je ujedno i isplativija opcija jer zahtjeva manje energije, membrana i aktivni mulj nalaze se u istom spremniku. Kod eksternog modula, membrana i aktivni mulj su u zasebnim jedinicama [10, 27, 28].



Slika 3. Prikaz različitih modula MBR-a [29].

Tijekom posljednja dva desetljeća gotovo ukupan broj korištenja u industriji i u laboratorijima bile su izvedbe MBR sustava s uronjenim modulom u prisutnosti aeracijskog sustava (aerobni proces). Aeracija se također koristi za stvaranje turbulentnog strujanja duž membrane kako bi se bolje kontrolirao proces blokiranja membrana. Osim aerobnog procesa obje izvedbe mogu se primijeniti i kao anaerobni proces; bez aeracijskog sustava. Premda su više istraženi i primjenjivani aerobni MBR sustavi, anaerobni MBR sustavi učinkovitiji su kada je u pitanju dekolizacija, tj. uklanjanje bojila iz TOV-e [30].

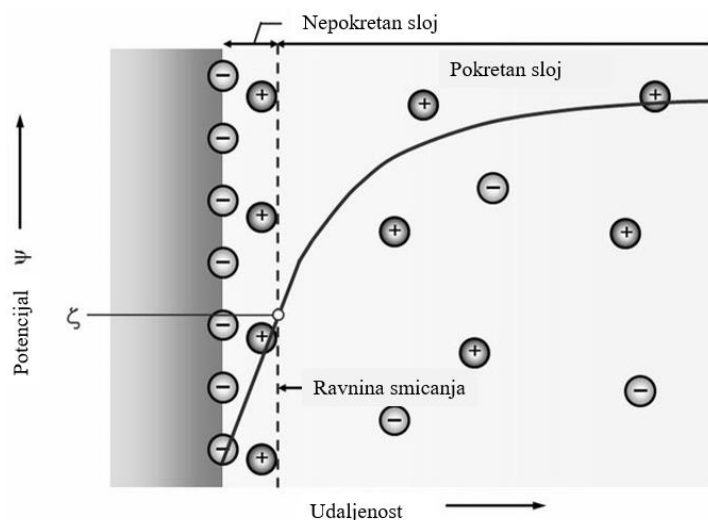
Prednosti MBR-a su ekonomski povoljna obrada, manja proizvodnja mulja, stalna kvaliteta permeata, potpuno uklanjanje mutnoće i suspendiranih tvari te visoki stupanj uklanjanja bojila i organskih onečišćivala. Stoga je MBR atraktivna opcija za obradu komunalnih i industrijskih otpadnih voda raznih industrija poput prehrambene, kemijske, farmaceutske, metalne, tekstilne i dr. Iako se po svim navedenim prednostima može primijetiti da je MBR vrlo prikladna tehnologija za obradu TOV-e, za veću kvalitetu permeata ipak je potrebno primijeniti hibridne membranske procese koji uključuju MBR kao predobradu UF i NF procesa te RO [31, 32].

2.4. Zeta potencijal

Koncept zeta potencijala temelji se na osnovnom modelu elektrokemijskog dvosloja (eng. *electrochemical double layer*) prikazanog na Slici 4. To je elektrokinetički potencijal koji predstavlja elektrostatske interakcije na međufazi kruto / tekuće i tekuće / plinovito. U dodiru

čvrste faze s vodenom otopinom čvrsta faza postaje površinski nabijena te privlači i veže ione suprotnog naboja čime uzrokuje distribuciju naboja na površini koja se razlikuje od raspodjele naboja u tekućoj fazi. Nastali površinski naboj posljedica je prvenstveno protonacije i deprotonacije površinskih funkcionalnih skupina te adsorpcije hidroksilnih (OH^-) i hidronijevih (H_3O^+) iona, a dalje stvara površinski potencijal čija vrijednost pada s povećanjem udaljenosti od čvrste površine.

U elektrokemijskom dvosloju razlikuju se nepokretni (unutarnji) i difuzni, pokretni (vanjski) sloj na čijoj granici radi hidrodinamičkog smicanja, tj. relativnog gibanja jednog sloja prema drugome, nastaje zeta potencijal koji može biti eksperimentalno izmjeren. Iz navedenog je jasno da se zeta potencijal mijenja u skladu s promjenama u otopini, što znači da je mjerenjem zeta potencijala moguće pratiti te promjene koje se događaju. Uvjeti u mediju koji utječu na zeta potencijal su pH - vrijednost i ionska jakost, pa će tako dodatkom lužina površina čvrste faze poprimiti negativniji naboj, a dodatkom kiselina pozitivniji [33, 34].



Slika 4. Prikaz elektrokemijskog dvosloja [35].

Osim praćenja naboja površine i raspodjele naboja na međufazi kruto - tekuće, zeta potencijal se može koristiti i kao pokazatelj za osjetljive interakcije između krute površine i otopljenih tvari u vodenoj otopini. Takvi procesi vrlo su važni u mokrim procesima u tekstilnoj industriji koji obuhvaćaju fenomene adsorpcije tenzida, polielektrolita i bojila. U ovim procesima elektrokinetički površinski naboj vlakana, kao i čvrstoća nastalih veza imaju važnu ulogu [36].

2.4.1. Zeta potencijal tekstilnih vlakana

Postoji niz principa mjerenja zeta potencijala koji uključuju elektroforezu, potencijal sedimentacije, elektroosmozu i dr. Metode struje strujanja i potencijala strujanja najčešće se koriste za mjerenje zeta potencijala vlakana, veličine kojom se karakteriziraju naboj površine i površinske funkcionalne skupine. Metodom struje / potencijala strujanja otopina elektrolita se potiskuje kroz kapilarni sustav u kojem čvrsta faza (tekstil) miruje, a tekuća faza (voda, kalijev klorid) je mobilna. Potencijal strujanja (U_p) nastaje radi gibanja iona, a ovisan je o razlici tlakova Δp i o zeta potencijalu (ζ) koji predstavlja krutu površinu prema jednadžbi (1):

$$dU_{str}(\text{mV}) = \zeta * \frac{\varepsilon * \varepsilon_0}{\eta * \kappa_B} * d\Delta p, \quad (1)$$

gdje je ε_0 - permitivnost vakuuma, ε - dielektrična konstanta, η - viskoznost vode, κ_B - elektrovodljivost vodene otopine [37].

Zeta potencijal vlakana nije konstantna vrijednost, ali daje informacije o prirodi i disocijaciji funkcionalnih grupa, hidrofilnosti, hidrofobnosti površine, kao i adsorpciji iona i/ili molekula vode. Na svojstva sorpcije utječu kemijska struktura vlakana, broj dostupnih funkcionalnih skupina (hidroksi, karboksi, sulfatne i amino skupine), stupanj kristalnosti te udio amorfni područja gdje se odvijaju procesi adsorpcije.

Uronjena u vodu (pH 6,50- 7,00), celulozna tekstilna vlakna poprimaju negativne vrijednosti zeta potencijala jer funkcionalne skupine disociraju stvarajući anione. Povećanjem pH - vrijednosti, vrijednosti zeta potencijala postaju negativnije te variraju u rasponu od -10 do -60 mV ovisno o kemijskom sastavu vlakana, mikrostrukтури, poroznosti, kapacitetu bubrenja itd. Također važno je znati kako zeta potencijal ovisi i o nečistoćama koje sadrže vlakna te dodanim tvarima tijekom mokrih procesa. Promjena broja dostupnih površinskih funkcionalnih skupina vlakana tretmanima poput bojadisanja i završnih obrada procesa tekstilne industrije, uzrokuje promjenu raspodjele površinskog naboja, elektrokemijskog dvosloja te time i vrijednosti zeta potencijala. Na taj način može se odrediti učinkovitost procesa modifikacije površine [33, 36].

2.5. Literaturni pregled

Yang i sur. (2020) [38] obrađivali su realnu TOV-u pomoću aerobnog MBR reaktora s UF membranom u svome istraživanju. Učinkovitost obrade određivali su analizom parametara poput pH - vrijednosti, KPK, TSS i obojenja. Nakon obrade dobiveno je značajno smanjenje obojenja, za 80,0 %, KPK za 91,0 % i TSS za 99,6 %. Istraživanjem su pokazali učinkovitost i stabilnost MBR procesa za obradu TOV-e te da je membranska separacija atraktivna metoda za značajno zadržavanje suspendiranih i koloidnih čestica.

Yun i sur. (2006) [39] proveli su istraživanje obrade sintetske TOV-e aerobnim MBR-om s uronjenom membranom šupljikavih vlakana. Prosječno smanjenje vrijednosti KPK bilo je za 94,8 % ($\pm 2,0$), a obojenja za 72,9 % ($\pm 3,5$). Poznato je da se sintetska bojila ne mogu aerobno razgraditi stoga smanjenje obojenja posljedica je adsorpcije molekula bojila na mikrobnе stanice.

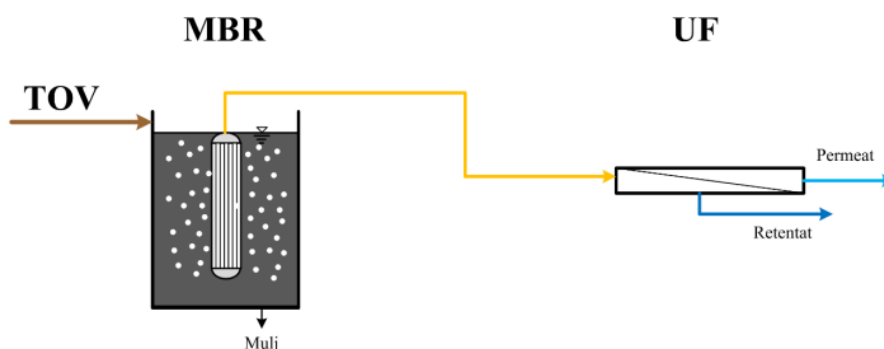
Buscio i sur. (2015) [40] istražili su učinkovitost pročišćavanja sintetski pripremljene obojene TOV-e UF procesom koristeći poliviniliden fluorid (PVDF) membranu modula izvedenog u obliku šupljih vlakana. Nakon obrade, dobiveni permeat korišten je u svrhu bojadisanja uzorka tekstila te se kvaliteta obojenja usporedila s uzorkom tekstila bojadisanim u vodovodnoj vodi. Nakon provedbe UF procesa dobiveno smanjenje vrijednosti KPK iznosilo je 90,0 %, a obojenja 96,0 %. Prema rezultatima bojadisanja, obojenje izvedeno s permeatom pokazalo je slične karakteristike obojenju izvedenim s vodovodnom vodom. Ukupna razlika u boji uzoraka (ΔE) bila je < 1 te je istraživanje zadovoljilo prihvatljivu vrijednost za tekstil.

Istraživanje temeljeno na mjerenju zeta potencijala obojenih uzoraka pletiva s ciljem određivanja učinkovitosti obojenja, do sada nije objavljeno, te je prvi put ispitano u ovome radu.

3. Eksperimentalni dio

3.1. Uzorak tekstilne otpadne vode

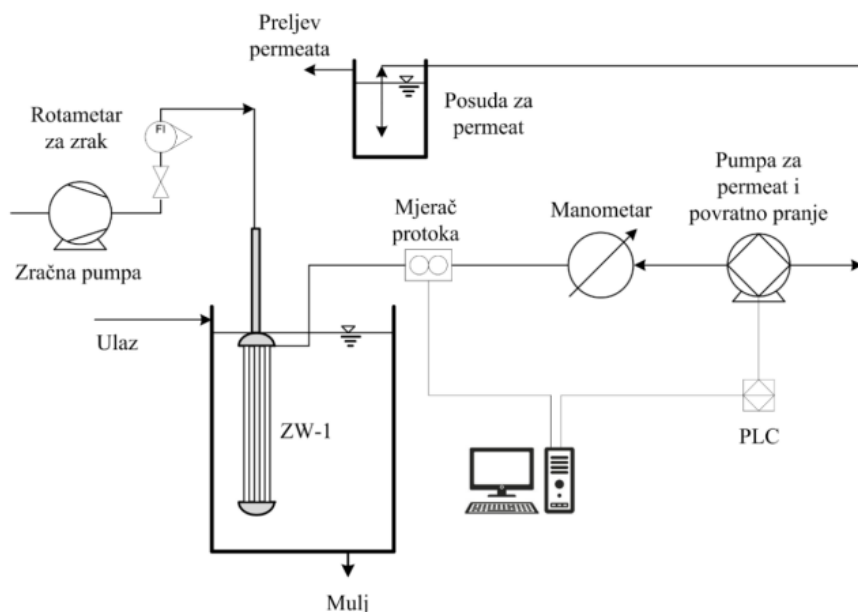
U ovom radu obrađivao se uzorak realne otpadne vode iz tekstilne industrije Galeb d.d. u Omišu koja je jedna od najznačajnijih proizvođača trikotaže u Hrvatskoj. TOV je obrađena MBR procesom u svrhu dobivanja MBR permeata te dodatne obrade membranskim UF procesom. Shema hibridnog postupka pročišćavanja TOV-e prikazana je na Slici 5.



Slika 5. Shema hibridnog postupka pročišćavanja TOV-e.

3.2. MBR uređaj

Korišten je MBR uređaj, prikazan na Slici 6, radnog volumena reaktora 5 L. Radi osiguravanja konstantnog volumena reaktora uređaj sadrži senzor za razinu vode, a također i senzore za protok, temperaturu i tlak. U reaktor radnog volumena 5 L uronjena je UF membrana, model ZeeWeed 1 (ZW-1), proizvođača GE Water & Process Technologies (Mađarska), čije su karakteristike navedene u Tablici 1. Primjenom vakuuma s unutrašnje strane membrane, površine 0,046 m² i nominalne veličine pora 0,02 μm, postiže se tok otpadne vode iz bioreaktora koja prolazi kroz membranu sa šupljikavim vlaknima, tj. izvana - unutra (eng. *outside – inside*) čime dolazi do obrade takove vode. Obradena voda izlazi iz membrane čime dobivamo permeat. Alpha Programming 12 (SW0D5-ALVLS-EU) sustavom (Mitsubishi Electric Corporation, Japan) prikupljani su prethodno navedeni podatci i kontroliran je rad MBR-a. Eksperimentalni uvjeti rada MBR-a prikazani su u Tablici 2.



Slika 6. Shema laboratorijskog MBR uređaja.

Tablica 1. Nazivne karakteristike ZW-1 membrane.

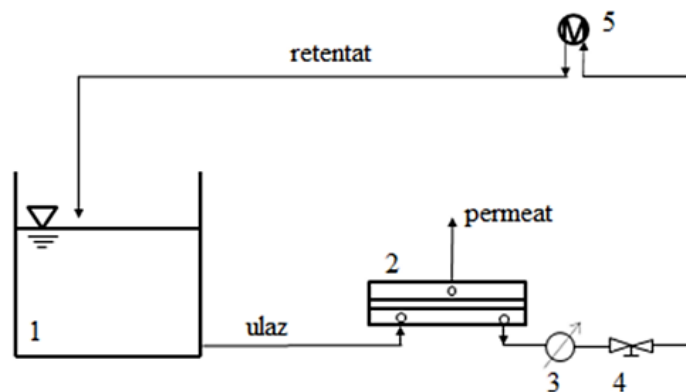
Radni tlak, kPa	10 – 50
Maksimalna radna i temperatura čišćenja, °C	40
Dozvoljena pH – vrijednost	5 – 9
Nazivna veličina pora, μm	0,02
Dozvoljena pH - vrijednost prilikom čišćenja	2,0 – 10,5
Maksimum izloženosti OCl⁻, mg L⁻¹	1000
Dozvoljeni fluks, m³ dan⁻¹	55 – 110
Materijal	Poli(viniliden-fluorid)
MWCO, Da	200 000
Ukupna površina, m²	0,046

Tablica 2. Eksperimentalni uvjeti rada MBR-a.

Transmembranski tlak, bar	-0,2
Fluks permeata, L m⁻² h⁻¹	12,12 ± 3,51
Vrijeme zadržavanja, h	7 – 12
Koncentracija mulja, g L⁻¹	12,92 ± 1,57
Brzina upuhivanja zraka, L min⁻¹	15

3.3. UF uređaj

Nakon dobivenog MBR permeata uslijedila je obrada istog na UF laboratorijskom uređaju, prikazanom na Slici 7. Uređaj se sastoji od Sepa II ćelije (Sterlitech corporation, SAD) s ukriženim tokom, Hydracell DO3SASGSSSCA pumpe (Wanner Engineering Inc., Minneapolis, MN, SAD). Površina upotrijebljene membrane komercijalnog naziva GH, u obliku ravne ploče, proizvođača Suez Water & Process Technologies (Nizozemska), iznosila je 138 cm². Karakteristike GH membrane definirane od strane proizvođača navedene su u Tablici 3. Membrana je prvo isprana, bez primjene tlaka, s 3 L demineralizirane vode kako bi se uklonio konzervans. Drugi korak bio je stabilizacija protoka pri radnom tlaku od 10 bar. Zatim je slijedila obrada MBR permeata koja se odvijala pri tlaku od 10 bar, u vremenskom periodu od 6 h, dok se nije skupilo 3 L UF permeata koji se koristio za bojadisanje pletiva. Nakon završene obrade MBR permeata slijedilo je pranje membrane demineraliziranom vodom u trajanju od 30 min. Tijekom procesa obrade UF-om, retentat se vraćao u spremnik ulazne otopine (recirkulirao), a protok se pratio pomoću tehničke vage KERN 440-35A (Njemačka) koja je spojena sa stolnim računalom koje je bilježilo masu svakih 10 sekundi.



- 1 – spremnik ulazne otopine, 2 – membranska ćelija
 3 – manometar, 4 – regulator tlaka
 5 – izmjenjivač topline

Slika 7. Shematski prikaz laboratorijskog UF uređaja.

Tablica 3. Karakteristike GH-membrane.

Materijal	Poliamid
MWCO, Da	2000
Maksimalni radni tlak, bar	27
Dopušteni pH	1 – 11
Tipičan fluks / tlak, L m ⁻² h ⁻¹ / bar	34,0 / 10

3.4. Fizikalno - kemijske analize

Uzorci MBR permeata, UF permeata, vodovodne vode i obojene vodovodne vode ispitivani su sljedećim analizama:

1. Turbidimetrom WTW Turb 430 IR/Set (Njemačka) određivala se mutnoća (NTU).
2. Multimetrom SI Analytics HandyLab 680 (Njemačka) određivala se električna provodnost ($\mu\text{S cm}^{-1}$) i pH - vrijednost.

3. Vrijednosti kemijske potrošnje kisika, KPK, ($\text{mg O}_2 \text{ L}^{-1}$) i obojenja vode koje je izraženo spektralnim koeficijentom apsorpcije DFZ (njem. *DurchsichtsfarbZahl*) pri tri valne duljine, 436, 525, 620 nm, analizirane su spektrofotometrom Hach Lange DR3900 (Njemačka). Obojenje je određeno za svaki uzorak pri tri valne duljine prema standardu DIN-38404/1, te se DFZ (m^{-1}) računao prema formuli (2):

$$\text{DFZ } (\text{m}^{-1}) = \frac{100 * E(\lambda)}{2d} \quad (2)$$

u kojoj $E(\lambda)$ predstavlja apsorpciju mjerenu pri 436 nm, 525 nm i 620 nm, a d debljinu kivete (mm) [41].

Određivanje KPK provodilo se tako da je u primijenjene testne kivete LCK 514 ($100\text{-}2000 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$) i LCK 1414 ($5\text{-}60 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$), u kojima je prisutan reagens namijenjen za digestiju, dodano 2 mL uzorka nakon čega su zatvorene i homogenizirane. Testne kivete stavljene su u termostat HT 200S (Hach Lange, Njemačka) gdje se 15 min provodila digestija pri temperaturi od $170 \text{ }^\circ\text{C}$. Nakon 15 min kivete su izvađene iz termostata, dobro homogenizirane i stavljene na hlađenje pri sobnoj temperaturi prije nego se odredila KPK vrijednost navedenim spektrofotometrom.

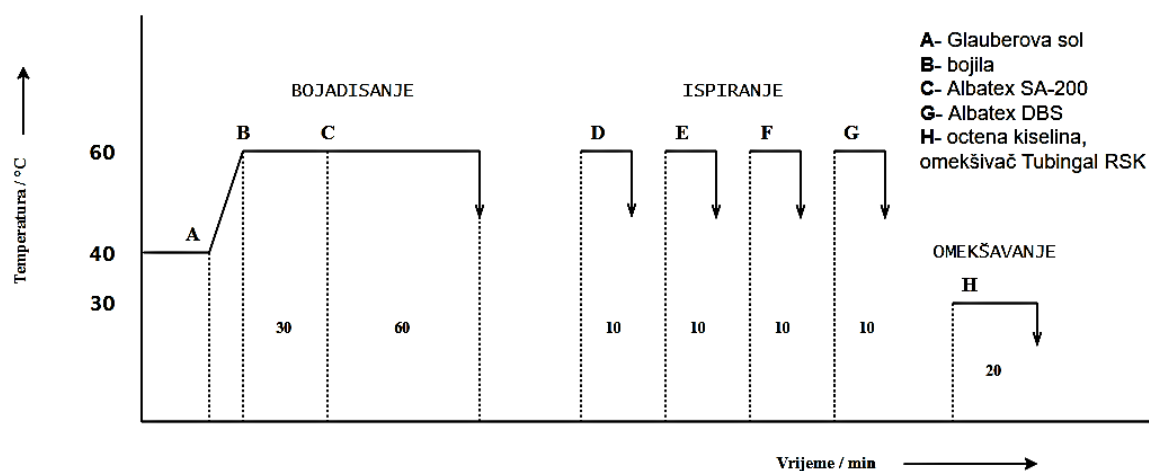
Uređaj Shimadzu TOC-Vws (Japan) koristio se za određivanje masene koncentracije ukupnog ugljika TC-a (mg C L^{-1}) i ukupnog anorganskog ugljika IC-a (mg C L^{-1}). Vrijednosti TOC-a (mg C L^{-1}) izračunate su prema formuli (3):

$$\text{TOC } (\text{mg C L}^{-1}) = \text{TC} - \text{IC} \quad (3)$$

3.5. Proces bojadisanja pletiva

U postupku bojadisanja pletiva, koristila su se dva uzorka pletiva i bojadisala s UF permeatom te vodovodnom vodom kao standardom s obzirom da se ona koristi u tvornici Galeb d.d za istu namjenu. Na Slici 8 prikazana je shema procesa bojadisanja, a postupak je sljedeći:

- 1) Uzorci pletiva su izvagani. Masa oba uzorka bila je 20,00 g. Omjer izvaganog pletiva i dodane vodovodne vode / UF permeata iznosio je 1:10 (200 mL korištene vode).
- 2) Vodovodna voda / UF permeat zagrijani su do temperature od 40 °C, na kojoj je dodano 80 g L⁻¹ Glauberove soli.
- 3) Vodovodna voda / UF permeat zagrijani su do temperature od 60 °C, nakon čega su dodani pletivo i bojila. Koristila su se sljedeća bojila: 1,4 % AVITERA yellow (Huntsmann, SAD) i 3,7 % AVITERA red (Huntsmann, SAD). Nakon 30 min dodano je pomoćno doradno sredstvo: fiksator, ALBATEX SA-200 (Huntsmann, SAD). Zatim je uslijedila cirkulacija uzorka koja je trajala 1 h, nakon čega je otopina za bojadisanje bačena.
- 4) Nanovo je dodana ista količina vodovodne vode / UF permeata te je zagrijano do temperature od 60 °C. Uzorci su miješani u trajanju od 10 min. Postupak je ponovljen tri puta.
- 5) Ponovo je dodana vodovodna voda / UF permeat koji su zagrijani na temperaturi do 60 °C. Dodano je 6,5 g L⁻¹ pomoćnog doradnog sredstva ALBATEX DBS (Huntsman, SAD). Otopina je bačena nakon 10 min cirkulacije.
- 6) U sljedeću vodovodnu vodu / UF permeat koji su se ugrijali na temperaturi od 30 °C dodano je 1 mL L⁻¹ octene kiseline i omekšivač TUBINGAL RSK (CHT), 4 % od količine pletiva. Nakon 20 min voda je bačena.
- 7) Nakon tih provedenih faza pletivo se stavilo u sušionik na 150 °C dok se nije osušilo.



Slika 8. Shema procesa bojadisanja pletiva UF permeatom i vodovodnom vodom.

3.6. Mjerenje zeta potencijala

Mjerenja zeta potencijala uzoraka pletiva provedena su na instrumentu SurPASS tvrtke Anton Paar GmbH (Austrija), čije su tehničke značajke navedene u Tablici 4. SurPASS je elektrokinetički analizator za određivanje zeta potencijala (ζ [mV]) makroskopskih krutih površina na principu mjerenja potencijala strujanja u ćeliji cilindričnog oblika prilagođenoj za mjerenje tekstilnih vlakana. Mjerenja su se provodila na uzorcima bijelog, neobojenog, pletiva koji je služio kao standard (BS), crveno obojenog pletiva u vodovodnoj vodi (CV) i crveno obojenog pletiva u UF permeatu (CP) te se određivala ovisnost površinskog naboja o pH - vrijednosti otopine elektrolita ($0,001 \text{ mol L}^{-1} \text{ KCl}$), a pH - vrijednost se podešavala do maksimalne vrijednosti 9 s razrijeđenom NaOH lužinom i smanjivala se postepeno dodavanjem razrijeđene HCl kiseline, koncentracije $0,05 - 0,1 \text{ mol L}^{-1}$, u mjernu otopinu.

Tablica 4. Tehničke značajke SurPASS instrumenta.

Potencijal strujanja, mV	-2000 – +2000
Struja strujanja, μA	-200 – +200
Otpor ćelije, Ω ($\text{M}\Omega$)	5 – 20
Diferencijalni pritisak, mbar	-1000 – +1000
Brzina protoka, mL min^{-1}	10 – 300

3.7. Spektrofotometrijska analiza obojenih uzoraka pletiva

U svrhu određivanja kolorističkih parametara koristio se spektrofotometar Datacolor, model Datacolor 850 (Švicarska). Uređaj omogućuje mjerenje spektralnih vrijednosti obojenih i neobojenih površina te izračunavanje vrijednosti spektralnih karakteristika prema CIELAB i/ili CMC sustavima za izračunavanje ukupne razlike u boji. Analizirani uzorci su uzorak CV koji predstavlja standard i uzorak CP, a analizirani koloristički parametri te njihove razlike su L^* za svjetlinu boje, C^* za zasićenost, H^* za ton boje koji izražava dubinu boje pletiva, K / S vrijednost povezana s koncentracijom bojila.

Određivani su i parametri ΔE – ukupna razlika u boji te a^* (pozitivna vrijednost – uzorak je crven, negativna – uzorak je zelen) i b^* (pozitivna vrijednost – uzorak je žut, negativna – uzorak je plav) [42]. Uzorci su mjereni na 5 mjesta te su vrijednosti prikazane kao srednja vrijednost zasebnih mjerenja.

4. Rezultati i rasprava

U provedenom istraživanju, u svrhu uporabe TOV-e za proces bojadisanja, obrađen je uzorak MBR permeata UF procesom te su analizirani jedni od važnijih fizikalno - kemijskih parametara. Kvaliteta obojenja ispitana je mjerenjem zeta potencijala i spektrofotometrijskom analizom uzoraka pletiva.

4.1. Fizikalno - kemijski parametri MBR permeata

U svrhu uporabe za proces bojadisanja prvi korak bio je obrada realnog uzorka TOV-e MBR-om. MBR se pokazao učinkovit kod uklanjanja organskih tvari koje utječu na povećanje KPK i suspendiranih čestica koje utječu na povećanje mutnoće, dok je slabiju učinkovitost pokazao kod uklanjanja soli i obojenja koji su jedni od bitnijih karakteristika kod provjere kvalitete otpadne vode korištene za uporabu u mokrim procesima tekstilne industrije [28, 43]. Dobiveni parametri MBR permeata, prikazani u Tablici 5 te grafički na Slikama od 9 do 12, ukazuju na povišene vrijednosti KPK ($283,0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$), κ ($2,90 \text{ mS cm}^{-1}$), TOC ($96,1 \text{ mg L}^{-1}$), mutnoće (2,11 NTU) te obojenja, koje je analizirano pri tri valne duljine. Ukupno obojenje, DFZ (436, 525 i 620 nm), iznosi 139 m^{-1} . S obzirom na povišene vrijednosti parametara potrebna je dodatna UF obrada kako bi se dobio kvalitetniji permeat namijenjen za uporabu u mokrim procesima [44], vodljivosti $0,8 \text{ mS cm}^{-1}$, bez prisutnog obojenja i organskih tvari [23]. Naknadna obrada s UF-om radi smanjenja obojenja, nakon MBR procesa, potvrđena je i u istraživanju *Roozi i sur.* (1999) [45].

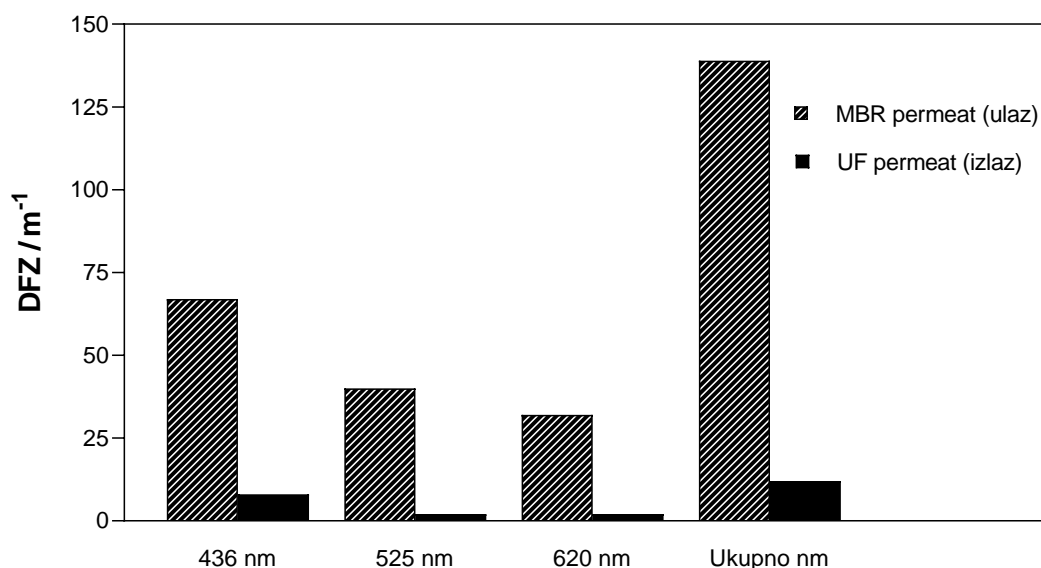
4.2. Fizikalno - kemijski parametri i faktor zadržavanja UF permeata

Drugi korak je obrada MBR permeata UF procesom. U Tablici 5 prikazana je neznatna promjena pH - vrijednosti s 8,42 na 8,43 te značajno smanjenje mutnoće za visokih 98,8 %, što predstavlja gotovo potpuno uklanjanje obradom UF-om. Veliko smanjenje mutnoće bilo je i za očekivati jer je korištena UF membrana učinkovita kod uklanjanja suspendiranih čestica i koloida koji uzrokuju zamućenost [22, 23]. Na grafičkom prikazu obojenja (Slika 9) također se

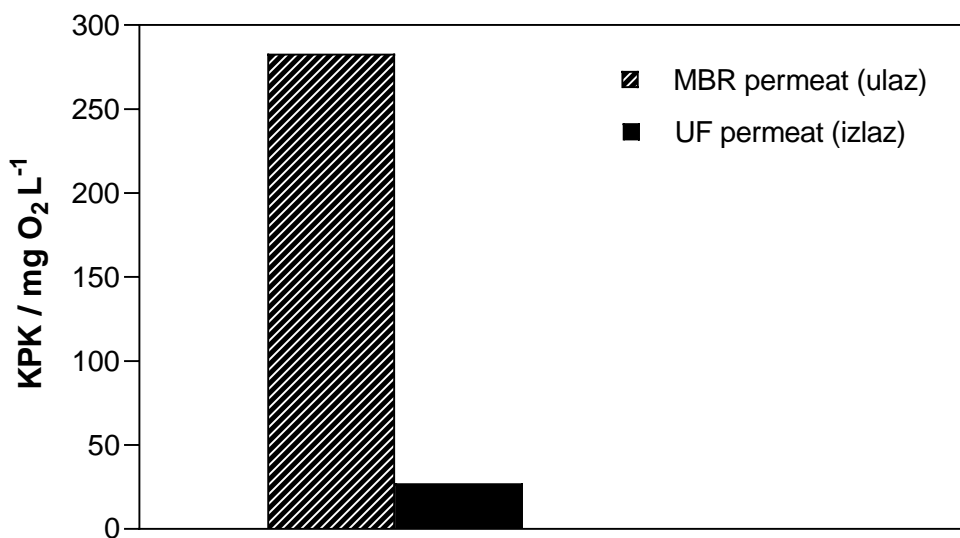
može primijetiti značajno smanjenje. Ukupno obojenje, DFZ, smanjeno je pri sve tri valne duljine (436, 525 i 620 nm) za 91,4 %. Slične rezultate za uklanjanje mutnoće i obojenja dobili su *Alcaina-Miranda i sur.* (2009) [46] u istraživanju UF membrana i njihove učinkovitosti obrade TOV-e. Grafički su prikazane i visoke vrijednosti KPK (Slika 10) koje potječu od korištenih sredstava kao što su octena kiselina, bojila, omekšivači, masti i ulja [47, 48]. Nakon UF procesa vrijednost KPK smanjena je za 90,4 %. Vrijednost TOC-a (Slika 11) smanjena je za 77,4 %, što je također zadovoljavajući postotak te to smanjenje prati već navedeno uspješno uklanjanje organskih tvari (KPK) iz MBR permeata. Najniži postotak smanjenja vodljivosti vidljiv je na grafičkom prikazu (Slika 12) gdje je vodljivost smanjena za 41,7 %. Takva dobivena vrijednost je očekivana jer se s UF membranom ne uklanjaju soli zbog velike MWCO vrijednosti. Dobiveni rezultati potvrđeni su istraživanjem *Aouni i sur.* (2012) [49] gdje je također dobivena najmanja učinkovitost kod smanjenja vodljivosti, u vrijednosti od 30,0 %.

Tablica 5. Fizikalno - kemijski parametri pH - vrijednosti i mutnoće MBR i UF permeata.

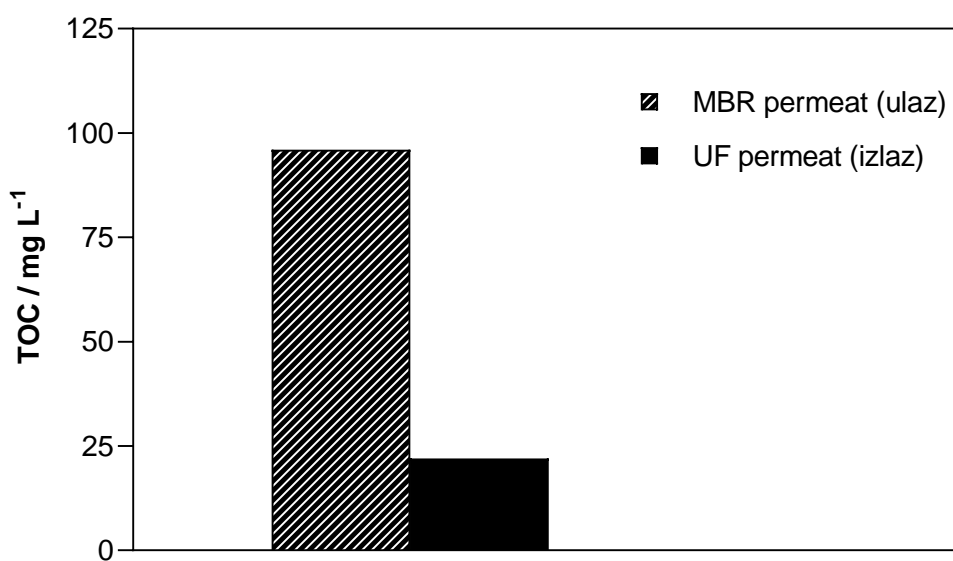
Parametar	MBR permeat (ulaz)	UF permeat (izlaz)
pH	8,42	8,43
Mutnoća, NTU	2,11	0,03



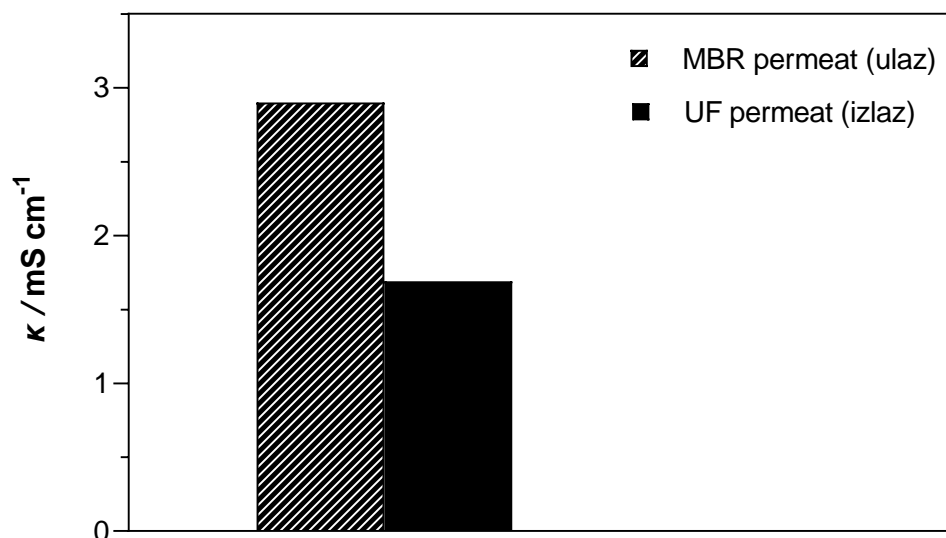
Slika 9. Grafički prikaz promjene vrijednosti obojenja UF procesom.



Slika 10. Grafički prikaz promjene KPK UF procesom.



Slika 11. Grafički prikaz promjene vrijednosti TOC-a UF procesom.



Slika 12. Grafički prikaz promjene vrijednosti κ UF procesom.

4.3. Ispitivanje vrijednosti fizikalno - kemijskih parametara u procesu bojadisanja

U Tablici 6 prikazane su vrijednosti fizikalno - kemijskih parametara vodovodne vode koja se koristila za proces bojadisanja uzorka pletiva te 5 uzoraka obojenih vodovodnih voda koji su izuzimani tijekom procesa bojadisanja i ispiranja pletiva.

U usporedbi s neobojenom vodovodnom vodom, kao standardom u procesu bojadisanja, kod 1. uzorka obojene vodovodne vode KPK se značajno povećao s 2,16 na 3940 mg O₂ L⁻¹, a pH - vrijednost sa 7,13 na > 14, čemu je uzrok dodatak pomoćne tvari ALBATEX SA-200 koji predstavlja puferiranu lužinu. Također, vidljivo je povećanje κ s 0,67 na 76,40 mS cm⁻¹ i mutnoće s 0,79 NTU na 9,64 NTU. Ukupno obojenje, DFZ, 1. i 2. izuzetog uzorka obojene vodovodne vode nije se moglo izmjeriti s obzirom da je bilo izvan mjernog područja uređaja (> 3500 m⁻¹). Manje vrijednosti, ali svakako izrazito visoke s obzirom na vodu koja ulazi u sami proces, navedene su u istraživanju *Khan i Malik (2013) [1]* za neke od parametara nakon bojadisanja tekstila (KPK od 5000 do 6000 mg O₂ L⁻¹, pH - vrijednost 9, suspendirane krute tvari koje uzrokuju замуćenje iznosile su 2000 mg L⁻¹ i ukupno otopljene tvari, anorganske soli, 52000 mg L⁻¹).

Nakon bojadisanja te izuzetog 1. uzorka, slijedilo je ispiranje pletiva u vodi, kako bi se uklonio prisutan višak bojila, i izuzimanje uzoraka od 2. do 5. obojene vodovodne vode. Može se uočiti

kako se vrijednosti parametara smanjuju od 2. uzorka obojene vodovodne vode pa sve do 4. uzorka. KPK se kreće u rasponu od 1178 do 358 mg O₂ L⁻¹, pH - vrijednost se smanjila s > 14 na 8, vrijednosti vodljivosti u rasponu su od 25,00 do 1,50 mS cm⁻¹. Ukupno obojenje, DFZ (436, 525, 620 nm) smanjilo se s > 3500 na 2851 m⁻¹, dok dobivene vrijednosti mutnoće nemaju pravilan trend rasta ili smanjenja tijekom procesa bojadisanja pletiva. Uzrok tome može biti visoka koncentracija bojila u izuzetim uzorcima koja ometa analizu mutnoće [50, 51]. Kod uzorka 5, obojene vodovodne vode radi dodatka octene kiseline i omekšivača, što je opisano u procesu bojadisanja pletiva, dolazi do znatnog povećanja KPK na 15600 mg O₂ L⁻¹, pH - vrijednost se očekivano značajno smanjila na 4,81, a mutnoća povećala na 388 NTU. Također, vrijednosti vodljivosti i obojenja su se smanjile s obzirom na to da nije dodana sol niti bojilo u zadnju korištenu vodu prije sušenja uzorka pletiva. Ove vrijednosti potvrđene su na temelju već navedenog istraživanja *Khan i Malik* (2013) [1] u kojem vode za ispiranje sadrže vrijednost KPK u rasponu od 400 do 860 mg O₂ L⁻¹, pH - vrijednost 8 i ukupne otopljene tvari, anorganske soli, 3200 mg L⁻¹.

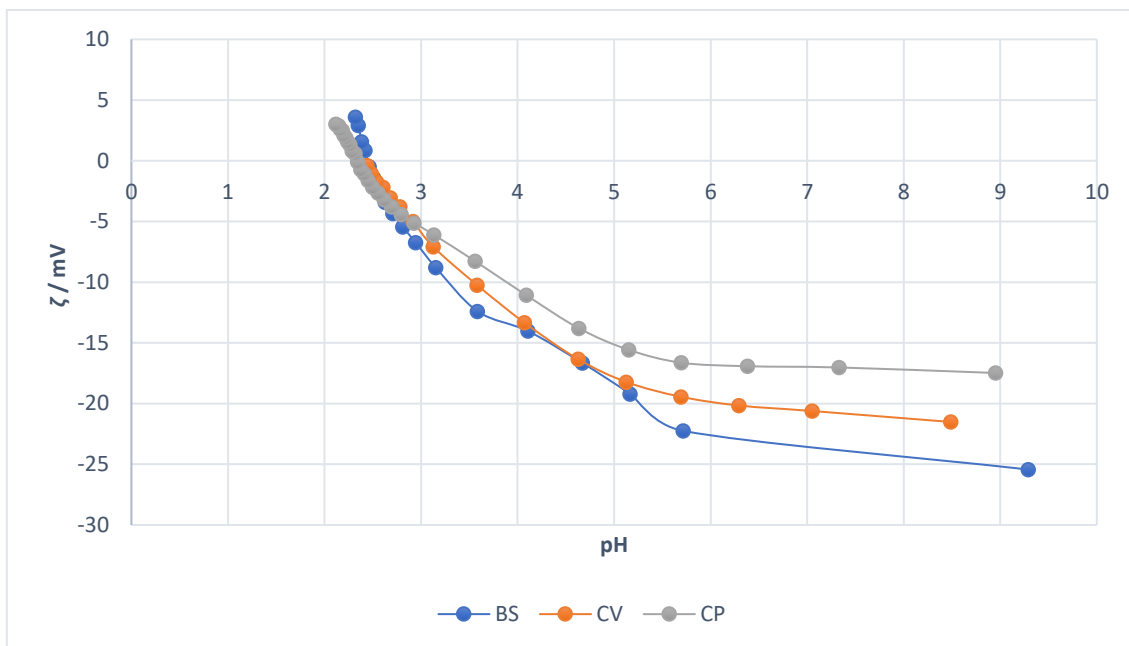
Tablica 6. Fizikalno - kemijski parametri vodovodne vode i obojenih vodovodnih voda.

Parametar	Vodovodna voda	Obojena vodovodna voda (oznaka uzorka)					
		1	2	3	4	5	
KPK, mg O ₂ L ⁻¹	<5	3940	1178	369,0	358,0	15600	
pH	7,13	>14	>14	9,29	8,02	4,81	
κ, mS cm ⁻¹	0,67	76,40	25,00	5,53	1,50	1,03	
TOC, mg L ⁻¹	9,3	/	/	/	/	/	
Mutnoća, NTU	0,79	9,64	93,86	39,48	55,36	388	
DFZ / m ⁻¹	436 nm	0	-	-	2544	1594	1129
	525 nm	0	-	-	2229	1160	698
	620 nm	0	1904	358	125	97	304
	Ukupno	0	>3500	>3500	4898	2851	2130

(/) nije mjereno zbog obojenosti uzorka, (-) uređaj nije mogao izmjeriti vrijednosti

4.4. Vrijednosti zeta potencijala uzoraka pletiva

Elektrostatske interakcije između površine materijala i tvari u vodenim otopinama imaju važnu ulogu u procesima obrade tekstilnih materijala kao što je i bojadisanje [33]. Mjerenjem potencijala strujanja određen je zeta potencijal vlakana pomoću kojeg je proučavana reakcija između korištenih reaktivnih bojila i pletiva te utvrđena postojanost i kvaliteta obojenog pletiva. Na Slici 13 prikazani su dobiveni rezultati zeta potencijala, u pH rasponu od 2 do 9, uzoraka pamučnog pletiva. U kontaktu s vodenom otopinom bojila, površina pletiva poprima negativni naboj te time i negativne vrijednosti zeta potencijala radi prisutnih hidroksilnih (-OH) i karboksilnih (-COOH) funkcionalnih površinskih skupina sklonih disocijaciji [33, 36]. Može se primijetiti da povećanjem pH - vrijednosti vodene otopine elektrolita zeta potencijal poprima negativnije vrijednosti što definira i teorija elektrokinetičkog potencijala [52]. Plava linija koja prikazuje standard BS pri pH 9 doseže najnegativniju vrijednost zeta potencijala vlakana u iznosu od -25,0 mV. Sljedeća dva obojena uzorka pletiva, CV i CP, dosežu pozitivnije vrijednosti zeta potencijala, -21,5 mV i -17,5 mV. Razlog smanjenih vrijednosti zeta potencijala su stvorene kovalentne veze između molekula reaktivnih bojila i površinskih funkcionalnih skupina pletiva te je time onemogućena njihova disocijacija i doprinos negativnom površinskom naboju te time i zeta potencijalu uzoraka pletiva. Smanjenje vrijednosti zeta potencijala proporcionalno je količini adsorbiranog bojila na pletivu [53]. Vrijednosti zeta potencijala uzorka CV bliže su vrijednostima standarda što znači da je došlo do manjeg vezanja bojila u odnosu na uzorak CP, što je također potvrđeno i spektrofotometrijskom analizom obojenih uzoraka pletiva. Iz dobivenih rezultata može se zaključiti kako je učinkovitije obojenje pletiva dobiveno s obrađenom TOV-om, točnije korištenim UF permeatom.



Slika 13. Grafički prikaz ovisnosti zeta potencijala (ζ) o pH - vrijednosti uzoraka pletiva.

4.5. Vrijednosti spektrofometrijske analize uzoraka obojenog pletiva

U Tablici 7 prikazane su dobivene pojedinačne vrijednosti kolorističkih parametara analiziranih uzoraka pletiva, a u Tablici 8 razlike pojedinačnih parametara iz kojih možemo zaključiti kako su razlike u svjetlini, zasićenosti i tonu boje između CV i CP uzoraka minimalne. Također dobivena vrijednost Δa^* iznosi 0,04 što ukazuje na to da je uzorak CP crveniji od standarda, a vrijednost Δb^* koja iznosi 0,08 ukazuje na žući uzorak od standarda. Vrijednosti ΔE mogu se pojaviti u intervalu od 0 do 100 gdje 0 predstavlja minimalnu, a 100 potpunu razliku u boji. Prihvatljiva vrijednost ΔE za tekstil je 1 – 2, stoga ako je vrijednost $\Delta E \leq 1$, to znači da nije vidljiva razlika u boji ljudskom oku, a ako se ΔE vrijednost nalazi između 1 i 2 to znači da je razlika vidljiva pažljivim promatranjem od strane promatrača [54]. Dobivena vrijednost ΔE iznosi 1,23. Prema dobivenim vrijednostima K / S može se zaključiti kako je veća koncentracija bojila kod uzorka obojenog UF permeatom, $\Delta K / S$, što se podudara s rezultatima dobivenim mjerenjem zeta potencijala.

Tablica 7. Vrijednosti kolorističkih parametara spektrofometrijske analize.

Uzorak	L^*	C^*	H^*	a^*	b^*	K / S
CV	39,78	62,70	38,52	48,82	39,11	15,96
CP	38,55	62,78	38,56	48,86	39,20	18,17

Tablica 8. Ukupne razlike kolorističkih parametara spektrofometrijske analize.

ΔL	-1,23
ΔC	0,09
ΔH	0,04
Δa^*	0,04
Δb^*	0,08
$\Delta K / S$	2,21
ΔE	1,23

5. Zaključak

Cilj ovog rada bio je uporaba TOV-e u svrhu procesa bojadisanja te ispitivanje efikasnosti bojadisanja mjerenjem zeta potencijala i provedbom spektrofotometrijske analize. Obrađen je uzorak MBR permeata, tj. obrađene TOV-e, UF procesom, a kvaliteta MBR i UF permeata određena je analizom fizikalno - kemijskih parametara. Također, tijekom procesa bojadisanja praćene su promjene vrijednosti fizikalno - kemijskih parametara obojenih vodovodnih voda. Iz dobivenih rezultata provedenog istraživanja može se zaključiti sljedeće:

1. Na temelju dobivenih povišenih vrijednosti fizikalno - kemijskih parametara MBR permeata, KPK ($283,0 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$), κ ($2,90 \text{ mS cm}^{-1}$), TOC ($96,1 \text{ mg L}^{-1}$), mutnoća ($2,11 \text{ NTU}$) i obojenje (139 m^{-1}), bila je potrebna daljnja obrada UF procesom u svrhu dobivanja kvalitetnijeg permeata namijenjenog uporabi u mokrim procesima tekstilne industrije.
2. Ultrafiltracijom je uočeno značajno smanjenje mutnoće, za 98,8 %, ukupnog obojenja, za 91,4 % i KPK, za 90,4 %. Također, vrijednost TOC-a smanjena je za 77,4 %, a najniži postotak smanjenja dobiven je kod κ ,provodnosti, koja je smanjena za 41,7 %.
3. Rezultati dobiveni mjerenjem zeta potencijala uzoraka pletiva iznose $-25,0 \text{ mV}$ za standard, $-21,5 \text{ mV}$ za pletivo obojeno vodovodnom vodom i $-17,5 \text{ mV}$ za pletivo obojeno UF permeatom te su ukazali na učinkovitije obojenje uzorka obojenog UF permeatom, što je potvrđeno i spektrofotometrijskom analizom. Iz dobivenih vrijednosti kolorističkih parametara može se zaključiti kako je veća koncentracija bojila na uzorku obojenom UF permeatom u usporedbi sa standardom te da je ukupna razlika u boji uzoraka zadovoljavajuća.
4. Na temelju navedenog može se zaključiti kako su provedeni membranski procesi pogodni za uporabu TOV-e u svrhu procesa bojadisanja.

6. Popis simbola i kratica

Simboli

A – površina [m^2]

c – molarna ili množinska koncentracija [mol L^{-1}]

d – debljina kivete [mm]

$E(\lambda)$ – apsorbancija pri valnoj duljini λ

I – struja [A]

J – fluks [$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$]

p – tlak [Pa]

pH – negativni logaritam koncentracije vodikovih iona

R – faktor zadržavanja [%]

R – električni otpor [Ω]

t – vrijeme [h]

T – temperatura [$^{\circ}\text{C}$]

U_p – potencijal strujanja [mV]

γ – masena koncentracija [mg L^{-1}]

Δa^* – razlika crveno/zeleno

Δb^* – razlika plavo/žuto

ΔC – razlika zasićenja boje

Δc – razlika koncentracija

ΔE – razlika električnih potencijala

ΔE_{ab} – ukupna razlika u boji

ΔH – razlika tona boje

$\Delta K / S$ – razlika u koncentraciji bojila

ΔL – razlika svjetline boje

Δp – razlika tlakova

ΔT – razlika temperatura

ε – dielektrična konstanta [$F m^{-1}$]

ε_0 – permitivnost vakuuma [$F m^{-1}$]

ζ – zeta potencijal [mV]

η – viskoznost vode [Pa s]

κ – električna provodnost [$\mu S cm^{-1}$]

κ_B – elektrovodljivost vodene otopine [$\mu S cm^{-1}$]

λ – valna duljina [nm]

Kratice

BPK₅ – biokemijska potrošnja kisika unutar 5 dana, [$mg L^{-1}$]

DFZ – spektralni koeficijent apsorpcije (njem. *DurchsichtsFarbZahl*) [m^{-1}]

IC – anorganski ugljik (eng. *Inorganic Carbon*) [$mg L^{-1}$]

KPK – kemijska potrošnja kisika, [$mg L^{-1}$]

MBR – membranski bioreaktor

MF – mikrofiltracija

MWCO – granična molekulska masa (eng. *Molecular Weight Cut-Off*) [Da]

NF – nanofiltracija

NTU – nefelometrijska turbidimetrijska jedinica za mutnoću (eng. *Nephelometric Turbidity Unit*)

nPE – polietilen

PVDF – poliviniliden fluorid

RO – reverzna osmoza

TC – ukupni ugljik (eng. *Total Carbon*) [mg L⁻¹]

TDS - ukupne otopljene tvari (eng. *Total Dissolved Solids*) [mg L⁻¹]

TOC – ukupni organski ugljik (eng. *Total Organic Carbon*) [mg L⁻¹]

TOV – tekstilna otpadna voda

TSS – ukupne suspendirane tvari (eng. *Total Suspended Solid*) [mg L⁻¹]

UF – ultrafiltracija

ZW-1 – ime modula ZeeWeed 1

7. Literatura

- [1] Khan, S., Malik, A., Environmental and health effects of textile industry wastewater, u: Malik A., Grohmann E., Akhtar R., Environmental deterioration and human health, Dordrecht, Springer, (2014) 55-71.
- [2] Sadr, S. M., Saroj, D. P., Membrane technologies for municipal wastewater treatment, u: Basile, A., Cassano, A., Rastogi, N., K., Advances in membrane technologies for water treatment, Woodhead Publishing, (2015) 443-463.
- [3] Buscio, V., Crespi, M., Gutiérrez-Bouzán, C., Application of PVDF ultrafiltration membranes to treat and reuse textile wastewater. Desalination and Water Treatment, **57**(18) (2016), 8090-8096.
- [4] Uddin, F., Introductory chapter: textile manufacturing processes, u: Uddin, F., Textile manufacturing processes, IntechOpen, (2019) 1-14.
- [5] Ghaly, A. E., Ananthashankar, R., Alhattab, M. V. V. R., Ramakrishnan, V. V., Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review. Journal of Chemical Engineering and Process Technology, **5**(1) (2014) 1-19.
- [6] Yaseen, D. A., Scholz, M., Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review. International Journal of Environmental Science and Technology, **16**(2) (2019) 1193-1226.
- [7] Mountassir, Y., Benyaich, A., Rezrazi, M., Berçot, P., Gebrati, L., Wastewater effluent characteristics from Moroccan textile industry. Water science and technology, **67**(12) (2013) 2791-2799.
- [8] Van der Bruggen, B., Lejon, L., Vandecasteele, C., Reuse, treatment, and discharge of the concentrate of pressure-driven membrane processes. International Journal of Environmental Science and Technology, **37**(17) (2003) 3733-3738.
- [9] Gosavi, V. D., Sharma, S., A general review on various treatment methods for textile wastewater. International Journal of Environmental Science and Technology, Computer Science and Engineering and Technology, **3**(1) (2014) 29-39.
- [10] Košutić, K., Membranske tehnologije obrade vode, zbirka nastavnih tekstova, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, (2014) 2, 16-21, 39-42.

- [11] Xiao, L. S., Membrane-Based Separation u: Ying Jiang, L., Na, L., In Membrane-Based Separations in Metallurgy, Elsevier, (2017) 19-55.
- [12] Mustereț, C. P., Teodosiu, C., Removal of persistent organic pollutants from textile wastewater by membrane processes. Environmental Engineering and Management Journal, **6**(3) (2007) 175-187.
- [13] URL: <https://www.cerafiltec.com/history/> (pristup 02.05.2022.)
- [14] URL: [Spiral Membranes | GEA Replacement Membranes](#) (pristup 02.05.2022.)
- [15] URL: [Hollow fiber FO membranes in hollow fiber modules | ForwardOsmosisTech](#) (pristup 02.05.2022.)
- [16] Sadr, S. M., Saroj, D. P., Membrane technologies for municipal wastewater treatment, u: Basile, A., Cassano, A., Rastogi, N., K., Advances in membrane technologies for water treatment, Woodhead Publishing, (2015) 443-463.
- [17] Pal, P., Water treatment by membrane-separation technology, u: Pal, P., Industrial water treatment process technology, Butterworth-Heinemann, (2017) 173-242.
- [18] Abdullah, N., Rahman, M. A., Othman, M. H. D., Jaafar, J., Ismail, A. F., Membranes and membrane processes: fundamentals, u: Basile, A., Mozia, S., Molinari, R., Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, Elsevier, (2018) 45-70.
- [19] Mohammadi, T., Madaeni, S. S., Moghadam, M. K., Investigation of membrane fouling. Desalination and Water Treatment, **153**(1-3) (2003) 155-160.
- [20] Mulder, M., Basic principles of membrane technology, Springer science and business media, (1996) 280-415.
- [21] Isik, Z., Arikan, E. B., Bouras, H. D., Dizge, N., Bioactive ultrafiltration membrane manufactured from *Aspergillus carbonarius* M333 filamentous fungi for treatment of real textile wastewater. Bioresource Technology Reports, **5** (2019) 212-219.
- [22] Urošević, T., Trivunac, K., Achievements in low-pressure membrane processes microfiltration (MF) and ultrafiltration (UF) for wastewater and water treatment, u: Basile, A., Ghasemzadeh, K., Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, Elsevier, (2020) 67-107.

- [23] Ciardelli, G., Corsi, L., Marcucci, M., Membrane separation for wastewater reuse in the textile industry. *Resources, conservation and recycling*, **31**(2) (2001) 189-197.
- [24] Fell, C. J. D., Kim, K. J., Chen, V., Wiley, D. E., Fane, A. G., Factors determining flux and rejection of ultrafiltration membranes, u: Coppens, M., O., *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, Elsevier, **27**(3) (1990) 165–173.
- [25] Jönsson, A.-S., Trägårdh, G., Ultrafiltration applications. *Desalination and Water Treatment*, **77** (1990) 135–179.
- [26] Moslehyani, A., Ismail, A. F., Matsuura, T., Rahman, M. A., Goh, P. S., Recent Progresses of Ultrafiltration (UF) Membranes and Processes, u: *Water Treatment. Membrane Separation Principles and Applications*, Elsevier, (2019) 85–110.
- [27] Bouhadjar, S. I., Deowan, S. A., Galiano, F., Figoli, A., Hoinkis, J., Djennad, M. H., Performance of commercial membranes in a side-stream and submerged membrane bioreactor for model textile wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, **57**(12) (2016) 5275-5285.
- [28] Zahraa, S. H., Gzar, H. A., Evaluation of the performance of MBR-RO technology for treatment of textile wastewater and reuse. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **584**(1) (2019) 1-10.
- [29] Deowan, S. A., Bouhadjar, S. I., Hoinkis, J., Membrane bioreactors for water treatment, u: Basile, A., Cassano, A., Rastogi, N., K., *Advances in membrane technologies for water treatment*, Woodhead Publishing (2015) 155-184.
- [30] Spagni, A., Casu, S., Grilli, S., Decolourisation of textile wastewater in a submerged anaerobic membrane bioreactor. *Bioresource Technology Reports*, **117** (2012) 180-185.
- [31] Yigit, N. O., Uzal, N., Koseoglu, H., Harman, I., Yukseler, H., Yetis, U., Kitis, M., Treatment of a denim producing textile industry wastewater using pilot-scale membrane bioreactor. *Desalination and Water Treatment*, **240**(1-3) (2009) 143-150.
- [32] Lin, H., Gao, W., Meng, F., Liao, B.-Q., Leung, K.-T., Zhao, L., Hong, H., Membrane Bioreactors for Industrial Wastewater Treatment: A Critical Review. *Critical Reviews in International Journal of Environmental Science and Technology*, **42**(7) (2012) 677–740.

- [33] Luxbacher, T., Electrokinetic properties of natural fibres, u: Kozłowski R., Mackiewicz-Talarczyk M., Handbook of natural fibres (Second Edition), Woodhead Publishing, (2020) 323-353.
- [34] Dunwell, M., Yan, Y., Xu, B., Understanding the influence of the electrochemical double-layer on heterogeneous electrochemical reactions. Current opinion in chemical engineering, **20** (2018) 151-158.
- [35] Luxbacher, T., Pušić, T., Bukšek, H., Petrinić, I., ZETA potencijal tekstilnih materijala: pregled, Tekstil **65**(9-10) (2016) 340-345.
- [36] Grancarić, A. M., Tarbuk, A., Pušić, T., Electrokinetic properties of textile fabrics. Coloration Technology, **121**(4) (2005) 221-227.
- [37] Luxbacher, T., Pušić, T., Petrinić, I., Bukšek, H., Bischof-Vukušić, S., The zeta potential for monitoring the kinetics of adsorption of fabric softeners on knitted fabrics. In Proceedings of 6th International Textile, Clothing & Design Conference, (2012) 238-243.
- [38] Yang, X., López-Grimau, V., Vilaseca, M., Crespi, M., Treatment of Textile Wastewater by CAS, MBR, and MBBR: A Comparative Study from Technical, Economic, and Environmental Perspectives. Water, **12**(5) (2020) 1-17.
- [39] Yun, M.-A., Yeon, K.-M., Park, J.-S., Lee, C.-H., Chun, J., Lim, D. J., Characterization of biofilm structure and its effect on membrane permeability in MBR for dye wastewater treatment. Water Research, **40**(1) (2006) 45–52.
- [40] Buscio, V., Crespi, M., Gutiérrez-Bouzán, C., Application of PVDF ultrafiltration membranes to treat and reuse textile wastewater. Desalination and Water Treatment, **57**(18) (2016) 8090-8096.
- [41] Ćurić, I., Dolar, D., Karadakić, K., Textile wastewater reusability in knitted fabric washing process using UF membrane technology. Journal of Cleaner Production, **299** (2021), 126899 1-10.
- [42] URL: [Brief Explanation of delta E or delta E* – Hunterlab](#) (pristup 30.04.2022.)
- [43] Hai, F. I., Yamamoto, K., Fukushi, K., Hybrid treatment systems for dye wastewater. Critical Reviews in International Journal of Environmental Science and Technology, **37**(4) (2007) 315-377.
- [44] URL: <https://obrada-vode.hr/proizvodi/uredaji-za-pripremu-vode/> (pristup 19.04.2022.)

- [45] Badani, Z., Ait-Amar, H., Si-Salah, A., Brik, M., Fuchs, W., Treatment of textile waste water by membrane bioreactor and reuse. *Desalination and Water Treatment*, **185**(1-3) (2005) 411-417.
- [46] Keskin, B., Ersahin, M. E., Ozgun, H., Koyuncu, I., Pilot and full-scale applications of membrane processes for textile wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, **42** 102172 (2021) 1-11.
- [47] Yadav, A., Mukherji, S., Garg, A., Removal of chemical oxygen demand and color from simulated textile wastewater using a combination of chemical/physicochemical processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, **52**(30) (2013) 10063-10071.
- [48] AKMNU, H., Sela, S., K., Saha, S., Treatment of textile waste water using natural catalyst (chitosan and microorganism). *Journal of Textile Engineering and Fashion Technology*, **4**(5) (2018) 320-325.
- [49] Aouni, A., Fersi, C., Cuartas-Uribe, B., Bes-Pía, A., Alcaina-Miranda, M. I., Dhahbi, M., Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. *Desalination and Water Treatment*, **297** (2012) 87-96.
- [50] Núñez, J., Yeber, M., Cisternas, N., Thibaut, R., Medina, P., Carrasco, C., Application of electrocoagulation for the efficient pollutants removal to reuse the treated wastewater in the dyeing process of the textile industry. *Journal of hazardous materials*, **371** (2019) 705-711.
- [51] Ziegler, A. C., Issues related to use of turbidity measurements as a surrogate for suspended sediment, u: Turbidity and other sediment surrogates workshop, **1** (2002) 16-18.
- [52] Grancarić, A. M., Tarbuk, A., Dekanić, T., Elektropozitivan pamuk, *Tekstil*, **53**(2) (2004) 47-51.
- [53] Lokhande, H. T., Salvi, A. S., Electrokinetic studies of cellulosic fibres I. Zeta potential of fibres dyed with reactive dyes. *Colloid and Polymer Science*, **254**(11) (1976) 1030-1041.
- [54] Nadeem, K., Guyer, G. T., Keskinler, B., Dizge, N., Investigation of segregated wastewater streams reusability with membrane process for textile industry. *Journal of Cleaner Production*, **228** (2019) 1437-1445.

8. Životopis

Šejla Sarunović [REDACTED] Osnovnu školu "Luka Sesvete" završila je 2011. godine, te srednjoškolsko obrazovanje nastavila u X. gimnaziji "Ivan Supek" u Zagrebu. Pohađala je dvojezični program na engleskom jeziku. Nakon završene gimnazije 2015. godine upisala je preddiplomski studij Ekoinženjerstvo na Fakultetu kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Hrvatska. 2017. godine prebacila se na preddiplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala koji završava 2020. godine obranom završnog rada pod mentorstvom prof. dr. sc. Domagoja Vrsaljka na temu "Istraživanje utjecaja uvjeta očvršćivanja na primjenska svojstva prozirne poliakrilatne smole korištene u stereolitografiji". Time je stekla titulu sveučilišna prvostupnica inženjerka kemijskog inženjerstva. Te iste godine upisala je diplomski studij Kemija i inženjerstvo materijala. Stručnu praksu odradila je u Kraš prehrambenoj industriji d.d., Zagreb. Tijekom studija radila je studentske poslove u različitim strukama. Govori engleski jezik.